



# تعیین نیروی درگ با استفاده از شبیهسازی عددی اسکوپ درون روتور سانتریفیوژ

## INC29-1024

### ولی اله غضنفری\*، محمد مهدی شادمان، فاطمه منصورزاده

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

#### چکیدہ:

یکی از اجزای تأثیرگذار بر حداکثر میزان غنیسازی سانتریفیوژ، اسکوپ پسماند میباشد. در مقاله حاضر، شبیهسازی عددی جریان گاز اطراف اسکوپ پسماند در حالت دوبعدی به روشی جدید انجام میگیرد. در اینجا یک اسکوپ با سطح مقطع دایره به قطر ۷ میلیمتر و یک اسکوپ ایرفویلی به ابعاد ۹×۵ در نظر گرفته شد که هدف رسیدن به نیروی درگ ۷۰۰۰ دین میباشد. نتایج نشان داد شکل ایرفویلی نسبت به شکل دایره نیروی درگ کمتری دارد و برای رسیدن به نیروی درگ حاضر باید سر اسکوپ ایرفویلی در فاصله ۱۰ میلیمتری از دیواره قرار گیرد. با به کارگیری این روش، بدون انجام شبیهسازی سهبعدی که دارای پیچیدگیها و زمان محاسباتی زیاد است، نیروی درگ محاسبه میشود. **کلیدواژهها**: نیروی درگ، اسکوپ، شبیهسازی عددی، روتور سانتریفیوژ

# Determination of drag force using numerical simulation of a scoop within a centrifuge rotor

#### Valiyollah Ghazanfar\*, Mohamad Mahdi Shadman, Fatmeh Mansourzadeh

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

#### Abstract:

One of the important components of maximum enrichment of the centrifuge is the waste scoop. In this article, the numerical simulation of the gas flow around the waste scoop in a twodimensional model is performed in a new way. Here, a scoop with a circular cross-section with a diameter of 7 mm and an airfoil scoop with dimensions of  $5\times9$  were considered, which aims to achieve a drag force of 7000 dynes. The results showed that the airfoil shape has less drag force than the circle shape, and to achieve the present drag force, the airfoil head should be placed at a distance of 10 mm from the wall. By using this method, the drag force is calculated without performing a 3D simulation, which has a lot of complications and computational time.

١

Keywords: Drag force, Scoop, Numerical simulation, Centrifuge rotor





#### ۱. مقدمه

استفاده از ماشین سانتریفیوژ گازی با سرعت بالا در جداسازی ایزوتوپها بسیار رایج میباشد [۲،۱]. بنابراین بررسی رفتار گاز درون روتور از اهمیت زیادی برخوردار است [۴،۳]. برای افزایش جداسازی ایزوتوپها درون روتور جریان محوری ایجاد میشود. جریان محوری تحت تأثیر عواملی شامل گرادیان دمای دیواره روتور، اختلاف دمای کپها، نیروی درگ اسکوپ پسماند و غیره قرار دارد [۶،۵].

درون هر روتور سانتریفیوژ دو اسکوپ برای خروج گاز در نظر گرفته شده است. یکی از اسکوپها برای خروج جریان غنی و دیگری برای خروج جریان تهی تعبیه شده است. تأثیر اسکوپ محصول (اسکوپ مربوط به جریان غنی شده) بر جریان محوری درون روتور به واسطه حضور بفل بسیار اندک میباشد[۷–۹] ؛ بنابراین اسکوپ محصول تنها وظیفه خروج جریان گاز به بیرون از روتور را بر عهده دارد. اسکوپ پسماند (اسکوپ مربوط به جریان تهی شده) کاملاً در معرض جریان گاز قرار دارد (مطابق شکل ۱) و علاوه بر خروج گاز وظیفه تأمین نیروی محرکه لازم برای ایجاد جریان محوری بهینه درون روتور را عهدهدار است. در اثر برخورد جریان گاز به سر اسکوپ شوک اتفاق میافتد که به عوامل مختلفی بستگی دارد که مهمترین آنها عبارتند از هندسه اسکوپ، فاصله شعاعی از دیواره، سرعت زاویه ای روتور و فشار دیواره که نشان دهنده میزان گازی است که به اسکوپ برخورد می کند[۱۱،۱۰]. به دلیل اینکه اسکوپ قطعهای ساکن درون روتور میباشد به علت برخورد گاز به آن نیروی درگ ایجاد میگردد که مقدار آن تأثیر زیادی برای ایجاد جریان محوری بهینه درون دارد.



