

مدلسازی و شبیه‌سازی اریفیس با مونت کارلو در روش انبساط دینامیکی و بهینه‌سازی

هندسه به روش المان محدود

محسن شایان‌مهر^۱، امجد سازگار^{۲*}

۱. پژوهشگر سازمان انرژی اتمی ایران، تهران - ایران.

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی:

۸۴۸۶-۱۳۶۵، تهران - ایران.

چکیده:

در این تحقیق مدلسازی و شبیه‌سازی اریفیس در روش انبساط دینامیکی با استفاده از مونت کارلو در نرم‌افزار مول‌فلو و بهینه‌سازی هندسه با روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس انجام شده است. روش انبساط دینامیکی به منظور انجام تست عملکردی و صحت‌گذاری پمپ‌های خلأ بالا (HV) و بسیار بالا (UHV) نظیر پمپ‌های یونی مورد استفاده قرار گرفته است. ابعاد و هندسه اریفیس به عنوان پارامترهای اصلی در روش انبساط دینامیکی مطابق با استانداردهای بین‌المللی نظیر ایزو محاسبه و طراحی شده‌اند. قطر و ضخامت بهینه هندسه اریفیس در پمپ یونی با ظرفیت ۱۵۰ (با قطر دهانه ۱۰۰ میلی‌متر) و ۲۴۰ لیتر بر ثانیه (با قطر دهانه ۱۶۰ میلی‌متر) به ترتیب برابر با ۱۲ و ۱/۲۵ میلی‌متر و ۱۵ و ۲ میلی‌متر به دست آمده است. قطر و ضخامت‌های بهینه برای گازهای آرگون، نیتروژن و هیدروژن به دست آمده است. **کلیدواژه‌ها:** هندسه اریفیس، روش مونت کارلو، روش المان محدود، پمپ‌های یونی، روش انبساط دینامیکی.

Modelling and Simulation of Orifice with Monte Carlo in Dynamic Expansion Method (DEM) and Geometry Optimization based on Finite element

M. Shayanmehr¹, A. Sazgar^{2*}

1. Researcher of AEOI, Tehran-Iran

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

Abstract:

In this research, modeling and simulation of orifice in the dynamic expansion method have been investigated by using Monte Carlo method in Molflow+ software, and geometry dimensions has been also optimized by finite element method in Ansys software. The dynamic expansion method was used to perform functional testing and validation of high and ultra-high vacuum pumps such as Ion pumps. The main parameters in the dynamic expansion method, dimension and geometry of orifice are calculated and designed based on ISO international standards. The optimal diameter and thickness of the orifice geometry in the ion pump with a capacity of 150 (Input Diameter: 100 mm) and 240 (Input Diameter: 160 mm) liters per second are equal to 12 and 1.25 mm, and 15 and 2 mm, respectively. Optimal diameters and thicknesses are obtained for Argon, Nitrogen and Hydrogen gases.

Keywords: Orifice Geometry, Monte Carlo, Finite element, Ion Pumps, Dynamic Expansion Method.

