

شبیه سازی سه بعدی جریان گاز درون لوله‌های گازرسانی ماشین سانتریفیوژ با نرم افزار FLUENT

حامد واحدی^۱، محمد حسین عسکری^۱، سید جابر صفدری^{۲*}، محمد حسن ملاح^۲

^۱سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

^۲سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

چکیده

در ماشین‌های سانتریفیوژ می‌توان لوله‌های گازرسانی را به دو دسته‌ی کلی ورودی گاز به ماشین و خروجی از آن تقسیم کرد. تنها ورودی گاز به ماشین، لوله‌ی تغذیه‌ی خوراک و خروجی‌های ماشین، دو لوله مجزا برای جریان‌های پسماند و محصول است. برای مونتاژ این لوله‌ها در یک سانتریفیوژ گازی، آرایش‌های متفاوتی می‌توان در نظر گرفت. آرایش این لوله‌ها در میزان ارتعاش آن‌ها و تنظیم فاصله دهانه اسکوپ‌ها تا دیواره روتور اثرگذار است. همچنین با توجه به نوع آرایش لوله‌های گازرسانی، نحوه مونتاژ آن‌ها درون روتور و مجموعه ماشین متفاوت می‌شود. در این مقاله، با در نظر گرفتن آرایش مجزای لوله‌ها نسبت به یکدیگر، برای اولین بار شبیه‌سازی رفتار گاز درون هر یک از لوله‌های محصول، پسماند و خوراک به صورت سه‌بعدی و با نرم افزار Fluent انجام شده است. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته جریان در محدوده آرام بوده لیکن به دلیل وجود پدیده‌هایی که ذاتاً پیچیده هستند، همانند پدیده خفگی در خروجی خوراک یا عبور جریان پسماند از اریفیس، جریان درون لوله‌ها به‌صورت آشفتگی حل شده است.

کلمات کلیدی: ماشین سانتریفیوژ، لوله محصول، لوله پسماند، لوله خوراک

Numerical simulation of gas flow inside centrifuge gas pipes with FLUENT software

Hamed Vahedi¹, Mohammad Hossein Askari¹, Jaber Safdari^{2*}, mohammad hassan mallah²,

¹Advanced Technologies Company of Iran

²Materials and Nuclear Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute

Abstract

In gas centrifuges, gas pipes can be divided into two general categories: gas inlet to the machine and its outlet. The only gas inlet to the machine is the feed pipe and the machine outlets are two separate pipes for the waste and product streams. Different arrangements can be considered for assembling these tubes in a gas centrifuge. The arrangement of these tubes affects the amount of vibration and adjusts the distance between the orifice of the scope and the rotor wall. Also, according to the type of arrangement of gas pipes, the way of assembling them inside the rotor and the machine is different. In this paper, for the first time, considering the separate arrangement of the pipes in relation to each other, the simulation of gas behavior inside each of the product, waste and feed pipes has been done in three dimensions with Fluent software. In the simulations performed, the flow is in the laminar region, but due to the presence of inherently complex phenomena, such as the choking phenomenon at the feed outlet or the passage of the waste stream through the orifice, the flow inside the tubes is disturbed.

Keyword: Gas centrifuge, Product pipe, Waste pipe, Feed pipe

۱- مقدمه

در یک زنجیره از سانتریفیوژ گازی، بسته به نوع زنجیره و نحوه آرایش و چیدمان ماشین‌ها، جریان‌های محصول و پسماند ماشین‌ها در هر مرحله به جریان خوراک مرحله بعد یا قبل وارد می‌شوند. در یک زنجیره سانتریفیوژ گازی جریان‌های خروجی از یک ماشین با جریان‌های خروجی از ماشین‌های دیگر در یک مرحله ترکیب می‌شوند و به صورت یک جریان واحد، به عنوان ورودی به مرحله بعد وارد می‌شوند. با توجه به این ساختار، لازم است که فشار و دمای جریان‌های خوراک، محصول و پسماند هر ماشین در محدوده مشخصی باشد. با شبیه‌سازی جریان گاز درون لوله‌های گازرسانی در سانتریفیوژ گازی می‌توان نحوه رفتار جریان گاز درون هر یک از لوله‌ها را مورد بررسی قرار داد. بر این اساس طراحی لوله‌های گازرسانی به گونه‌ای انجام می‌شود که ضمن ورود مناسب جریان خوراک به درون روتور، جریان‌های محصول و پسماند به گونه‌ای از آن خارج شوند که میزان کات ماشین تنظیم شده و فشار جریان‌های ورودی و خروجی در مقدار مدنظر طراحی قرار داشته باشند [۱].

