

## بررسی عددی زاویه پره در طبقات میانی و پایانی یک پمپ توربومولکولار پنج طبقه با در نظر گرفتن اثر مولکول‌های بازگشتی از سایر طبقات به روش ذره نمونه مونت کارلو

میراعلم مهدی<sup>۱\*</sup>، مجتبی صادقیان<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله پس از بررسی کارهای تئوری و آزمایشگاهی انجام شده در زمینه پمپ‌های توربومولکولار به شبیه‌سازی رفتار مولکول در جریان مولکولی آزاد در بین طبقات پمپ توربومولکولار با در نظر گرفتن اثر مولکول‌های بازگشتی از سایر طبقات پرداخته خواهد شد. این شبیه‌سازی در دستگاه مختصات استوانه‌ای، به روش ذره نمونه مونت کارلو و با در نظر گرفتن هندسه واقعی و سه بعدی پره انجام شده است. سپس کار حاضر با نتایج تجربی و کارهای قبلی اعتبارسنجی و مقایسه می‌شود. در ادامه برای بررسی اثر زاویه پره در طبقات میانی و پایانی پمپ توربومولکولار، با توجه به اینکه عمدتاً در این طبقات از سه زاویه ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درجه استفاده می‌شود، چهار ترکیب مختلف از زوایای مذکور برای یک پمپ توربومولکولار پنج طبقه ارائه شده است. چهار ترکیب ارائه شده بر اساس دو پارامتر حداکثر نسبت تراکم و حداکثر دبی بعد در سرعت‌های مختلف پره، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت می‌توان دریافت که برای طبقات میانی و پایانی پمپ توربومولکولار باید از زوایای مختلف با تأکید بر زاویه ۱۵ درجه در مقایسه با زوایای ۲۰ و ۱۰ درجه استفاده کرد. همچنین استفاده کمتر از زاویه ۱۰ درجه به منظور دستیابی به حداکثر نسبت تراکم و حداکثر دبی توصیه می‌گردد.

کلمات کلیدی

پمپ توربومولکولار، شبیه‌سازی عددی، روش ذره نمونه مونت کارلو، مولکول بازگشتی، زاویه پره.

## Numerical investigation of the blade angle in the middle and final stages of a five-stage turbomolecular pump by considering the effect of returning molecules from other stages using the TPMC method

Miralam Mahdi<sup>1\*</sup>, Mojtaba Sadeghian<sup>2</sup>

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Shaid Rajae Teacher Training University, Tehran, Iran

2- MSc., Mech. Eng., Shaid Rajae Teacher Training University, Tehran, Iran

### Abstract

In this research, after examining the theoretical and experimental work done in the field of turbomolecular pumps, the simulation of the behavior of molecules in the free molecular flow between the stages of the turbomolecular pump, considering the effect of returning molecules from other stages, will be done. This simulation was done in the cylindrical coordinate system, using the test-particle Monte Carlo method and considering the real and three-dimensional geometry of the blade. Then the present work is validated and compared with experimental results and previous works. In the following, to investigate the effect of the blade angle in the middle and final stages of the turbomolecular pump, considering that three angles of 20, 15 and 10 degrees are mainly used in these stages, four different combinations of the aforementioned angles are presented for a five-stage turbomolecular pump. The four presented combinations have been evaluated based on the two parameters of maximum compression ratio and maximum flow rate at different blade speeds. Finally, it can be seen that different angles should be used for the middle and final stages of the turbomolecular pump, emphasizing the 15 degree angle compared to the 20 and 10 degree angles. It is also recommended to use an angle less than 10 degrees in order to achieve the maximum compression ratio and maximum flow rate.

### Keywords

Turbomolecular Pump, Numerical Simulation, Test-Particle Monte Carlo Method, Returning Molecule, Blade Angle.

## ۱- مقدمه

امروزه فناوری خلا به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف، از تولید شیشه‌های روکش‌دار در ساختمان‌ها و خودروها گرفته تا صنایع حساسی چون هسته‌ای، فضایی و... کاربرد دارد. پمپ توربومولکولار محوری یکی از انواع پمپ‌های تولیدکننده خلا بالا و فوق‌بالاست که نسبت به سایر پمپ‌های مورد استفاده در این زمینه مانند پمپ کریوژنیک<sup>۱</sup> و دیفیوژن<sup>۲</sup>، دارای عملکرد آسان‌تر و نیاز به مراقبت کمتر می‌باشد. همچنین این نوع پمپ، مصرف انرژی کمتری نسبت به پمپ کریوژنیک داشته و زمانی که با یک پمپ اولیه خشک<sup>۳</sup> ترکیب می‌شود، برخلاف پمپ‌های دیفیوژن، روغن را به داخل سیستم خلا برگشت نمی‌دهد. چنین شرایطی باعث به وجود آمدن محیطی بسیار تمیز و به دور از هرگونه آلودگی خواهد شد. این ویژگی باعث شده است تا پمپ توربومولکولار برای گستره وسیعی از فناوری‌های امروزی از میکروسکوپ الکترونی گرفته تا پردازش نیمه‌هادی‌ها کاربرد داشته باشد. علاوه بر آن پمپ‌های توربومولکولار با یاتاقان مغناطیسی نیاز به روانکاری و خنک‌کاری نداشته و می‌توان آن را در هر جهتی نصب نمود. با این حال از معایب این پمپ‌ها می‌توان به پایین بودن دبی عبوری، حساسیت نسبت به ورود ذرات خارجی، امکان تأثیر متقابل امواج الکترومغناطیس و قیمت بالای آن اشاره کرد. پمپ‌های توربومولکولار بر اساس اصل عمل و عکس‌العمل میان مولکول گاز و سطح متحرک کار می‌کنند، به این صورت که ممنتوم مولکول گاز پس از برخورد با پره‌های روتور افزایش یافته و در جهت خاصی شتاب می‌گیرد و به سمت پره‌های استاتور و در نهایت خروجی پمپ هدایت می‌شود [۱].

پمپ‌های مولکولی اولیه مانند پمپ درگ مولکولی گائند در سال ۱۹۱۳، پمپ مولکولی جریان دوگانه هلوک در سال ۱۹۲۳ و پمپ مولکولی دیسکی سیگبه در سال