۱. مقدمه

به منظور تست عملکردی و صحت‌گذاری پمپ‌های خلأ، پارامترهای مهم پمپ‌های خلأ از قبیل سرعت پمپاژ، فشار خلأ نهایی، نسبت تراکم، مقدار بخار آب مجاز و ... مورد بررسی و اندازه‌گیری دقیق قرار می‌گیرند. کنترل و اندازه‌گیری هر کدام از این پارامترها شامل روش‌های متفاوت و الزامات مختلفی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهم، سرعت پمپاژ می‌باشد؛ که به منظور اندازه‌گیری آن مطابق با استاندارد ایزو، با توجه به دامنه فشار کاری از سه روش استفاده می‌شود. سه روش اندازه‌گیری سرعت پمپاژ پمپ‌های خلأ عبارت‌اند از: ۱. روش ظرفیت پمپاژ^۱ که این روش برای تست سرعت پمپاژ تمامی پمپ‌های خلأ کاربرد داشته و قابل استفاده است. ۲. روش انبساط دینامیکی^۲ (جریان اریفیس^۳ یا انبساط پیوسته^۴) که برای تست پمپ‌های خلأ بسیار بالا نظیر پمپ‌های یونی و توربومولکولار مناسب می‌باشد. ۳. روش تخلیه فشار^۵ که برای تست عملکردی پمپ‌ها با دبی‌های کم در فشارهای خلأ پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته در طی سالیان گذشته در زمینه مدلسازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی هندسه اریفیس در روش انبساط دینامیکی، به دلیل پیچیدگی‌های موجود فعالیت‌های کمی صورت پذیرفته است. در سال ۲۰۰۴ پکسا^۶ و در سال ۲۰۱۰ یوشیدا^۷ آنالیز عدم قطعیت کنداکتانس اریفیس در روش جریان اریفیس را بررسی کرده است [۱ و ۲] پکسا دریافت که پارامترهایی نظیر دمای محفظه، نرخ جریان و گاززدایی، فشار خلأ نهایی و سرعت پمپاژ روی عدم قطعیت کنداکتانس اریفیس تأثیر دارند. یوشیدا دریافت که زاویه اریفیس روی عدم قطعیت کنداکتانس اریفیس و در نتیجه دقت آزمون‌ها اثر مستقیم دارد. در سال ۲۰۱۲ گرونچ^۸ به بررسی مطالعه تجربی جریان گاز در اریفیس‌های مختلف پرداخت و نشان داد که در کنداکتانس کلی می‌توان اثر انتقال از رژیم جریان مولکولی به جریان انتقالی قابل مشاهده است [۳]. در سال ۲۰۱۲ میسدانیتیس^۹ و در سال ۲۰۱۴ هو^{۱۰}، مطالعه عددی جریان گازهای رقیق را از طریق یک اریفیس بررسی کردند، بطوریکه هو یک معادله برای تقریب ارزیابی دبی جرمی جریان نسبت به زمان را ارائه کرد [۴]، و در سال ۲۰۱۷ فلیکس^{۱۱} شبیه‌سازی یک جریانی از گازها درون یک اریفیس را با استفاده از روش DSMC انجام داده‌اند [۵].

در این تحقیق ابعاد هندسه اریفیس که به‌عنوان اصلی‌ترین پارامتر در روش انبساط دینامیکی می‌باشد، مطابق با استاندارد ISO-21360-1 در دو پمپ یونی با ظرفیت‌های ۱۵۰ و ۲۴۰ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نرم‌افزار مول‌فلو که بر پایه روش مونت کارلو است، شبیه‌سازی و تحلیل هندسه اریفیس به‌منظور بیشینه آهنگ گاز ورودی به سیستم و نسبت فشار بین دو محفظه بالا و پایین با مدنظر قراردادن اثر گاززدایی و نفوذ در گازهای آرگون، نیتروژن و هیدروژن به دست آمده است [۶].

۲. روش انبساط دینامیکی

روش انبساط دینامیکی به‌طور گسترده‌ای برای استانداردسازی خلأهای بالا و بسیار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱، طرح‌واره روش انبساط دینامیکی و مدل طراحی شده برای تست عملکردی پمپ‌های خلأ آورده شده است.

¹ Throughput method

² Dynamic Expansion Method (DEM)

³ Orifice Flow Method (OFM)

⁴ Continue Expansion

⁵ Pump-Down method

⁶ Peksa

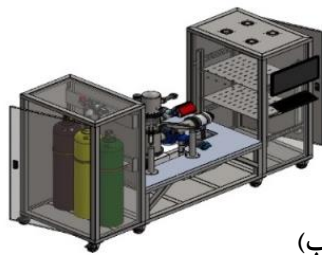
⁷ Yoshida

⁸ Gronych

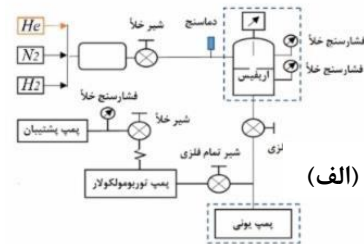
⁹ Misdanitis

¹⁰ Ho

¹¹ Felix



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) طرح‌واره روش انبساط دینامیکی [۶]؛ ب) مدل طراحی شده.