طراحی لوله‌های گازرسانی بر مبنای ایجاد ارتباط جریان گاز در خطوط هدر زنجیره و جریان گاز درون روتور است. بر این اساس لوله خوراک به گونه‌ای طراحی می‌شود که با ورود گاز به درون روتور پدیده خفگی رخ دهد تا شدت جریان خوراک ورودی به ماشین از جریان پایین دست مستقل شود. در این حال با طراحی مناسب نحوه تزریق گاز، دبی خوراک ورودی به ماشین تنظیم می‌شود. با توجه به فشار نسبتاً بالای گاز در اطراف دیواره روتور و وقوع پدیده شوک در دهانه اسکوپ‌ها، لازم است طراحی لوله‌های محصول و پسماند به گونه‌ای باشد که ضمن کاهش فشار جریان گاز درون لوله‌ها به حدود فشار خط هدر، دبی و کات ماشین نیز تنظیم شود.

۲- روش کار

با توجه به اینکه معادلات حاکم بر حرکت سیال بسیار پیچیده و کاملاً غیرخطی هستند، امکان حل دقیق آن‌ها میسر نبوده و برای حل آن‌ها ناگزیر به استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی هستیم. هرچند روش‌های تحلیلی نیز برای حل این معادلات وجود دارند، اما این روش‌ها از شکل ساده‌سازی شده معادلات بقا استفاده می‌کنند که باعث می‌شود جواب‌های به دست آمده از این روش‌ها دارای خطا بوده و نتوانند پدیده‌های حاکم بر حرکت سیال را با دقت بالایی پیش‌گویی کنند. دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD یکی از بزرگ‌ترین زمینه‌هایی است که مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی آن در نیمه‌ی دوم قرن بیستم و در سده‌ی جدید میلادی وصل می‌کند [۲]. کلیه روش‌های حل عددی معادلات، از استراتژی تقریباً یکسانی استفاده می‌کنند. ابتدا، فضای محاسباتی که جریان در آن مورد تحلیل قرار خواهد گرفت، به تعداد زیادی المان هندسی که آن‌ها را سلول شبکه می‌نامند تقسیم می‌شود. به این پدیده، تولید شبکه محاسباتی می‌گویند. سپس معادلات حاکم بر جریان با روش مناسب گسسته‌سازی می‌شوند. آنگاه گرادینان‌ها و شارهای



ظاهر شده در معادلات گسسته‌سازی شده با روش‌های استاندارد که مناسب مسئله مورد نظر هستند محاسبه شده و در معادلات جایگذاری می‌شوند. و نهایتاً مسئله یا یک الگوریتم عددی با استفاده از روش تکراری حل شده و مجهولات در کل ناحیه حل به دست می‌آیند. معادلات حاکم همان شکل کلی معادلات ناویر-استوکس سه بعدی برای جریان آرام تراکم پذیر است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (۱)$$