۱۹۴۰ به دلیل سرعت پمپاژ نسبتاً پایین، کمبود مطالعات و آزمایش‌های عملی بر روی این نوع پمپ‌ها و در نتیجه عدم اطمینان در عملکرد آنها موفق نبودند. همچنین در آن روزها، تقاضای واقعی برای این نوع پمپ‌ها وجود نداشت [۲]. در سال ۱۹۵۷ پمپ توربومولکولار توسط بکر [۳] معرفی شد. نخستین بار مطالعه بر روی عملکرد پمپ توربومولکولار در جریان آزاد مولکولی توسط کروگر و شاپیرو [۴] انجام شد. آنها نتایج کار خود را برای یک و چند طبقه پمپ با در نظر گرفتن ارتفاع نامتناهی پره ارائه کردند. فینول [۵] روشی را برای محاسبه نسبت تراکم یک ردیف روتور در جریان آزاد مولکولی پیشنهاد کرد. ساوادا و همکاران [۶] جریان آزاد مولکولی را در یک ردیف روتور با در نظر گرفتن ارتفاع محدود پره بررسی کردند. سپس ساوادا [۷] عملکرد چندین ترکیب مختلف شامل روتور - استاتور و روتور - استاتور - روتور را مورد ارزیابی قرار داد و رابطه ضرایب عبوردهی یک ردیف روتور - استاتور و ضریب عبوردهی کلی پمپ را به دست آورد. در ادامه ساوادا [۸] روشی را برای تعیین آرایش ردیف تیغه‌ها پیشنهاد داد و بر اساس آن یک پمپ مولکولار ۱۳ طبقه را طراحی کرد. در نهایت ساوادا [۹] با حل معادلات ناویر - استوکس عملکرد یک پمپ را در رژیم جریان انتقالی و لغزشی مورد بررسی قرار داد. در سال ۱۹۷۴ ایدا و کیمورا [۱۰] با مطالعه اثر تیغه‌های گوه‌ای شکل بر پارامترهای عملکردی پمپ توربومولکولار و مقایسه آن با تیغه‌های مسطح دریافتند که، حداکثر نسبت فشار تیغه‌های گوه‌ای شکل تنها چند درصد از تیغه‌های مسطح کمتر است در حالیکه سرعت پمپاژ آن به مراتب بزرگتر از تیغه‌های مسطح می‌باشد. کاتسیمیچاس و همکاران [۱۱] با استفاده از روش مونت کارلو به بررسی جریان آزاد مولکولی در یک ردیف پره با هندسه سه‌بعدی پرداختند. مطالعات آنها در دستگاه مختصات غیر اینرسی (چرخشی) و با نادیده گرفتن لقی بین پره و پوسته انجام شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که

<sup>۱</sup> Cryo pump

<sup>۲</sup> Diffusion pump

<sup>۳</sup> Dry primary pump

آزاد مولکولی تطابق خوبی با آزمایش‌های موجود داشت اما با کاهش عدد نادسن فاصله از نتایج تجربی بیشتر می‌شد. در سال ۲۰۰۳ آملی و همکاران [۱۷] عملکرد یک طبقه پمپ توربومولکولار را با حل جریان آزاد مولکولی و با در نظر گرفتن لقی بین پره و پوسته پمپ و نیز روتور و استاتور، شکل واقعی و سه بعدی پره و ضخامت آن به روش مونت کارلو بررسی کردند. آن‌ها شبیه‌سازی خود را برای پمپ چندطبقه توسعه دادند و دریافتند که تأثیر شکاف بین روتور و استاتور برای اولین ردیف پمپ با زوایای پره‌های بزرگ و فواصل زیاد قابل توجه است، در حالی که برای ردیف‌های آخر با زاویه‌های کوچک و فواصل کم، ناچیز می‌باشد. در سال ۲۰۰۹ وانگ و همکاران [۱۸] به شبیه‌سازی جریان در یک ردیف روتور بدون هیچ گونه ساده‌سازی هندسی و با اتخاذ مدل برخورد بین مولکولی کره نرم تعمیم‌یافته پرداختند. آنها مشخصات میدان جریان، از جمله تعداد برخورد مولکول به سطح، توزیع دما و چگالی تحت سرعت پمپاژ صفر را به دست آوردند. در سال ۲۰۰۷ شکوهمند و همکاران [۱۹] روش ذره‌نمونه را برای مطالعه جریان مولکولی آزاد در یک ردیف پره سه‌بعدی مسطح برای روتور با در نظر گرفتن اثرات لقی بین روتور و پوسته پمپ و صرف‌نظر از ضخامت پره‌های روتور به کار بردند. در این شبیه‌سازی علاوه بر تحلیل جریان، اثر ضریب تطبیق گرمایی (به‌عنوان عامل کم اثر) و عدم تعادل گرمایی یعنی اختلاف دمای متوسط جریان و دمای دیواره (به‌عنوان یک عامل مؤثر) بر پارامترهای عملکردی پمپ بررسی شده است. در سال ۲۰۰۹ ورسلوویس و همکاران [۲۰] دیدگاه جدیدی را برای شبیه‌سازی جریان در پمپ توربومولکولار با استفاده از روش آماری مونت کارلو ارائه کردند. آن‌ها سطوح متحرکی را نسبت به مش به منظور مدل کردن تأثیر روتور و استاتور بر جریان گاز،

ضرایب عبوردهی در تمام سرعت‌ها برای حالت سه‌بعدی بیشتر از دوبعدی بوده و این اختلاف در سرعت‌های دورانی بالا و یا وقتی پمپ در برابر گازهای سنگین عمل می‌کند بیشتر می‌شود. اشنایدر و همکاران [۱۲] فرمول‌های تجربی نسبت تراکم و ضریب سرعت یک پمپ توربومولکولی تک مرحله‌ای که در رژیم جریان مولکولی کار می‌کند را توسعه دادند. جو و همکاران [۱۳] عملکرد پمپاژ یک پمپ توربومولکولار شیاردار مارپیچی را با هر دو روش دینامیک سیالات محاسباتی عددی و روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند. هیو و هوانگ [۱۴] عملکرد پمپ توربومولکولار را برای محدوده وسیعی از عدد نادسن از طریق حل عددی معادله بولتزمن بدست آمده از شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات نشان داد که با افزایش عدد نادسن از ناحیه گذار به ناحیه جریان آزاد مولکولی، تأثیر آن بر پارامترهای عملکردی پمپ کمتر خواهد شد. در نهایت عملکرد کلی یک پمپ توربومولکولار که دارای سه نوع پره با ۲۴ مرحله بود را پیش‌بینی کردند. اسکووردکو [۱۵] به حل جریان آزاد مولکولی با در نظر گرفتن شکل واقعی و سه بعدی پره‌ها، فاصله میان روتور و استاتور و همچنین لقی بین پره و پوسته در یک پمپ چندطبقه پرداخت. او محاسبات خود را در دستگاه مختصات اینرسی و به روش مونت کارلو با نادیده گرفتن اثر ضخامت دیواره‌های پره انجام داد. در سال ۲۰۰۱ چانگ و جو [۱۶] عملکرد یک طبقه پمپ توربومولکولار سه‌بعدی را در ناحیه گذار و مولکولی آزاد با استفاده از روش مستقیم مونت کارلو مورد مطالعه قرار دادند. آنها برخوردهای بین مولکولی را با فرض مدل کره نرم متغیر<sup>۱</sup> با استفاده از مدل لارسن-بورگانکه<sup>۲</sup> غیرکشسان در نظر گرفتند و از طرح‌های برخورد بدون زمان شمار<sup>۳</sup> استفاده کردند. نتایج عددی برای ناحیه

<sup>۱</sup> VSS (Variable soft sphere)

<sup>۲</sup> Larsen-Burganke model

<sup>۳</sup> NTC (No Time Counter)

<sup>۴</sup> GSS (generalized soft sphere)

## ۲- مبانی و روش تحقیق

برای شبیه‌سازی رفتار مولکول در جریان آزاد مولکولی در یک پمپ توربومولکولار چندطبقه لازم است در ابتدا رفتار مولکول در یک طبقه پمپ شبیه‌سازی شود؛ سپس برای داشتن طبقات دیگر باید حرکت مولکول در بین طبقات نیز مدل‌سازی شود. در نهایت با ترکیب دو مدل بالا می‌توان رفتار مولکول را در پمپ توربومولکولار چندطبقه شبیه‌سازی کرد و مورد مطالعه قرار داد؛ بنابراین در ابتدا شبیه‌سازی رفتار مولکول در یک طبقه پمپ شامل روتور و استاتور ارائه می‌گردد.