**شکل۱.** چگونگی برخورد گاز با اسکوپ

در شبیهسازی در حالت متقارن محوری، اسکوپ بهصورت دیسک فرض میشود. با ایجاد اختلاف سرعت زاویهای اسکوپ نیروی درگ به نحوی نسبت به جریان گاز اطراف آن، نیروی درگ ایجاد می گردد[۱۲]. با تغییر سرعت زاویهای اسکوپ نیروی درگ به نحوی تنظیم می گردد تا جریان محوری بهینه تشکیل شود و به تبع آن پارامترهای جداسازی بیشینه گردد. بنابراین در شبیهسازی جریان در کل روتور در حالت متقارن محوری مقدار نیروی درگ بهینه قابل محاسبه میباشد. بعد از این مرحله، لازم است اسکوپ سهبعدی به طریقی طراحی شود که نیروی درگ بهینه موردنظر، تأمین گردد. برای این کار نیاز است شبیهسازی در حالت سهبعدی در حالت متقارن محوری مقدار نیروی درگ بهینه موردنظر، تأمین گردد. برای این کار نیاز است شبیهسازی در حالت سهبعدی در حالتهای مختلف انجام شود تا اسکوپ موردنظر تعیین گردد. در شبیهسازی در حالت سهبعدی با توجه به پیچیدگیهای ترسیم هندسه و شبکهبندی، همگرایی و هزینه محاسباتی بسیار بالا، شبیهسازی اسکوپ در فاصلههای مختلف از دیواره روتور و یا شبیهسازی با تغییر شکل اسکوپ، نیازمند صرف هزینه زیادی خواهد بود[۱۳]. با توجه به میچیدگیهای ترسیم هندسه و شبیهسازی با تغییر شکل اسکوپ، نیازمند صرف هزینه اطراف اسکوپ پسماند به شیوهای انجام می گیرد که بتوان نیروی درگ را محاسبه نمود. در مقاله حاضر، هندسه اسکوپ به شکل دایرهای و ایرفویل در نظر گرفته شده است که با تغییر فاصله سر اسکوپ از دیواره، نیروی درگ ناشی از برخورد گاز به اسکوپ محاسبه می گردد.



بیست و نهمین کنفرانس ملی هستهای ایران ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی ۷اسفندماه ۱٤۰۱

در این بخش معادلات حاکم بر جریان گاز ارائه خواهد شد. این معادلات شامل معادلات بقای جرم، ممنتوم، انرژی و معادله حالت گاز ایدهآل است که در حالت پایا بهصورت زیر میباشد [۱۵،۱۴]:

معادله بقای جرم:  
(۱)  
(1)  
(1)  
معادله بقای مومنتم (بدون در نظر گرفتن نیروهای حجمی):  
(۲)  
(۲)  
معادله بقای انرژی:  
(۳)  
(۳)  

$$\nabla . [V(\rho E)] + \nabla . (k\nabla T) + \nabla . [(pI - \tau)V] = 0$$
  
(۳)  
معادله حالت گاز ایدهال:  
(۴)

که در این روابط ho دانسیته جرمی، V سرعت، p فشار و au تانسور تنش ویسکوز است. همچنین T دما، R ثابت جهانی گازها، M جرم مولکولی گاز، E انرژی کلی ویژه و k ضریب هدایت حرارتی میباشد.

۳. مدلسازی و شبیهسازی
۱٫۳ هندسه و شبکهبندی
۱٫۳ مدسه و شبکهبندی
۱٫۳ میلیمتر





برای شبکهبندی هندسههای تعیین شده، از شبکه ساختاریافته استفاده شده است به طوریکه سایز کوچکترین سلول روی ا سکوپها به صورت مشابه و کمتر از ۲۰ میکرومتر میبا شد. با توجه به سایر مسائل انجام شده با اعداد ماخ بالا [۱۴]، انتخاب سایز ۲۰ میکرومتر، استقلال از شبکه مسئله حاضر را برآوررده خواهد کرد.