استفاده از روش انبساط دینامیکی، اولین بار توسط ارهارد فیشر و هانس مامسن^۱ در سال ۱۹۶۷ پیشنهاد شده است [۷]. آن‌ها با استفاده از این روش به اندازه‌گیری و بررسی سرعت پمپاژ یک پمپ یونی پرداخته‌اند. در جریان مولکولی، فشار از نسبت آهنگ گاز ورودی به سیستم Q ، به کنداکتانس اریفیس C به دست می‌آید.

۱.۲. روابط تحلیلی در روش انبساط دینامیکی

آهنگ گاز ورودی به سیستم، دبی حجمی گازی است که در فشار معین از واحد سطح عبور می‌کند. رابطه آهنگ گاز ورودی به سیستم در معادله (۱) مشاهده می‌شود. در این رابطه P فشار و V حجم گاز است.

$$Q = \frac{d}{dt}(PV) \quad (1)$$

یکی از پارامترهای مهم در پمپ‌های خلأ، سرعت پمپاژ S بوده که از معادله (۲) به دست می‌آید.

$$S = \frac{Q}{P} \quad (2)$$

مقدار کنداکتانس از معادله (۲) به دست می‌آید [۸].

$$C = \frac{Q}{P_r - P_e} \quad (3)$$

به عبارت دیگر، نسبت فشار محفظه بالا به پایین، با تابعی از سرعت پمپاژ پمپ و کنداکتانس اریفیس به دست می‌آید:

$$\frac{P_d}{P_e} = \frac{S}{C} + 1 \quad (4)$$

برای محاسبه کنداکتانس در محدوده جریان مولکولی از پارامتر بی‌بعد احتمال عبور^۲ استفاده می‌گردد [۲]:

$$C = a \frac{v}{2} A \quad (5)$$

که a ، ضریب عبور مجرا؛ v ، سرعت حرارتی گاز و A ، سطح مقطع عبوری می‌باشند. برای لوله با سطح مقطع دایروی روابط زیر که در معادله (۶) قابل مشاهده است، ارائه شده است [۸].

$$K_1 = 1 + L^2 / 4 - L / 4 \sqrt{L^2 + 4}$$

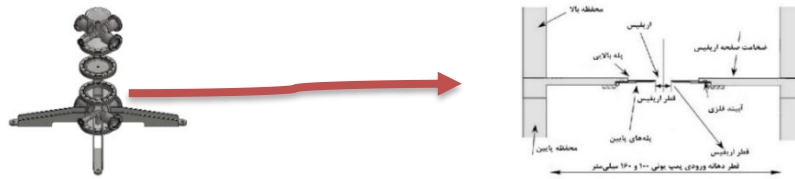
$$K_2 = \frac{\sqrt{(\lambda - L^2) \sqrt{L^2 + 4} + L^2 - 16}}{72L \sqrt{L^2 + 4} - 228 \ln(L + \sqrt{L^2 + 4}) + 228 \ln 2} \quad (6)$$

$$L = \frac{l}{r} = \frac{\text{Length}}{\text{radius}}$$

احتمال عبور برای یک لوله متناهی با سطح مقطع دایروی مطابق با معادله (۶) برابر است با تفاضل دو پارامتر بی‌بعد K_1 و K_2 که هر کدام برحسب شعاع داخلی لوله و طول لوله هستند $(a = K_1 - K_2)$.

¹ Fisher & Mommsen

² Transmission probability



شکل ۲: محفظه و اریفیس در روش انبساط دینامیکی [۶].