### ۲-۱- شبیه‌سازی رفتار مولکول در یک طبقه پمپ

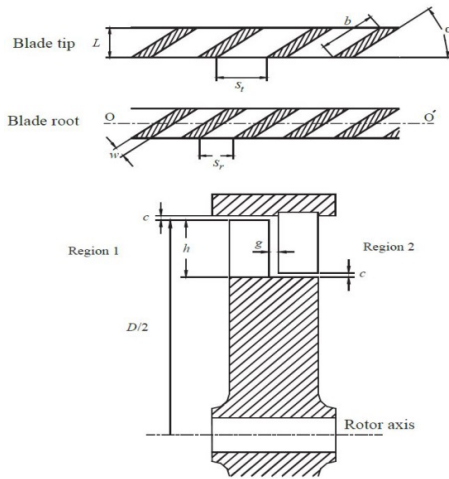
در این مقاله برای شبیه‌سازی رفتار مولکول در یک طبقه پمپ از روش ذره نمونه مونت کارلو استفاده شده است. روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند.

#### ۲-۱-۱- روش ذره نمونه مونت کارلو

روش شبیه‌سازی مونت کارلو ابتدا توسط متروپلیس و همکاران در زمان جنگ جهانی دوم برای تشریح پتانسیل برهم‌کنش مولکول‌های گازی اورانیم، مورد استفاده در ساخت بمب اتم به کارگیری شد [۲۵]. در سال ۱۹۶۰ دیویس روش مونت کارلو را برای حل جریان مولکولی به کار برد. در این روش هر مولکول، نماینده تعداد مشخصی از مولکول‌ها می‌باشد. سپس هر مولکول نمونه به صورت جداگانه وارد طبقات پمپ شده و تمام برخوردهای آن با مرزهای میدان محاسباتی تا زمانی که از بالادست یا پایین دست میدان خارج شود محاسبه خواهد شد. در نهایت ضریب عبوردهی طبقه مورد نظر به صورت نسبت تعداد مولکول‌های خروجی از پایین دست به کل مولکول‌های ورودی به آن طبقه تعریف می‌شود.

به کار بردند. در سال ۲۰۱۰ شمس و همکاران [۲۱] جریان آزاد مولکولی را در یک ردیف روتور با پره‌های مسطح و ناموازی به روش ذره‌نمونه مونت کارلو شبیه‌سازی کردند. این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن هندسه سه‌بعدی تیغه‌ها و صرفه‌نظر از ضخامت آن انجام شد. در این شبیه‌سازی علاوه بر تحلیل جریان، اثرات هندسه و تغییر زاویه گوه پره بر روی پارامترهای عملکردی پمپ مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۱۱ ماستیانی و همکاران [۲۲] فضای بین دو پره روتور را با روش مستقیم مونت کارلو و مدل برخورد وی اچ اس<sup>۱</sup> شبیه‌سازی کردند. آنها تاثیر پارامترهای هندسی مانند نسبت فاصله بین دو پره به طول پره و

زاویه پره را روی پمپ بررسی کردند. سنجیل و ادیس [۲۳] جریان مولکولی را در یک پمپ چندطبقه به روش مستقیم مونت کارلو بررسی کردند. در این مطالعه نواحی محاسباتی به صورت شبکه‌های چهارضلعی و دوبعدی در نظر گرفته شد. آنها نشان دادند که تکنیک مورد استفاده در مقایسه با تکنیک ردیابی سلول به سلول بسیار سریع‌تر است. هان و همکاران [۲۴] ملاحظات طراحی پمپ توربومولکولار مغناطیسی ۵ محوره در مقیاس بزرگ را ارائه کردند. با دقت در کارهای گذشته می‌توان دریافت که بررسی اثر زاویه پره بر عملکرد پمپ توربومولکولار یا محدود به یک طبقه از پمپ و بدون در نظر گرفتن دیگر طبقات بوده و یا به‌طور کلی در یک پمپ توربومولکولار، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله شبیه‌سازی رفتار مولکول در جریان مولکولی آزاد در بین طبقات پمپ توربومولکولار با در نظر گرفتن اثر مولکول‌های بازگشتی از سایر طبقات، به‌منظور مطالعه اثر زاویه پره، به‌طور خاص در طبقات میانی و پایانی پمپ توربومولکولار چندطبقه، به روش ذره نمونه مونت کارلو و با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب انجام شده است.



شکل ۲- نمای برش خورده یک طبقه پمپ توربومولکولار [۱۷]

### ۲-۱-۳- معادلات تحلیلی مرزهای میدان محاسباتی

برای محاسبه مکان برخورد مولکول با مرزهای میدان محاسباتی، معادلات خط سیر مولکول با معادلات مرزهای میدان محاسباتی تلاقی داده می‌شود. معادلات در دستگاه مختصات استوانه‌ای () که در آن مبدأ مختصات در ورودی روتور می‌باشد، نوشته شده است. با توجه به اینکه پره‌ها به صورت صفحات مسطح و سه‌بعدی در نظر گرفته شده، معادلات تحلیلی آنها در دستگاه مختصات استوانه به صورت زیر ارائه می‌گردد [۱۷].

$$r \sin \alpha \sin(\theta - (\psi_A + \omega t)) + \quad (1)$$

$$\text{صفحه A: } (L/2 - z) \cos \alpha - w/2 = 0$$

$$r \sin \alpha \sin(\theta - (\psi_A + \omega t)) + \quad (2)$$

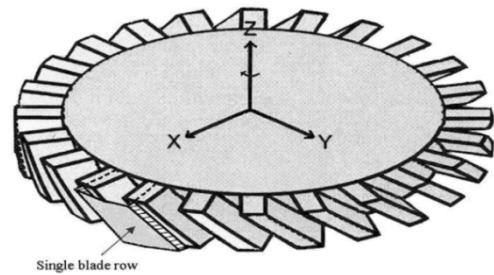
$$\text{صفحه B: } (L/2 - z) \cos \alpha - w/2 = 0$$

که در آن  $\psi_B - \psi_A = \frac{2\pi}{N}$  زاویه بین محور تقارن دو پره مجاور،  $\alpha$  زاویه نصب پره،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای پره،  $N$  تعداد پره و در نهایت  $w$  ضخامت پره می‌باشد. همچنین برای به دست آوردن معادلات تحلیلی مرزهای تناوبی کفیسست در روابط ۱ و ۲ ضخامت پره برابر صفر قرار داده شود.

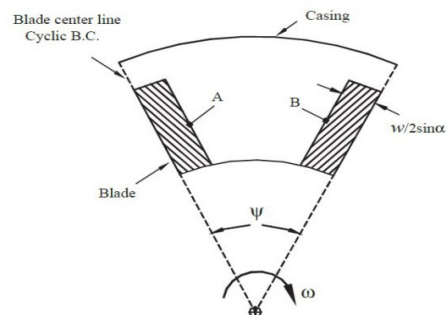
### ۲-۱-۲- میدان محاسباتی و پارامترهای هندسی

در این مقاله همان‌طور که در شکل ۱ بخش الف مشاهده می‌شود میدان محاسباتی برای روتور و استاتور به صورت مشابه و در کانال‌هایی که از نصف ضخامت یک پره تا نصف ضخامت پره مجاور می‌باشد، تعریف می‌گردد. همچنین در بخش ب شکل ۱، مرزهای میدان محاسباتی شامل مرزهای صلب (پره‌ها، پوسته و محور پمپ)، مرزهای تناوبی و مرزهای ورودی و خروجی ردیف تیغه‌ها نشان داده شده است.