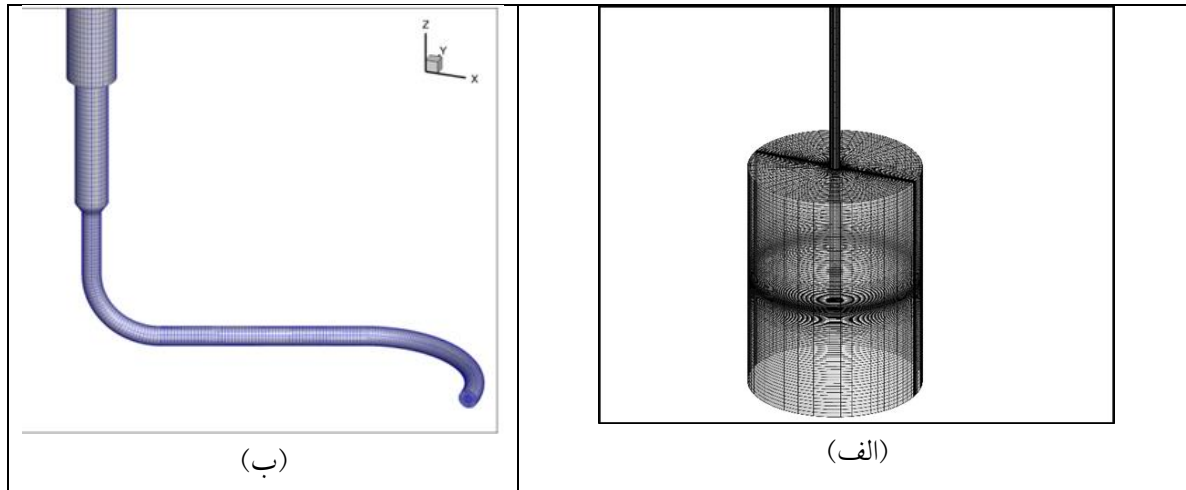
$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \bar{\tau} + \rho \bar{g} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho E + P) \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot (k_{eff} \vec{\nabla} T + \bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{V}) \quad (۳)$$

ولی به دلیل وجود پدیده‌هایی که ذاتاً پیچیده هستند، همانند پدیده خفگی در خروجی خوراک یا عبور جریان پسماند از اریفیس، جریان درون لوله‌ها به صورت آشفته حل شده است. معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی، بقای اندازه حرکت (سه بعد) و بقای انرژی است. معادلات توربولانسی با انتخاب مدل آشفتگی $k-\epsilon$ حل شده است. همچنین با توجه به اینکه جریان به صورت تک جزیی در نظر گرفته شده‌اند، از حل معادله جرم صرف نظر شده است [۳].

۳- نتایج

در این قسمت به نتایج حاصل از شبیه سازی جریان درون لوله های گازرسانی پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است محدوده شبیه سازی درون لوله پسماند از دهانه ورودی اسکوپ پسماند تا محل اتصال به خطوط زنجیره و همچنین برای لوله محصول نیز از دهانه ورودی اسکوپ محصول تا محل اتصال به خطوط زنجیره است. برای لوله خوراک نیز از محل اتصال از خطوط زنجیره محدوده شبیه سازی شروع شده و به منظور بررسی پدیده خفگی در محل ورود جریان گاز به داخل روتور بخشی از لوله خوراک داخل روتوری به قطر d قرار گرفته است. به منظور تنظیم فشار و دبی در لوله ها به ورودی اسکوپ ها و ورودی لوله خوراک شرط مرزی فشار (pressure inlet) و در خروجی از لوله ها محصول و پسماند شرط مرزی فشار (pressure outlet) داده شده است. ترسیم و شبکه بندی بر روی هندسه توسط نرم افزار Gambit انجام شده است. نحوه شبکه بندی بر روی هندسه از نوع سازمان یافته است. در راستای طول لوله ها شبکه متناسب با ارتفاع لوله ها افزایش اندازه داشته و همچنین در محل هایی مانند اریفیس ، تغییرات قطر در طول لوله ها و محل تزریق خوراک اندازه شبکه ها کوچک تر شده است. [۴].