از طرف دیگر، مطابق با الزامات استاندارد در روش انبساط دینامیکی، نسبت ضخامت ورق اریفیس δ به قطر اریفیس d بوده که باید کمتر از 0.1 باشد. احتمال عبور برای ابعاد هندسه اریفیس مشخص شده، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{d}} \quad (7)$$

کنداکتانس اریفیس را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$C_{Orifice} = \sqrt{(\pi RT / 32M)} [1 / (1 + \delta / d)] d^2 \quad (8)$$

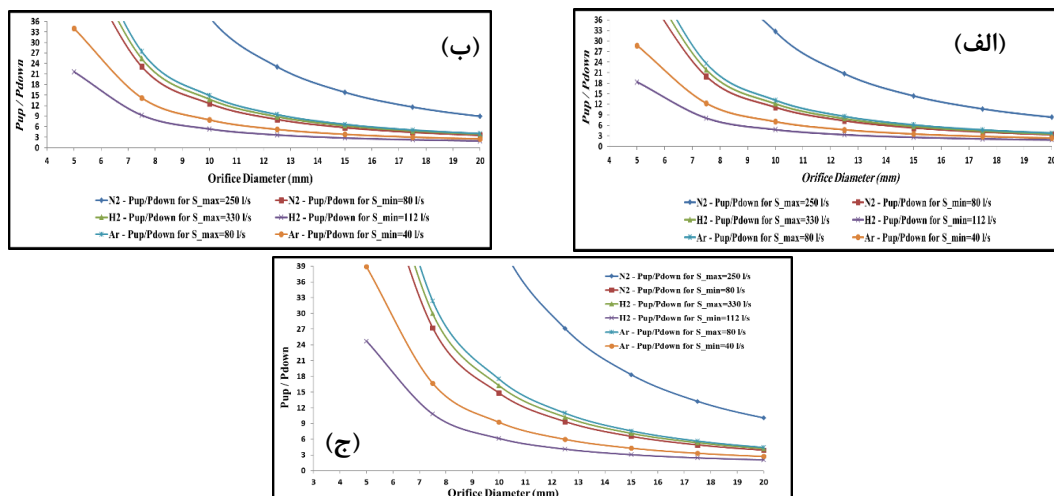
۳. مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی هندسه اریفیس در روش انبساط دینامیکی

در روش انبساط دینامیکی، محفظه تست به دو حجم توسط اریفیس تقسیم می‌شود. دو محفظه مطابق با استاندارد دارای حجم مساوی می‌باشند. در شکل ۲، طرح‌واره‌ای از محفظه و هندسه اریفیس نشان داده شده است. به منظور بررسی و تحلیل اثر قطر اریفیس و نسبت فشار در محفظه، نیاز به تعیین سرعت پمپاژ در دو پمپ یونی هدف‌گذاری شده می‌باشد. مطابق با استاندارد ISO-21360-1 قطر اریفیس باید طوری طراحی گردد که نسبت فشار محفظه بالا و پایین بین ۳ تا ۳۰ قرار گیرد. بیشترین و کمترین مقدار سرعت پمپاژ در گازهای آرگون، نیتروژن و هیدروژن از منحنی مشخصه پمپ‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. کمترین و بیشترین مقدار سرعت پمپاژ پمپ‌های یونی بر حسب گازهای مختلف