(الف)



(ب)



شکل ۱- میدان محاسباتی بین دو پره مجاور (الف) یک ردیف

روتور [۱۸] (ب) مرزهای میدان [۱۷]

در شکل ۲ نمای برش خورده از یک طبقه پمپ توربومولکولار شامل روتور و استاتور نشان داده شده است. در این شکل  $h$  فاصله شعاعی بین ریشه تا نوک پره،  $D$  قطر روتور،  $b$  وتر پره، و به ترتیب فاصله بین دو پره مجاور در ریشه و نوک،  $w$  ضخامت پره، زاویه نصب پره،  $c$  و  $g$  به ترتیب لقی بین نوک پره با پوسته و فاصله بین ردیف روتور با استاتور و  $L$  برابر طول پره می‌باشد.

#### ۴-۱-۲- معادلات مکان و سرعت مولکول

در روش مونت کارلو هر مولکول به صورت یک ذره با سرعت مشخص در نظر گرفته می شود که در مسیر مستقیم حرکت می کند. در نتیجه معادلات مکان مولکول همان معادلات حرکت مستقیم الخط یک ذره در دستگاه مختصات استوانه می باشد که در زیر ارائه شده است [۱۷].

$$r(t) = \sqrt{(v_{r_0}^2 + v_{\theta_0}^2)t^2 + 2r_0v_{r_0}t + r_0^2}$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \tan^{-1} \left[ \frac{(v_{r_0}^2 + v_{\theta_0}^2)t + r_0v_{r_0}}{r_0v_{\theta_0}} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{v_{r_0}}{v_{\theta_0}} \right] \quad (3)$$

$$z(t) = z_0 + v_{z_0}t$$

که در آن  $(r_0, \theta_0, z_0)$  مولفه های مکان اولیه و  $(v_{r_0}, v_{\theta_0}, v_{z_0})$  مولفه های سرعت اولیه مولکول می باشد. با مشتق گیری از معادله ۳ نسبت به زمان، مولفه های سرعت مولکول به دست می آید.

$$v_r(t) = \left[ (v_{r_0}^2 + v_{\theta_0}^2)t + r_0v_{r_0} \right] / r(t)$$

$$v_{\theta}(t) = r_0v_{\theta_0} / r(t) \quad (4)$$

$$v_z(t) = v_{z_0}$$

برای مختصات اولیه مکان مولکول و با فرض توزیع یکنواخت مولکول در ورودی روتور معادلات بر حسب عدد تصادفی به صورت زیر ارائه می گردد [۱۷].

$$r_0 = \sqrt{R_1^2 + R_f(R_2^2 - R_1^2)}$$

$$\theta_0 = \xi_A + R_f(\xi_B - \xi_A) \quad (5)$$

$$z_{0 \text{ Rotor}} = 0$$

که در آن  $R_f$  دنباله اعداد تصادفی،  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب شعاع محور و شعاع پوسته پمپ و  $\xi_A$  و  $\xi_B$  زاویه ای است که از حل معادله پره A و B برای زمان صفر در  $r = r_0$  و  $z = z_0$  بدست می آید. برای ورود مولکول به ردیف استاتور به طریق مشابه عمل می شود با این تفاوت که  $z_{0 \text{ stator}} = 2L + g$  است. همچنین سرعت اولیه مولکول (بی بعد نسبت به محتمل ترین سرعت مولکول) از روابط زیر محاسبه می شود [۱۷].

$$v_{r_0} = \rho \cos \varphi$$

$$v_{\theta_0} = \rho \sin \varphi \quad (6)$$

$$v_{z_0} = \sqrt{-\ln R_f}$$

که در آن از تابع سرعت مولکولی به دست می آید.

$$\rho = \sqrt{-\ln R_f} \quad \varphi = 2\pi R_f \quad (7)$$

۴-۱-۲-۵- محاسبه زمان برخورد مولکول با مرزهای میدان محاسباتی

زمان برخورد مولکول با مرزهای میدان محاسباتی بر حسب محاسبه صریح و غیر صریح به دو دسته زیر تقسیم می شود:

- ۱- دسته اول شامل زمان برخورد با مرزهای ورودی، خروجی، محور روتور، پوسته و نوک پره که با توجه به معادلات تحلیلی و به صورت صریح محاسبه می شود.
- ۲- دسته دوم شامل زمان برخورد با پره ها و مرزهای

در نهایت انتهای بازه باید از زمان برخورد با مرزهای دسته اول و به منظور تعریف شده بودن تابع معکوس سینوس در بازه انتخابی کمتر باشد.

$$t_{f_A} = \min(t_{s_A}, t_{axis}, t_{shell}, t_{tip}, t_{inlet}, t_{exit}) \quad (10)$$

پس از مشخص شدن انتهای بازه و با در نظر گرفتن برای ابتدای بازه زمان برخورد مولکول با پره A به دست می آید.

$$t_{b_A} \in [t_i, t_{f_A}] \quad (11)$$

برای پره مجاور و مرزهای تناوبی نیز مشابه معادلات ۸ تا ۱۱ محاسبات مربوط به زمان برخورد مولکول با آنها انجام شده و در نهایت زمان نهایی که برابر کمترین زمان محاسبه شده خواهد بود (به غیر از زمان برخورد با نوک پره)، به دست می آید. لازم به ذکر است که انعکاس مولکول از سطوح صلب میدان به صورت پخش و با تطبیق دمایی فرض شده است.

## ۲-۲- شبیه سازی رفتار مولکول در بین طبقات

### پمپ

در ابتدا توزیع مولکول در ورود به طبقات پمپ توضیح داده می شود سپس رفتار مولکول در بین طبقات با در نظر گرفتن اثر مولکول های بازگشتی از طبقه قبل و بعد به طبقه مورد مطالعه، بررسی خواهد شد.

### ۲-۲-۱- توزیع مولکول در ورود به طبقات پمپ

در این شبیه سازی مولکول ها با توزیع نرمال وارد ردیف اول پمپ می شوند اما برای طبقات بعدی مولکول ها با توزیع خروجی طبقه قبل وارد طبقه جدید خواهند شد که مراحل آن به شرح زیر می باشد:

مرحله ۱: ابتدا مولفه های مکان، سرعت و زمان مولکول در خروج از طبقه n ام در بردار K قرار داده می شود. سپس به ازای هر مولکول نمونه یک بردار K تشکیل داده و

تناوبی که با استفاده از روش های موجود در محاسبات عددی به دست خواهد آمد. یکی از روش های مورد استفاده در به دست آوردن ریشه معادلات، روش دوبخشی (تصنیف) می باشد.