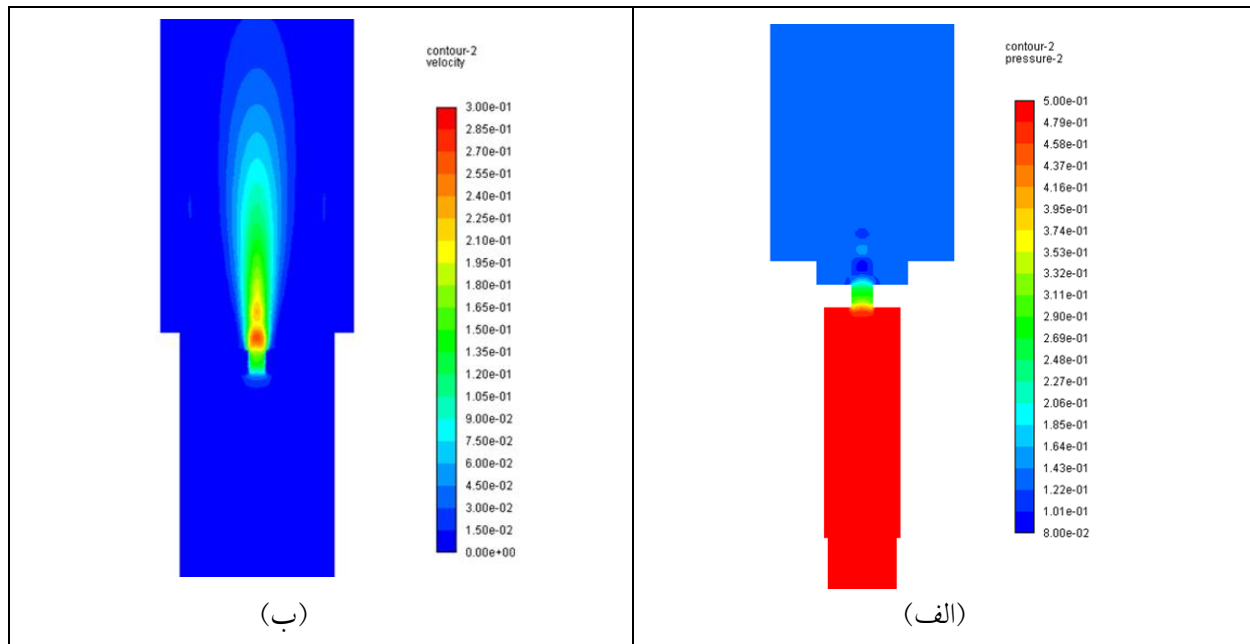
شکل ۱: الف: هندسه لوله خوراک و بخشی از روتور. ب: هندسه اسکوپ و لوله محصول

در این شبیه سازی، از سیال تراکم پذیر UF6 با فرض تک جزیی (جزء سنگین تر) با خواص فیزیکی که در جدول ۱ نشان داده شده استفاده شده است [۵].

جدول ۱ خواص فیزیکی سیال با واحد متناسب نرم افزار

مقدار	واحد	کمیت
377	J/kg. K	C_p
0.0077	W/m. K	Thermal conductivity
1.96E-05	kg/m-s	Viscosity
352	kg/kg.mol	Molecular Weight

لازم به ذکر است که در این مقاله کمیت‌های معرفی شده بدون بُعداند. در ماشین سانتریفیوژ جریان گاز با ماخ بالا در اثر برخورد با اسکوپ ساکن دچار پدیده شوک می‌گردد. در اثر این پدیده، سرعت گاز در دهانه لوله اسکوپ به شدت افت کرده است و فشار به شدت بالا می‌رود و از طرفی فشار جریان پسماند می‌بایست در محدوده فشار خطوط زنجیره قرارگیرد. بدین منظور جهت تنظیم فشار خروجی از یک اریفیس جهت تنظیم فشار و دبی مورد نظر استفاده می‌شود. نحوه تغییرات فشار قبل و بعد از اریفیس در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است.