# ۲,۳ شرایط مرزی و اولیه

در تمامی شبیهسازیهای حال حاضر، شرایط مرزی دیوارههای بالا، پایین، چپ و راست از نوع Pressure Far Field انتخاب گردیده است که در این شرط مرزی دما به صورت ثابت و برابر ۳۰۰ کلوین، عدد ماخ با توجه به فاصله اسکوپ دایرهای یا ایرفویل از دیواره روتور، با فرض خطی بودن توزیع سرعت زاویهای در راستای شعاعی اعمال می گردد. همچنین مقدار فشار با استفاده از فرض نمایی بودن توزیع فشار در راستای شعاعی تعیین می گردد. شرایط مرزی سرعت دیوارههای اسکوپ (دایره یا ایرفویل) به صورت یکسان و برابر با صفر و شرط مرزی گرمایی به صورت عایق در نظر گرفته می شود. فشار دیواره برابر با ۸۰۰۰ پاسکال و سرعت چرخشی دیواره ۵۵۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی





دیواره هاpressure far field می باشد که دارای عدد ماخ ثابت، دمای ثابت و فشار ثابت میباشند که در هر شعاع محاسبه شده و در شبیه سازی وارد می شود.

#### ۴. نتایج

برای مقایسه توزیع خصوصیات جریان اطراف اسکوپها، کانتورهای سرعت، دما و فشار برای حالتی که اسکوپ در فاصله شعاعی ۱۴۴ میلیمتری (فاصله از دیواره ۶ میلیمتر) قرار گرفته باشد، در شکلهای ۳ تا ۵ ارائه شده است. با مشاهده کانتورها، چگونگی عبور جریان گاز از روی اسکوپ، رخ دادن پدیده شوک، افزایش دما به علت برخورد گاز با اسکوپ و در نهایت تفاوت توزیع خصوصیات جریان برای اسکوپهای با شکلهای مختلف قابل مقایسه میباشد. در کانتورهای ارائه شده، شرایط مرزی برای تمامی حالتها یکسان در نظر گرفته شده به طوریکه برای جریان گاز عدد ماخ M، فشار P و دمای T به عنوان شرط مرزی برای دیوارههای بالا، پایین، چپ و راست انتخاب شده است.



**شکل ۳:** کانتور سرعت جریان اطراف اسکوپ در فاصله شعاعی ۶ میلیمتر از دیواره روتور



شکل۴: کانتور دمای جریان اطراف اسکوپ در فاصله شعاعی ۶ میلیمتر از دیواره روتور



شکل ۵: کانتور فشار جریان اطراف اسکوپ در فاصله شعاعی ۶ میلیمتر از دیواره روتور

همان طور که مشاهده گردید با برخورد گاز به اسکوپ، سرعت به شدت کاهش یافته است و دما و فشار به شدت افزایش یافته است. علاوه بر این مشاهده گردید در سطح مقطع دایره ای، تغییرات توزیع خصو صیات جریان نسبت به سطح مقطعهای ایرفویلی شدیدتر می با شد به طوریکه هنگام برخورد گاز به ا سکوپ با سطح مقطع دایره، سرعت نسبت به سطح مقطع ایروفیل بیشتر کاهش یافته است و دما و فشار بیشتر افزایش یافته است. با توجه به کانتورهای ارائه شده م شخص گردید به علت اینکه گرادیان خصو صیات جریان ایجاد شده در اطراف ایرفویل ۹×۵ کمتر می با شد بنابراین نیروی درگ حاصل هم کمتر خواهد شد. نیروی درگ بدست آمده از شبیه سازی در نرمافزار Fluent در حالت دوبعدی، به ازای واحد عمق محاسبه می گردد؛ بنابراین برای محاسبه دقیق نیروی درگ ایجاد شده برای اسکوپ مراحل زیر انجام می گیرد.