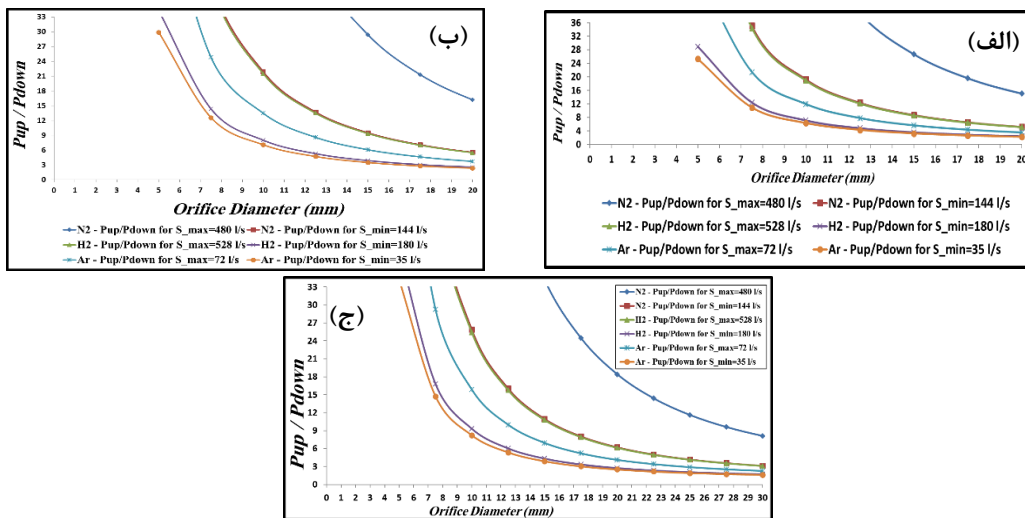
سرعت پمپاژ گاز آرگون (L/s)		سرعت پمپاژ گاز هیدروژن (L/s)		سرعت پمپاژ گاز نیتروژن (L/s)	
S_{max}	S_{min}	S_{max}	S_{min}	S_{max}	S_{min}
۸۰	۴۰	۳۳۰	۱۱۲	۲۵۰	۸۰
۷۲	۳۵	۵۲۸	۱۸۰	۴۸۰	۱۴۴

با توجه به معادلات و سرعت پمپاژ مشخص شده می‌توان نسبت فشار و قطر اریفیس را در پمپ‌های یونی ۱۵۰ لیتر بر ثانیه (دهانه ورودی ۱۰۰ میلی‌متر) و ۲۴۰ لیتر بر ثانیه (دهانه ورودی ۱۶۰ میلی‌متر) در گازهای مورد نظر و ضخامت‌های ۴،۲ و ۸ میلی‌متر به دست آورد (شکل ۳ و ۴).



شکل ۳: نسبت فشار و قطر اریفیس در روش انبساط دینامیکی پمپ یونی با ظرفیت ۱۵۰ لیتر بر ثانیه ضخامت ورق اریفیس برابر با: الف) ۲ میلی‌متر؛ ب) ۴ میلی‌متر و ج) ۸ میلی‌متر.

در جدول ۲ محدوده و مقادیر بهینه قطر اریفیس در ضخامت‌های ۴،۲ و ۸ میلی‌متر آورده شده است.

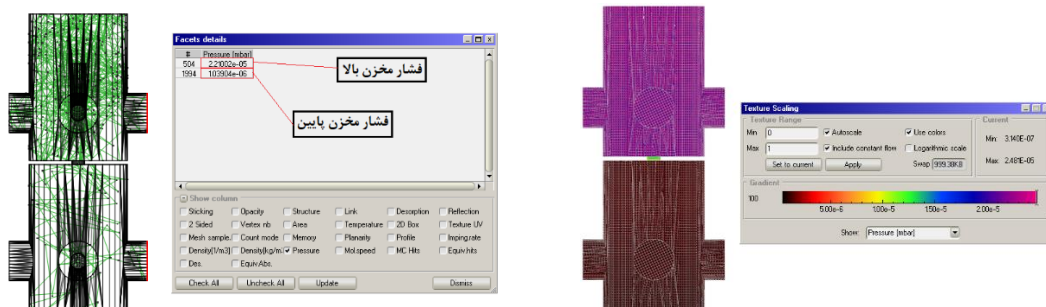


شکل ۴: نسبت فشار و قطر اریفیس در روش انبساط دینامیکی پمپ یونی با ظرفیت ۲۴۰ لیتر بر ثانیه ضخامت ورق اریفیس برابر با: (الف) ۲ میلی‌متر؛ (ب) ۴ میلی‌متر و (ج) ۸ میلی‌متر.
جدول ۲. محدوده و مقادیر بهینه قطر اریفیس