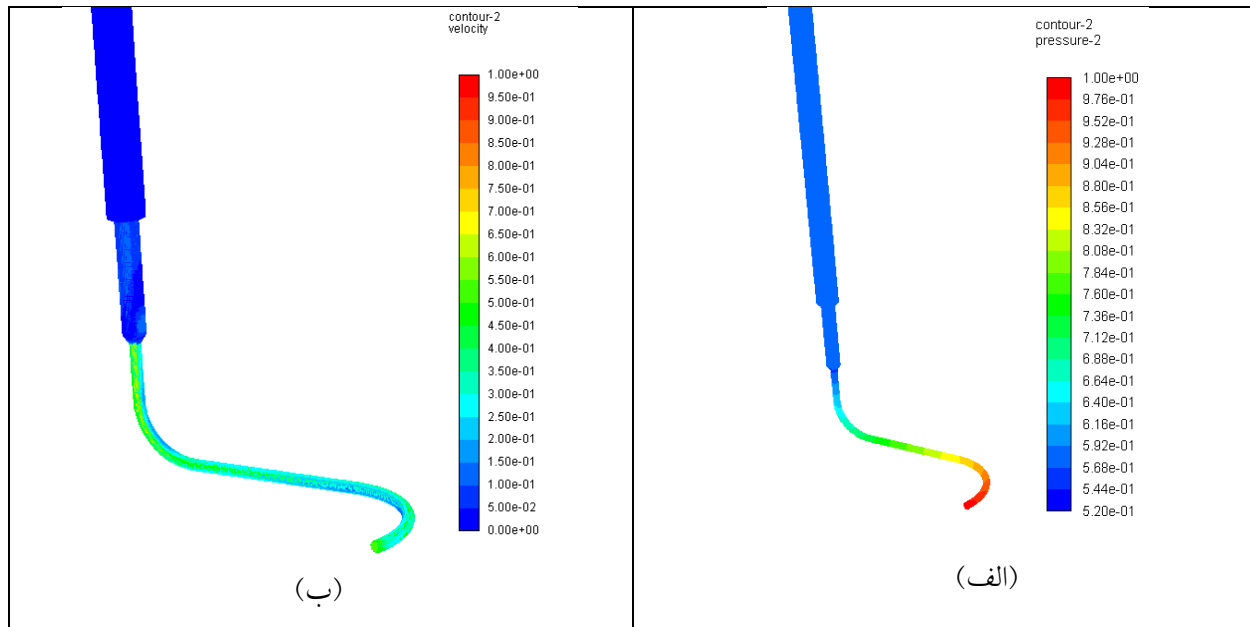


شکل ۲ الف: کانتور فشار بی بعد شده درون لوله و اریفیس پسماند. ب: کانتور مقدار سرعت بی بعد شده درون لوله و اریفیس پسماند

طبق شکل ۲ (ب)، کانتور مقدار سرعت بی بعد شده در طول لوله پسماند، به دلیل بروز خفگی و افت فشار ناشی از حضور اریفیس در مسیر جریان سرعت افزایش پیدا کرده است.

طبق شکل ۳ الف، تغییرات فشار در طول لوله اسکوپ و لوله محصول، جریان در حین عبور از افزایشنده^۱ دچار کاهش سرعت می‌شود و فشار آن به تناسب افزایش پیدا می‌کند. همچنین، در هنگام افزایش ناگهانی قطر، فشار کاهش می‌یابد. به این کاهش فشار ناشی از تغییر هندسه لوله کاهش موضعی فشار گفته می‌شود. در این مکان انرژی جنبشی سیال کاهش پیدا می‌کند و سرعت به نسبت تغییر قطر صورت گرفته کم می‌شود و متناسب با تغییر قطر و سرعت فشار نیز افزایش می‌یابد. ولی بیشتر برای کاهش سرعت استفاده می‌شود.