در این مقاله اصلاح زمان برخورد مولکول با پرها و مرزهای تناوبی نسبت به کارهای گذشته، از طریق اصلاح زمان انتهای بازه مورد استفاده در روش دوبخشی انجام شده است؛ به این ترتیب که پس از مشخص شدن ابتدا و انتهای بازه، لازم است تا تابع در بازه مذکور تعریف شده باشد؛ بنابراین باید معادلات تحلیلی پره و مرزهای تناوبی نسبت به زمان حل شود (معادله ۸). زمان به دست آمده باید از زمان برخورد مولکول با مرزهای دسته اول (که در ابتدا و به صورت صریح محاسبه شده اند) کم تر باشد در غیر این صورت مولکول ابتدا به مرزهای دسته اول برخورد داشته و نیازی به محاسبه زمان برخورد جدید نمی باشد. برای نمونه در زیر معادلات مربوط به محاسبه زمان برخورد با پره A ارائه می گردد.

$$\left| \frac{w/2 + (z(t_{s_A}) - L/2) \cos \alpha}{r(t_{s_A}) \sin \alpha} \right| = 1$$

$$m_1 = (v_{r_0}^2 + v_{\theta_0}^2) \cdot (\tan \alpha)^2 - v_{z_0}^2$$

$$m_2 = r_0 v_{r_0} (\tan \alpha)^2 - (v_{z_0} \sec \alpha) \cdot w/2 + v_{z_0} (L/2 - z_0) + 0.5 \quad (8)$$

$$m_3 = r_0^2 (\tan \alpha)^2 - (w/2 - (L/2 - z_0) \cos \alpha)^2 \cdot (\sec \alpha)^2$$

که در آن زمانی است که تابع معکوس سینوس در بازه مورد نظر تعریف شده می باشد و از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$t_{s_A} = \frac{-m_2 \pm \sqrt{m_2^2 - m_1 m_3}}{m_1} \quad (9)$$

در نهایت همه در بردار  $P$  ذخیره می‌شود.

$$K = [r, \theta, z, v_r, v_\theta, v_z, t] \quad (12)$$

$$P = [K_1, K_2, \dots, K_{N_{sm}}]^T$$

مرحله ۲: از بین اعداد ۱ تا  $N_{sm}$  که برابر تعداد کل مولکول‌های نمونه می‌باشد یک عدد ( $m$ ) به تصادف انتخاب می‌شود. مختصات مکان و سرعت مولکول و همچنین موقعیت پره‌ها در ورود به طبقه بعد با توجه به سطر  $m$  ماتریس  $P$  مشخص می‌شود.

مرحله ۳: مرحله قبل آن قدر تکرار می‌شود تا تعداد مولکول‌های خروجی به تعداد موردنظر برسد.

در نهایت مراحل بالا برای طبقات اول تا یکی مانده به آخر انجام می‌شود.

### ۲-۲-۲- مدل‌سازی رفتار مولکول در بین طبقات با در نظر گرفتن اثر مولکول‌های بازگشتی

برای مدل‌سازی رفتار مولکول در بین طبقات با در نظر گرفتن اثر مولکول‌های بازگشتی از طبقات بعدی ابتدا لازم است تا یک‌بار تمام طبقات بدون در نظر گرفتن مولکول‌های بازگشتی و فقط با توزیع خروجی طبقه قبل، شبیه‌سازی شوند. پس از تکرار اول، توزیع مولکول‌ها در خروج از طبقات به دست می‌آید. در تکرار دوم با در نظر گرفتن توزیع خروجی مولکول از طبقه قبل و توزیع مولکول بازگشتی از طبقه بعد که از تکرار قبلی به دست آمده است می‌توان طبقه موردنظر را شبیه‌سازی کرد. با این توضیح اگر تعداد مولکول در ورود به طبقه اول ( $b_1$ ) ثابت در نظر گرفته شود، برای تعداد مولکول‌های ورودی به طبقات بعد از روابط زیر استفاده می‌شود.

$$m_i^1 = \tau_{i-1}^1 \cdot m_{i-1}^1, \quad i = 2, 3, \dots, n+1 \quad (13)$$

$$m_1^a = b_1, \quad a = 1, 2, \dots$$

$$m_i^a = (m_{i-1}^a + m_i^{a-1}(1 - \tau_i^{a-1})) \tau_i^a \quad (14)$$

$$m_n^a = \tau_{n-1}^a \cdot m_{n-1}^a$$

که در رابطه ۱۴،  $i = 2, 3, \dots, n$  و  $a = 2, 3, \dots$  می‌باشد. لازم به ذکر است در روابط بالا بیانگر شماره تکرار و  $i$  بیانگر شماره طبقه مورد مطالعه و  $n$  تعداد طبقات پمپ می‌باشد. همچنین به ترتیب ضریب انتقال از بالادست به پایین دست طبقه  $i$  ام، تعداد مولکول‌های ورودی به طبقه  $i$  ام و تعداد مولکول‌های خروجی از طبقه  $n$  ام می‌باشد. برای رفتار مولکول در مسیر برگشت بطور مشابه عمل خواهد شد. در نهایت روابط زیر برای محاسبه ضرایب عبوردهی ارائه می‌گردد.

$$\sum_{12} = \frac{m_{n+1}}{m_1}, \quad \sum_{21} = \frac{m_1}{m_{n+1}} \quad (15)$$

### ۳- ملاحظات طراحی پمپ توربومولکولار چندطبقه

از آنجا که در این مقاله، مطالعه اثر زاویه پره بر پارامترهای عملکردی پمپ توربومولکولار مدنظر می‌باشد لذا تنها به ارائه پارامترهای هندسی که با تغییر زاویه پره تغییر می‌کنند پرداخته خواهد شد و پارامترهایی نظیر ضخامت پره، فاصله شعاعی پره، قطر روتور، لقی بین نوک پره با پوسته و فاصله بین ردیف روتور-استاتور که در آنها تغییر زاویه پره اثر کمی دارد و یا بی‌تأثیر است، ثابت در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب پس از مشخص کردن ارتفاع پره  $L$  با توجه به زاویه طبقه موردنظر، طول وتر پره‌ها  $b$  مشخص می‌شود.

$$\sum_{12} = \frac{m_{n+1}}{m_1}, \quad \sum_{21} = \frac{m_1}{m_{n+1}} \quad (16)$$

سپس نسبت فاصله متوسط پره به وتر تعیین می‌شود. در این مقاله این نسبت تقریباً ۱ در نظر گرفته شده است. اکنون با داشتن فاصله شعاعی پره  $h$ ، قطر روتور  $D$



$$Q_{\max} = W_{\max} \left( \frac{A_p}{b^2} \right) \quad (21)$$

$$A_p = \pi(c+h)(D+c-h) - \frac{Nwh}{\sin \alpha}$$

که در آن مساحت سطح ورودی ناحیه محاسباتی می‌باشد. برای سرعت پره، از سرعت در شعاع میانگین استفاده می‌شود که در آن محتمل‌ترین سرعت مولکول،  $R$  ثابت گاز و  $T$  دما برحسب کلوین می‌باشد [۲۶].

$$U_b = \frac{\omega(D-h)}{2\sqrt{2RT}} \quad (22)$$

در جدول ۱ پارامترهای هندسی پمپ ۱۳ طبقه ارائه شده است در این پمپ طبقات ۱ تا ۵ با زاویه ۳۰ درجه و طبقات بعدی با زاویه ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات هندسی استاتور در طبقه ۵ مشابه مشخصات هندسی طبقه ۶ می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات هندسی پره در پمپ ۱۳ طبقه [۸]

مشخصات هندسی پره	نماد	طبقات	طبقات ۶
تعداد پره		۵ تا ۱	۱۳ تا
وتر	(mm)	۷۶	۵۲
زاویه	$\alpha$ (°)	۸	۱۱/۷
شعاع ریشه	(mm)	۳۰	۲۰
شعاع نوک	(mm)	۶/۹۲	۱۰/۱۱
ضخامت	(mm)	۹/۴	۱۳/۷۴
فاصله شعاعی پره	(mm)	۱/۵	۱/۵
قطر روتور	(mm)	۳۰	۳۰
لقی بین پره و پوسته	(mm)	۳۰۰	۳۰۰
فاصله بین ردیف روتور استاتور	(mm)	۱	۱