ضخامت صفحه=۸ میلی‌متر	ضخامت صفحه=۴ میلی‌متر	ضخامت صفحه=۲ میلی‌متر	
محدوده بهینه: ۱۲-۱۵	محدوده بهینه: ۱۱-۱۴٫۵	محدوده بهینه: ۱۰٫۵-۱۳٫۵	پمپ یونی ۱۵۰ (L/s)
قطر بهینه: ۱۴ میلی‌متر	قطر بهینه: ۱۳ میلی‌متر	قطر بهینه: ۱۲ میلی‌متر	
محدوده بهینه: ۱۶-۱۸	محدوده بهینه: ۱۵-۱۶٫۵	محدوده بهینه: ۱۴-۱۶	پمپ یونی ۲۴۰ (L/s)
قطر بهینه: ۱۷ میلی‌متر	قطر بهینه: ۱۶ میلی‌متر	قطر بهینه: ۱۵ میلی‌متر	

۱.۳. نسبت فشار و ابعاد هندسه اریفیس

در محفظه خلأ تست، عوامل مختلفی بر بالا بردن فشار تأثیر دارد. به منظور محاسبه فشار و کندانسانس برای هندسه اریفیس از نرم‌افزار مول‌فلو استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی حل جریان مولکولی اثر گاززدایی برای استیل ۳۱۶L برابر با $4.1 \times 10^{-11} \text{ mbar.l/s.cm}^2$ در نظر گرفته شده است [۹]. به منظور حل معادلات در نرم‌افزار مول‌فلو، از توزیع زاویه‌ای Cosine و ضریب انعکاس برابر با یک استفاده شده است. در شکل ۵ شبیه‌سازی جریان فشار محفظه بالا و پایین در نرم‌افزار مول‌فلو و خطوط همتراز فشار در کل هندسه محفظه آورده شده است.



شکل ۵: الف) جریان فشار محفظه بالا و پایین ب) خطوط همتراز فشار در کل هندسه محفظه.

نتایج شبیه‌سازی آهنگ گاز ورودی Q در پمپ‌های یونی ۱۵۰ و ۲۴۰ لیتر بر ثانیه، در جریان گازهای نیتروژن، هیدروژن و آرگون با در نظر گرفتن مقادیر گاززدایی و نفوذ، برای حالتی که فشار ورودی پمپ یا به عبارتی فشار محفظه پایین 10^{-6} mbar باشد، در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. آهنگ گاز ورودی Q پمپ‌های یونی در فشار ورودی 10^{-6} mbar برای گازهای مختلف

گاز آرگون $(\frac{\text{mbar.l}}{\text{s}})$	گاز نیتروژن $(\frac{\text{mbar.l}}{\text{s}})$	گاز هیدروژن $(\frac{\text{mbar.l}}{\text{s}})$	
5×10^{-5}	2.5×10^{-4}	3.3×10^{-4}	پمپ یونی ۱۵۰ (L/s)
7.2×10^{-5}	4.8×10^{-4}	5.28×10^{-4}	پمپ یونی ۲۴۰ (L/s)

با استفاده از این مقدار، نسبت فشار و فشار مبنا در محفظه بالا و پایین برای گازهای هیدروژن، نیتروژن و آرگون به دست آمده است (جدول ۴ و ۵).

جدول ۴. نسبت فشار در شبیه‌سازی با نرم‌افزار مول‌فلو در پمپ‌های یونی و در گازهای مختلف

پمپ یونی ۲۴۰ (L/s)			پمپ یونی ۱۵۰ (L/s)			
$\delta=8$ mm	$\delta=4$ mm	$\delta=2$ mm	$\delta=8$ mm	$\delta=4$ mm	$\delta=2$ mm	
$d=17$ mm	$d=16$ mm	$d=15$ mm	$d=14$ mm	$d=13$ mm	$d=12$ mm	
$S=72$ L/s			$S=50$ L/s			گاز آرگون (Ar)
P_{up}/P_{down} =۵/۴۹	P_{up}/P_{down} =۵/۴۲	P_{up}/P_{down} =۵/۶۱	P_{up}/P_{down} =۵/۸۳	P_{up}/P_{down} =۵/۸۴	P_{up}/P_{down} =۶/۱۳	
$S=480$ L/s			$S=250$ L/s			گاز نیتروژن (N_2)
P_{up}/P_{down} =۲۶/۰۵	P_{up}/P_{down} =۲۵/۶۶	P_{up}/P_{down} =۲۶/۶۹	P_{up}/P_{down} =۲۱/۲۱	P_{up}/P_{down} =۲۱/۲۴	P_{up}/P_{down} =۲۲/۴۶	
$S=528$ L/s			$S=330$ L/s			گاز هیدروژن (H_2)
P_{up}/P_{down} =۸/۳۶	P_{up}/P_{down} =۸/۲۵	P_{up}/P_{down} =۸/۵۵	P_{up}/P_{down} =۸/۱۳	P_{up}/P_{down} =۸/۱۴	P_{up}/P_{down} =۸/۵۷	