در مرحله اول با توجه به اینکه فشار در راستای شعاعی بهصورت نمایی تغییر میکند، بنابراین با دور شدن از دیواره روتور، مقادیر فشار به شدت کاهش مییابد و به تبع آن نیروی درگ هم به شدت کاهش خواهد یافت؛ بنابراین برای محاسبه نیروی درگ، فاصله ۲۳ میلیمتر از دیواره به عنوان ابتدای لوله اسکوپ و مبنای تمام محاسبات قرار میگیرد (در فاصله ۲۳ میلیمتری از دیواره فشار برابر ۸ پاسکال و نیروی درگ به ازای واحد عمق برابر ۰/۵۲ نیوتن بر متر میباشد).

در مرحله دوم، در هر شعاع به فاصله ۱ میلیمتر از یکدیگر شبیهسازی انجام میگیرد. به عنوان مثال، برای محاسبه نیروی درگ در حالتی که فاصله سر اسکوپ از دیواره ۱۰ میلیمتر میباشد نیاز است که ۱۳ شبیهسازی از فاصله ۲۳ میلیمتری تا ۱۰ میلیمتری دیواره انجام گردد.

در مرحله سـوم، مقدار نیروی درگ به ازای واحد عمق بدسـت آمده از اسکوپ در دو شـعاع مجاور بهصـورت میانگین محاسبه می شود. برای مثال در ایرفویل ۹×۵ در شعاع ۱۲ میلی متری از دیواره، نیروی درگ به ازای واحد عمق برابر با ۶/۲ نیوتن بر متر اسـت و در شـعاع ۱۱ میلی متری از دیواره، نیروی درگ به ازای واحد عمق برابر با ۶/۳ نیوتن بر متر است. در این حالت نیروی درگ میانگین برای فاصـله ۱۱ تا ۱۲ میلی متری از دیواره برابر ۶/۲۵ نیوتن بر متر است. با توجه به اینکه اختلاف فاصله ۱۲ تا ۱۱ میلی متر برابر ۱ میلی متر می باشد بنابراین عمق بدست آمده در این حالت برابر ۱ میلی متر است. در نهایت نیروی درگ در اسکوپی که ۱ میلی متر عمق دارد و در فاصله ۱۱ تا ۲ میلی متری از دیواره قرار گرفته است ۶۲۵ دین می باشد.

در مرحله چهارم، برای محا سبه نیروی درگ برای ا سکوپی که فا صله سر آن از دیواره م شخص با شد، تمامی مقادیری بدست آمده از مرحله قبل تا شعاع موردنظر با یکدیگر جمع شده و به عنوان نیروی درگ نهایی اسکوپ محاسبه می گردد.

در جدول ۱، نیروی درگ (به واحد دین) برای دو هندسـه اسـکوپ به شـکل دایره و ایرفویل ۹×۵ در حالات مختلف فاصله سر اسکوپ از دیواره ارائه شده است.





**جدول ۱.** نیروی درگ اسکوپ در فاصلههای مختلف از دیواره روتور

نیروی درگ	نیروی درگ	فاصله سر اسکوپ	
سطح مقطع ايرفويل	سطح مقطع دايره	از ديواره	رديف
5 mm×9 mm	D=7 mm	(mm)	
۵۱۲۰	14.91	١٠	١
٧ • ٢٣	19700	٩	٢
۸۵۶۹	78411	٨	٣
18780	378708	٧	۴
18220	۵۰۰۲۷	۶	۵
۲۰۳۲۵	۶۸۹۸۴	۵	۶

با توجه به مقادیر بدست آمده برای نیروی درگ در جدول بالا مشخص است که هر چه اسکوپ به دیواره روتور نزدیک تر گردد نیروی درگ ا سکوپ افزایش می یابد به طوریکه این روند افزای شی نیروی درگ، واب سته به سطح مقطع ا سکوپ می با شد. به عنوان نمونه هنگامی که فا صله سر ا سکوپ از دیوراه روتور برابر ۸ میلی متر با شد نیروی درگ ایجاد شده برای سطح مقطع دایره و سطح مقطع ایرفویل به ترتیب برابر با ۲۶۴۱۱ و ۸۵۶۹ دین می با شد. اگر این فا صله برابر ۷ میلی متر گردد نیروی درگ سطح مقطع دایره و ایروفویل برابر ۶۵ هم ۲۶

فرض شود نیروی درگ بهینه بد ست آمده از شبیه سازیهای جریان گاز درون روتور در حالت متقارن محوری ۷۰۰۰ دین میباشد، بنابراین طبق جدول ۱ اسکوپ با سطح مقطع ایرفویل که فاصله سر آن از دیواره ۹ میلیمتر باشد نیروی درگ مورد نیاز را تامین خواهد کرد (ردیف۵).