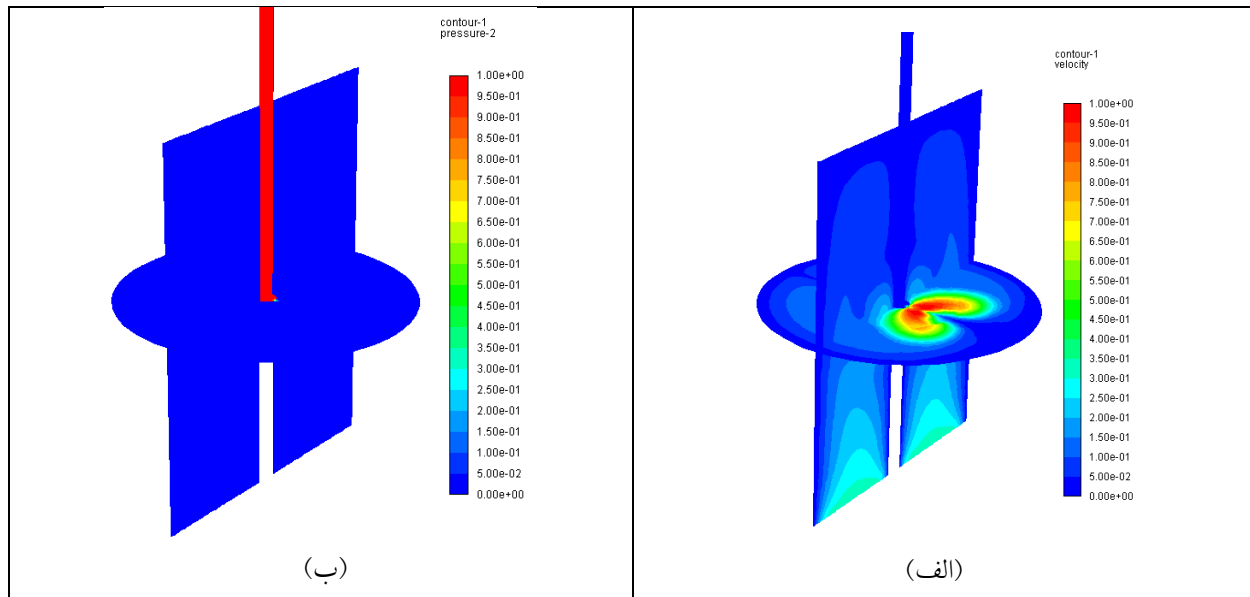
¹ Expander



شکل ۳. الف: کانتور فشار بی بعد شده در طول اسکوپ و لوله محصول. ب: کانتور مقدار سرعت بی بعد شده در طول اسکوپ و لوله محصول

طبق شکل ۴ الف، نمودار تغییرات سرعت در طول لوله خوراک، تغییرات سرعت در طول لوله قبل از ورود خوراک به داخل روتور چندان محسوس نیست. در لحظه ورود خوراک به داخل روتور پدیده خفگی اتفاق می‌افتد و فشار به شدت افت پیدا می‌کند و جریان بالادست از پایین دست مستقل می‌شود. با توجه به این شکل با پدیده خفگی و ورود گاز به فضای کم فشار درون روتور، سرعت گاز به شدت افزایش، و با فاصله گرفتن از محل تزریق خوراک، به تدریج کاهش می‌یابد.

شکل ۴ ب نحوه توزیع فشار در طول لوله خوراک را نشان می‌دهد. میزان افت فشار در طول لوله خوراک ناچیز، و ناشی از افت های اصطکاکی در طول مسیر جریان گاز درون لوله است. در لحظه ورود خوراک به داخل روتور، به دلیل کاهش فشار شدید که به طور ناگهانی رخ داده، پدیده خفگی اتفاق می‌افتد. همان‌گونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود فشار گاز با خروج از لوله خوراک و ورود به فضای درون روتور به شدت افت می‌کند. این افت فشار منجر به پدیده خفگی و سبب می‌شود جریان درون لوله خوراک و دبی عبوری از آن از شرایط درون روتور مستقل گردد.



شکل ۴. الف : کانتور مقدار سرعت بی بعد شده در طول لوله خوراک و ناحیه ای از روتور. ب : کانتور مقدار سرعت در طول لوله خوراک و ناحیه ای روتور

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به شبیه سازی عددی جریان درون لوله‌های گازرسانی ماشین سانتریفیوژ در حالت سه بعدی با استفاده از نرم افزار FLUENT پرداخته شده است. نتایج شبیه سازی مشخص کرد با توجه به پایین بودن فشار ورودی اسکوپ محصول و همچنین با ایجاد افت فشار موضعی ناشی از تغییرات قطر در طول لوله می‌توان فشار خروجی را متناسب با فشار خطوط زنجیره ایجاد کرد. در لوله پسماند به دلیل فشار بالای ناشی از شوک سر اسکوپ از اریفیس جهت تقلیل فشار به اندازه فشار خطوط زنجیره استفاده می‌شود. در طراحی لوله خوراک، با توجه به دبی خوراک و فشار خطوط زنجیره نیز قطر سوراخ محل تزریق خوراک به داخل روتور و همچنین قطر لوله خوراک نیز انتخاب می‌شود.

۵- مراجع

- [1] D.Geoffrey, " Uranium enrichment by gas centrifuge, "1973
- [2] R. E. Treybal, Mass Transfer Operations, McGraw-Hill Book Company, 1981.
- [3] F. M. White, Fluid Mechanics, NewYork: McGraw Hill, 2013.
- [4] ANSYS, ANSYSR Help Viewer, 2018.
- [5] R. DeWitt, "Uranium Hexafluoride: A Survey of the Physicochemical Properties," Technical Report GAT-280, Goodyear Atomic Corporation, Portsmouth, Ohio,, 1960.