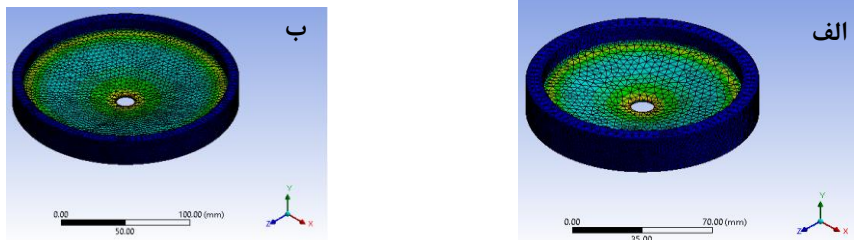
جدول ۵. فشار مبنا در محفظه بالا و محفظه پایین برای پمپ‌ها و هندسه‌های اریفیس مختلف

پمپ یونی ۲۴۰ (L/s)			پمپ یونی ۱۵۰ (L/s)			فشار مبنا (mbar)
$\delta=8$ mm	$\delta=4$ mm	$\delta=2$ mm	$\delta=8$ mm	$\delta=4$ mm	$\delta=2$ mm	
$d=17$ mm	$d=16$ mm	$d=15$ mm	$d=14$ mm	$d=13$ mm	$d=12$ mm	
$1,38 \times 10^{-10}$	$1,41 \times 10^{-10}$	$1,41 \times 10^{-10}$	$9,90 \times 10^{-10}$	$9,91 \times 10^{-10}$	$9,85 \times 10^{-10}$	محفظه بالا P_U
$3,90 \times 10^{-10}$	$3,92 \times 10^{-10}$	$3,93 \times 10^{-10}$	$2,82 \times 10^{-10}$	$2,84 \times 10^{-10}$	$2,78 \times 10^{-10}$	محفظه پایین P_d

۲.۳. تحلیل تنش صفحه اریفیس با نرم‌افزار انسیس

تعیین ضخامت صفحه اریفیس از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. ضخامت صفحه اریفیس باید به گونه‌ای طراحی گردد که در حین انجام تست به جهت نیرویی که از طرف جریان به صفحه وارد می‌گردد، صفحه اریفیس دچار تغییر شکل پلاستیک و یا شکست نگردد؛ به گونه‌ای که ضخامت صفحه اریفیس از یک مقدار مشخص برای هر هندسه جریان نمی‌تواند، کمتر باشد. از طرف دیگر، با افزایش ضخامت اریفیس ایجاد گردابه در محدوده پایین دست را به همراه دارد، در نتیجه، ضرورت دارد تا لبه اریفیس در قسمت پایین دست جریان شیب‌دار طراحی گردد [۱۰].

کمترین مقدار مجاز ضخامت اریفیس را می‌توان از طریق تحلیل تنش با استفاده از یک ضریب اطمینان مناسب به دست آورد. ضریب اطمینان مجاز تنش صفحه اریفیس از معیار تسلیم فون مایسز برابر با ۱/۵ و اختلاف فشار در دو سطح صفحه اریفیس یک بار در نظر گرفته شده است. این تحلیل تنش از روش المان محدود و در نرم‌افزار انسیس و مازول استاتیک استراکچرال مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل ۶ و جدول ۶ نتایج این تحلیل آورده شده است. در ابتدا به منظور تحلیل هندسه‌ها، روند استقلال نتایج از تعداد شبکه‌بندی در نرم‌افزار انسیس مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت بر اساس شبکه‌بندی با حداکثر اندازه شبکه برابر ۰/۵ میلی‌متر برای هندسه‌های مختلف تحلیل انجام شده است.