# ۵. نتیجهگیری

در مطالعه حاضر، شبیه سازی عددی دوبعدی اسکوپ برای دستیابی به نیروی درگ ۲۰۰۰ دین مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور اسکوپها با شکلهای دایره و ایرفویل شبیه سازی و نیروی درگ در شرایط فرآیندی برای یک روتور مدل محاسبه شد. با توجه به نمایی بودن توزیع فشار در راستای شعاعی، موقعیت دهانه اسکوپ نباید از ناحیه پیوسته و متراکم خارج گردد تا سطح مقطع ایجاد شده با تمام ظرفیت قابلیت خروج گاز از خود را داشته باشد. با توجه به ابعاد بدست آمده، اسکوپ ایرفویل در فاصله ۹ میلی متری از دیواره واقع می شود که ملاحضات مربوط به تامین نیروی درگ ۲۰۰۰ دین برآورده می گردد.

مراجع

- 1. V. Ghazanfari et al. *Simulation of uranium hexafluoride gas flow inside the axisymmetric rotor using OpenFOAM software*, Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat). **43**, 96 (2022). (in Presian).
- 2. V. Ghazanfari et al. *Parametric studies for a gas centrifuge using numerical method in OpenFOAM*, Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat), **42**, 19 (2021). (in Presian)
- 3. M. Benedict, in: Nuclear Chemical Engineering, (Mcgraw-Hill Book Company, 1981).
- 4. V. Borisevich et al. Numerical simulation of bellows effect on flow and separation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. **455**, 487 (2000).
- 5. V. Ghazanfari et al. OpenFoam application for numerical simulation of thermal drive effect on gas flow in a gas centrifuge for total reflux, Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat), **41**, 152 (2020). (in Persian)



- 6. T. Kai. Basic characteristics of centrifuges, (III) analysis of fluid flow in centrifuges, Journal of Nuclear Science and Technology, **14**, 267 (1976).
- 7. D. Jiang and S. Zeng, in: International Conference on Nuclear Engineering, CFD simulation of 3D flowfield in a gas centrifuge, (2006).
- 8. S. Bogovalov et al. Verification of numerical codes for modeling of the flow and isotope separation in gas centrifuges, Computers & Fluids. **86**, 177 (2013).
- 9. V. D. Borman et al. *The computer simulation of 3-d gas dynamics in a gas*, Journal of Physics. **760**, 751 (2016).
- 10. S. Yousefi-Nasab et al. Study of scoop drive and polymeric surface effects on the separation factors for a gas centrifuge using MD-DSMC method. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 43, 344 (2021).
- 11. M. Sadeghi and J. karimisabet, *Study on the effect of tail scoop distance to rotor wall and feed flow rate on gas hold up and rotor wall temperature of sub-critical gas centrifuge*, Journal of Separation Science and Engineering. **10**, 11 (2019). (in Persian)
- 12. S. V. Bogovalov et al. *Three-dimensional modeling of the flow around the gas scoop under optimal working regime of the Iguassu gas centrifuge at the hyper fast rotation*, Journal of Physics. **1**, 2147 (2022).
- 13. Y. N. Zhang et al. On the scoop heating effect of a gas centrifuge in numerical simulation, Journal of Physics. 1, 1099 (2018).
- 14. V. Ghazanfari et al. *Modeling and simulation of flow and uranium isotopes separation in gas centrifuges using implicit coupled density-based solver in OpenFOAM*, European Journal of Computational Mechanics. **29**, 1 (2020).
- 15. V. Ghazanfari et al. *Investigation of the continuum-rarefied flow and isotope separation using a hybrid CFD-DSMC simulation for UF6 in a gas centrifuge*, Annals of Nuclear Energy. **152**, 107985 (2020).