در شکل ۳ تغییرات حداکثر نسبت تراکم برحسب سرعت در شعاع متوسط پره برای پمپ ۱۳ طبقه نشان داده شده است. در این نمودار، کار حاضر با کارهای قبلی (ساوادا [۸] و آملی و همکاران [۱۷]) و داده‌های تجربی مربوط به گاز نیتروژن (نقاط دایره‌ای) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تا سرعت ۰/۲، کار حاضر

و ضخامت پره  $W$ ، تعداد پره ها  $N$  از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$N = \frac{\pi(D-h)}{S+w \cdot \csc \alpha} \quad (17)$$

در نهایت برای فاصله دو پره مجاور در ریشه و نوک روابط زیر ارائه می‌گردد.

$$s_r = \frac{\pi(D-2h)}{N} - \frac{w}{\sin \alpha} \quad (18)$$

$$s_t = \frac{(D)}{N} - \frac{w}{\sin} \quad (19)$$

#### ۴- صحت‌سنجی

در این بخش الگوریتم حاضر برای یک پمپ چندطبقه با داده‌های تجربی ساوادا [۸] و کارهای قبلی (آملی و همکاران [۱۷]) مقایسه می‌شود. برای این کار یک پمپ ۱۳ طبقه شامل ۲۵ ردیف روتور و استاتور، به نحوی که ردیف اول و آخر آن روتور باشد طراحی شده است؛ همچنین فشار خروجی ثابت (۷۶/۱) پاسکال معادل ۰/۱۰ میلی‌بار) و گاز مورد آزمایش نیتروژن در نظر گرفته شده است. در ابتدا برای درک بهتر نتایج، پارامترهای عملکردی پمپ توربومولکولار شامل نسبت تراکم، ضریب عبوردهی  $\Sigma$ ، سرعت پمپاژ بی‌بعدشده  $W$  و دبی بی‌بعد ارائه می‌گردد [۱۷].

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{s_1}{s_2} \left( \frac{\Sigma_{12} - W}{\Sigma_{21}} \right) \quad (20)$$

که در آن  $P$  فشار،  $s$  سطح مقطع ورودی جریان،  $W$  سرعت پمپاژ بی‌بعد،  $\Sigma$  ضریب عبوردهی بوده و اندیس ۱ مربوط به بالادست جریان و اندیس ۲ مربوط به پایین دست جریان می‌باشد.

برای محاسبه حداکثر دبی با توجه به سرعت پمپاژ بی‌بعد، مساحت سطح ورودی و وتر پره از روابط زیر استفاده می‌شود [۲۶].

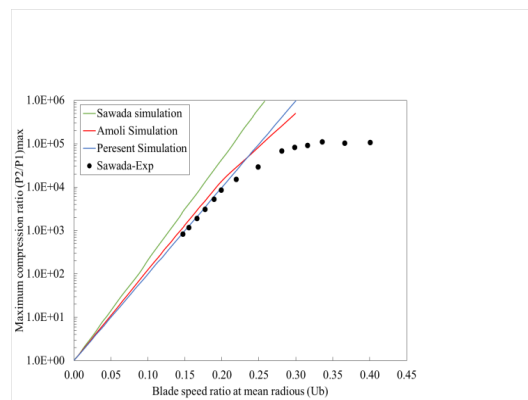
جدول ۲- مقایسه نسبت فشار کار حاضر با کار آملی [۱۷] و

داده‌های تجربی [۸] در سرعت ۰/۲				
داده تجربی	کار حاضر	خطا	کار آملی	خطا
۸۵۱۶	۹۳۶۰	٪۱۰	۱۳۳۱۷	٪۵۶

## ۵- مطالعه اثر زاویه پره در طبقات میانی و پایانی و تفسیر نتایج

با عنایت به اینکه در طبقات میانی و پایانی پمپ‌های توربومولکولار چندطبقه به طور عمده از زاویه ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درجه استفاده می‌شود، لازم است تا اثر این سه زاویه بر پارامترهای عملکردی پمپ مورد بررسی قرار گیرد و بهترین زاویه مشخص گردد. بدین منظور برای بررسی اثر زاویه پره در طبقات میانی و پایانی پمپ، چهار ترکیب مختلف از سه زاویه مذکور برای یک پمپ توربومولکولار پنج طبقه ارائه شده است. از آنجا که تغییر زاویه پره تأثیری بر پارامترهای هندسی آن مانند ضخامت پره، فاصله شعاعی پره، قطر روتور، لقی بین نوک پره با پوسته و فاصله بین ردیف روتور - استاتور ندارد و یا قابل چشم‌پوشی است، در هر چهار ترکیب حاضر پارامترهای اشاره شده برای تمام طبقات یکسان و مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل آنکه این مقاله بر روی اثر تغییر زاویه در طبقات میانی و پایانی پمپ توربومولکولار متمرکز است؛ بنابراین طبقات اول و دوم هر چهار ترکیب مشابه هم بوده و دارای زاویه ۳۰ درجه است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود برای طبقات ۳، ۴ و ۵ (طبقه میانی و پایانی پمپ پنج طبقه) در سه ترکیب تنها یک زاویه استفاده شده است بدین ترتیب که در ترکیب ۱ (ترکیب مرجع) زاویه ۲۰، ترکیب ۲ زاویه ۱۵ و در ترکیب ۳ زاویه ۱۰ درجه استفاده شده است. همچنین در جدول ۴ برای ترکیب چهارم از سه زاویه ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درجه به ترتیب در طبقات ۳، ۴ و ۵ استفاده شده است تا اثر استفاده از ترکیبی از زوایا در مقایسه با استفاده از تنها یک زاویه نیز مطالعه شود. همچنین فشار در پایین دست

که در آن زمان برخورد مولکول با پره و مرزهای تناوبی، در طبقات اصلاح و اثر مولکول‌های بازگشتی از طبقات قبل و بعد در ورود به طبقه موردنظر لحاظ گردیده است نسبت به کارهای قبلی تطابق بیشتری با داده‌های تجربی دارد. همچنین از سرعت ۰/۲ به بعد داده‌های تجربی به نسبت فشار صدهزار میل می‌کند که به دلیل محدودیت شرایط آزمایشگاهی برای نسبت فشار نهایی، به ازای سرعت‌های بیشتر از ۰/۲ می‌باشد؛ بنابراین به دلیل اینکه در شبیه‌سازی اساساً محدودیت‌های آزمایشگاهی وجود ندارد می‌توان گفت روند نمودار در سرعت‌های بیشتر از ۰/۲ نیز صعودی بوده و شکستگی در نمودار مربوط به آملی و همکاران توجیه علمی ندارد. لازم به ذکر است پمپ ۱۳ طبقه طراحی شده در سرعت ۰/۲ (معادل سرعت در شعاع متوسط ۵۸۵۰ دور در دقیقه) فشار ۱۰<sup>-۶</sup> میلی‌بار (خلا بالا) را ایجاد می‌کند.