شکل ۶: مدل‌های سه‌بعدی صفحات همراه با شبکه‌بندی هندسه و توزیع تنش. الف) صفحه با قطر ۱۰۰، قطر اریفیس ۱۲ و ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر؛ ب) صفحه با قطر ۱۶۰، قطر اریفیس ۱۵ و ضخامت ۲ میلی‌متر.

جدول ۶. ضخامت هندسه اریفیس در شرایط مختلف

کمترین ضریب اطمینان	بیشینه تنش تسلیم فون مایسز (Mpa)	ضخامت صفحه (میلی‌متر)	قطر اریفیس (میلی‌متر)	پمپ یونی (L/s)
۵,۴۳ ✖	۴۶,۰۱	۲		
۲,۷۶ ✖	۹۰,۴۸	۱,۵	۱۲	۱۵۰
۱,۸۰ ✓	۱۳۸,۷۷	۱,۲۵ ✓		
۱,۲۸ ✖	۱۹۵,۲۴	۱		
۱,۶۹ ✓	۱۴۷,۶۳	۲ ✓	۱۵	۲۴۰

۸. نتیجه‌گیری

با توجه به الزامات استاندارد و با استفاده از روابط تحلیلی، پارامترهای هندسه اریفیس مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده است. قطر بهینه اریفیس در پمپ یونی با قطر دهانه ۱۰۰ میلی‌متر، در ضخامت ۲ میلی‌متر برابر با ۱۲، در ضخامت ۴ میلی‌متر برابر با ۱۳ و در ضخامت ۸ میلی‌متر برابر با ۱۴ میلی‌متر بوده و برای پمپ یونی با قطر دهانه ۱۶۰ میلی‌متر، در ضخامت ۲ میلی‌متر برابر با ۱۵، در ضخامت ۴ میلی‌متر برابر با ۱۶ و در ضخامت ۸ میلی‌متر برابر با ۱۷ میلی‌متر می‌باشد. ضخامت هندسه اریفیس بهینه در نرم‌افزار انسیس و با توجه به معیار تسلیم فون مایسز برابر با ۱/۵، برای دو پمپ یونی با قطر دهانه ۱۰۰ و ۱۶۰ میلی‌متر، ۱/۸ و ۱/۶۹ میلی‌متر به ترتیب می‌باشد.

۹. مراجع

1. L. Peksa et al., *Uncertainty analysis of the high vacuum part of the orifice-flow-type pressure standard*, J Vacuum **76**, 477-489 (2004).
2. H. Yoshida et al., *Calculation and uncertainty evaluation of conductance of a precise orifice for orifice-flow method*, J Vacuum **84**, 277-279 (2010).
3. T. Gronych et al., *Experimental study of gas flow through a multi-opening orifice*, J Vacuum **86**, 1759e1763 (2012).
4. M.T. Ho and I. Graur, *Numerical study of unsteady rarefied gas flow through an orifice*, J Vacuum, 1-13 (2014).
5. F. Sharipov, *Simulation of gaseous mixture flow through an orifice*, J Vacuum, (2017).
6. ISO, *Vacuum technology-Standard methods for measuring vacuum pump performance*, International Organization for Standardization, See also URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21360:-1:ed1:v1:en>, (2012).
7. E. Fischer and H. Mommsen, *Monte Carlo computations on molecular flow in pumping speed test domes*, Vacuum, **17**(6): p. 309-315 (1967).
8. J.F. O'Hanlon, *A user's guide to vacuum technology*, John Wiley & Sons, (2005).
9. Y. Ishimori et al., *Outgassing Rates of Stainless Steel and Mild Steel after Different Pretreatments*, Shinku, **14**(8) 295-301 (1971).
10. R.P. Iczkowski et al, *Effusion of gases through conical orifices*, J Chem Phys **67**, 29-33 (1963).