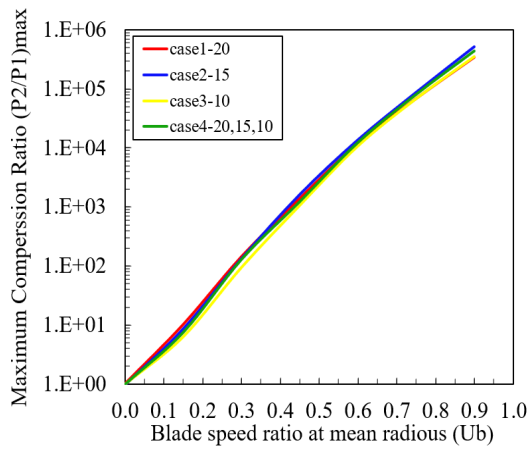


شکل ۳- تغییرات حداکثر نسبت تراکم بر حسب سرعت در شعاع

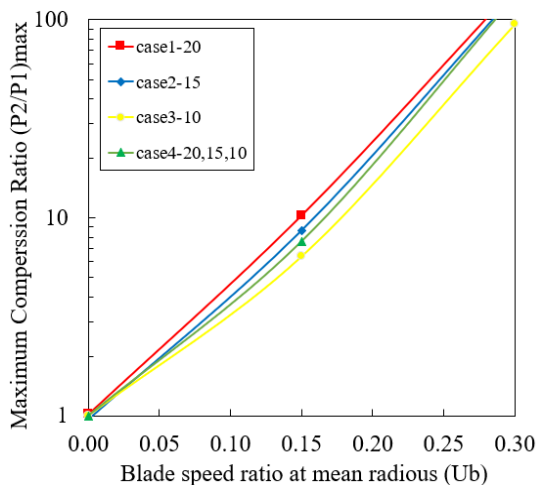
### متوسط پره در پمپ ۱۳ طبقه

در جدول ۲ اختلاف کار حاضر و کار آملی در سرعت ۰/۲ با داده‌های تجربی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای کار حاضر به میزان ۴۶٪ کمتر از کار آملی و همکاران می‌باشد. این مقایسه به خوبی اهمیت اصلاح زمان برخورد مولکول با پره‌ها و تأثیر مولکول‌های بازگشتی از طبقات را در شبیه‌سازی پمپ‌های توربومولکولار چندطبقه نشان می‌دهد.

نزدیک شدن به ترکیب مرجع می‌باشند به طوری که در شکل ۶ ترکیب ۲ با زاویه ۱۵ درجه از ترکیب مرجع پیشی گرفته و ترکیب ۴ در انتهای نمودار به ترکیب مرجع رسیده است. در شکل ۷ نمودار ترکیب مرجع با زاویه ۲۰ درجه کمترین نسبت تراکم را داشته‌است؛ بنابراین از بحث بالا می‌توان نتیجه گرفت زوایای بزرگ در طبقات میانی و پایانی پمپ توربومولکولار بخصوص در سرعت های بالا باعث کاهش نسبت تراکم نهایی پمپ خواهد شد. از طرفی زاویه ۱۰ درجه نیز از نسبت تراکم پایینی برخوردار است؛ بنابراین در پمپ‌های توربومولکولار برای دستیابی به حداکثر نسبت تراکم استفاده بیشتر از زاویه ۱۵ درجه در مقایسه با زوایای ۲۰ و ۱۰ درجه توصیه می‌شود.



شکل ۴- تغییرات حداکثر نسبت تراکم برحسب سرعت در شعاع متوسط پره



شکل ۵- تغییرات حداکثر نسبت تراکم برحسب سرعت در بازه ۰ تا

ثابت ( $P_2 = 0.01 \text{ mbar}$ ) و گاز مورد آزمایش نیتروژن در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- مشخصات هندسی طبقات ۳ و ۴ در ترکیبات ۲، ۱ و ۳

مشخصات هندسی پره	ترکیب ۱	ترکیب ۲	ترکیب ۳
N	۵۲	۳۹	۲۶
b(mm)	۱۱/۷	۱۵/۴۵	۲۳/۰۴
$\alpha(^{\circ})$	۲۰	۱۵	۱۰
(mm)	۱۰/۱۱	۱۳/۵۴	۲۰/۳۶
(mm)	۱۳/۷۴	۱۸/۳۷	۲۷/۶۱

جدول ۴- مشخصات هندسی طبقات ۳ و ۴، ۳ و ۵ در ترکیب ۴

مشخصات هندسی پره	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵
N	۵۲	۳۹	۲۶
(mm)	۱۱/۷	۱۵/۴۵	۲۳/۰۴
( $^{\circ}$ )	۲۰	۱۵	۱۰
(mm)	۱۰/۱۱	۱۳/۵۴	۲۰/۳۶
(mm)	۱۳/۷۴	۱۸/۳۷	۲۷/۶۱

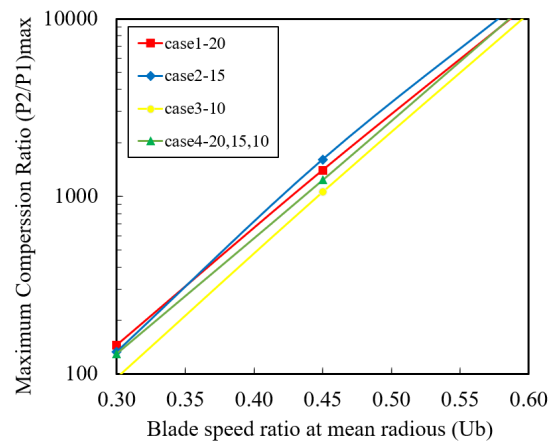
در شکل ۴ تغییرات حداکثر نسبت تراکم برای ترکیبات ۲، ۳ و ۴ در مقایسه با ترکیب مرجع برحسب سرعت در شعاع متوسط پره نشان داده شده است به طوری که محور عمودی به صورت لگاریتمی ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود حداکثر نسبت تراکم با افزایش سرعت پره افزایش یافته و می‌توان گفت که یکی از راهکارهای دستیابی به خلا بالاتر در پمپ توربومولکولار افزایش سرعت پره‌هاست؛ اما تعقر نمودار در سرعت حدود ۰،۳ تغییر کرده و شیب نمودار رفته رفته با افزایش سرعت پره‌ها کم می‌شود. از مشاهدات بالا می‌توان نتیجه گرفت که در افزایش نسبت تراکم از طریق بالابردن سرعت پره‌ها محدودیت وجود داشته و از یک سرعت مشخص به بعد دیگر افزایش سرعت، تاثیری در افزایش نسبت تراکم پمپ نخواهد داشت. در ادامه برای ارائه جزئیات بیشتر، شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده‌است. در شکل ۵ ترکیب مرجع بالاترین نسبت تراکم و ترکیب ۳ با زاویه ۱۰ درجه کمترین نسبت تراکم را داشته است. همچنین ترکیب ۲ و ۴ در حال

مرجع بوده است. بادقت در سرعت رشد حداکثر نسبت تراکم برای ترکیبات ارائه شده می‌توان دریافت که افزایش نسبت تراکم در ترکیب ۴ که در آن از زوایای مختلف استفاده شده است نسبت به ترکیب‌های ۱ و ۳ که در آنها فقط از یک زاویه استفاده شده است، بیشتر می‌باشد و در جایگاه دوم پس از ترکیب ۲ با زاویه ۱۵ درجه قرار دارد؛ همچنین استفاده از ترکیب زوایا در مقایسه با استفاده از یک زاویه اثر کاهشی نسبت تراکم زوایای بزرگ و کوچک (زاویه ۲۰ و ۱۰ درجه) در سرعت‌های بالا را کاهش داده و تقریباً از بین برده است به طوری که در ترکیب ۴ با اینکه از زاویه ۲۰ و ۱۰ درجه استفاده شده است اما نسبت تراکم آن به اندازه استفاده از زاویه ۲۰ و ۱۰ درجه به تنهایی، کاهش نیافته است. بنابراین استفاده از زوایای مختلف در پمپ توربومولکولار چندطبقه، در دستیابی سریع‌تر به شرایط خلا بالا و فوق بالا کمک خواهد کرد و اثر نامطلوب زوایای بزرگ و کوچک در سرعت‌های بالای پره که ممکن است طراحان به دلایلی مانند محدودیت‌های طراحی و... ناگزیر به استفاده از آنها شوند را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است فشار نهایی پمپ پنج طبقه در ترکیب شماره ۲ در سرعت زاویه‌ای (برحسب شعاع متوسط پره)  $26330$  دور در دقیقه برابر  $10^{-1} \times 9$  میلی‌بار می‌باشد.

سرعت پره	۱۵/۰	۴۵/۰	۹/۰
ترکیب ۱	۱۰	۱۴۰۲	۳۴۶۱۳۵
ترکیب ۲	۹	۱۶۱۵	۵۱۶۷۴۹
ترکیب ۳	۶	۱۰۵۶	۳۴۹۳۷۴
ترکیب ۴	۸	۱۲۳۵	۴۴۱۹۶۱

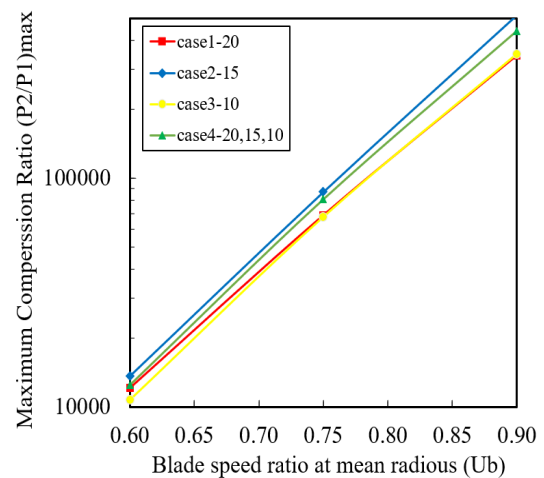
جدول ۶- درصد تغییرات حداکثر نسبت تراکم ترکیبات ۱، ۲ و ۳

سرعت پره	۱۵/۰	۴۵/۰	۹/۰
ترکیب ۲	-۱۶/۵	۱۵/۲	۴۹/۳
ترکیب ۳	-۳۸/۱	-۲۴/۷	۰/۹
ترکیب ۴	-۲۶/۳	-۱۱/۹	۲۷/۷



شکل ۶- تغییرات حداکثر نسبت تراکم بر حسب سرعت در بازه ۰,۳

تا ۰,۶



شکل ۷- تغییرات حداکثر نسبت تراکم بر حسب سرعت در بازه ۰,۶

تا ۰,۹

همان‌طور که اشاره شد سرعت رشد ترکیب ۴ که در آن از زوایای ۲۰، ۱۵ و ۱۰ استفاده شده است قابل توجه بوده و لازم است تا در این مورد مطالعه بیشتری صورت پذیرد به همین دلیل در جدول ۵ حداکثر نسبت تراکم چهار ترکیب مورد مطالعه در سه سرعت ۰,۱۵، ۰,۴۵ و ۰,۹ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۶ درصد تغییرات نسبت تراکم ترکیبات ۱، ۲ و ۳ نسبت به ترکیب مرجع آورده شده است. بدین ترتیب که به عنوان نمونه برای ترکیب ۲ در سرعت ۰,۱۵، نسبت تراکم به دست آمده به اندازه ۱۶,۵ درصد کمتر از نسبت تراکم ترکیب مرجع بوده و در سرعت ۰,۴۵ به اندازه ۱۵,۲ درصد بیشتر از نسبت تراکم ترکیب

(۱) با در نظر گرفتن اثر مولکول‌های بازگشتی از سایر طبقات خطای کار حاضر نسبت به کارهای قبلی از ۵۶٪ به ۱۰٪ کاهش پیدا کرد.

(۲) در طراحی پمپ‌های توربومولکولار چندطبقه، ضمن رعایت ملاحظات طراحی لازم است تا در طبقات میانی و پایانی پمپ از زوایای مختلف در مقایسه با به‌کارگیری فقط یک زاویه، استفاده شود.

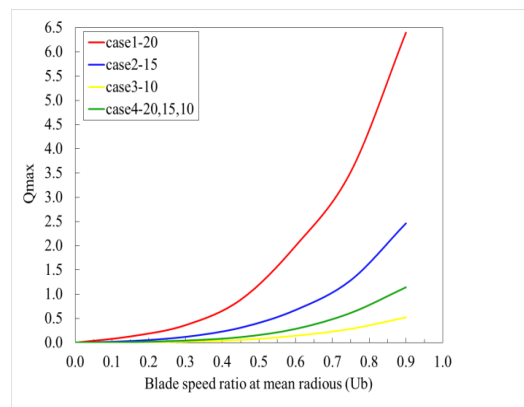
(۳) در طبقات میانی و پایانی پمپ توربومولکولار در بین زوایای ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درجه، زاویه ۱۵ درجه بالاترین نسبت تراکم را داشته و استفاده بیشتر از آن در طبقات مذکور توصیه می‌شود. همچنین در خصوص زاویه ۱۰ درجه به دلیل پایین بودن نسبت تراکم و دبی، استفاده کمتر از این زاویه پیشنهاد می‌گردد.

## ۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

$r$	مؤلفه شعاعی مکان مولکول، mm
$z$	مؤلفه محوری مکان مولکول، mm
$N_{sm}$	تعداد مولکول نمونه
$N$	تعداد پره
$P$	فشار، Pa
$W$	سرعت پمپاژ بی‌بعد
$w$	ضخامت پره، mm
$L$	طول پره، mm
$Q$	دبی بی‌بعد
$A_m$	مساحت سطح ورودی ناحیه محاسباتی،
$C_{mp}$	محتمل‌ترین سرعت مولکول، J/mol
$U_b$	نسبت سرعت
$R$	ثابت گاز، J/K.mol
$T$	دما، K
$R_f$	دنباله اعداد تصادفی
$R_1$	شعاع محور، mm
$R_2$	شعاع پوسته، mm

در شکل ۷ تغییرات حداکثر دبی بی‌بعد بر حسب سرعت در شعاع متوسط پره برای چهار ترکیب مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رشد دبی با افزایش سرعت پره برای ترکیب شماره ۱ با زاویه ۲۰ درجه بیشترین مقدار را نسبت به سایر ترکیب‌ها دارد. همچنین ترکیب ۴ دبی عبوری بالاتری را نسبت به ترکیب ۳ دارد. با توجه به آنکه ترکیب شماره ۳ کمترین دبی عبوری را دارد و همان‌طور که در بخش قبل مشاهده شد، نسبت تراکم آن نیز پایین می‌باشد؛ بنابراین استفاده از پره با زاویه ۱۰ درجه در طبقات میانی و پایانی پمپ‌های توربومولکولار چندطبقه توصیه نمی‌شود.



شکل ۸- تغییرات حداکثر دبی بی‌بعد بر حسب سرعت در شعاع

متوسط پره برای ترکیبات ۱ تا ۴

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار مولکول در جریان آزاد مولکولی در فضای بین طبقات پمپ توربومولکولار با در نظر گرفتن مولکول‌های بازگشتی از سایر طبقات به روش ذره نمونه مونت کارلو و با در نظر گرفتن هندسه واقعی پره‌ها شبیه‌سازی شده است. سپس ملاحظات طراحی پمپ‌های توربومولکولار چند طبقه ارائه گردید. در ادامه تأثیر زاویه پره بر پارامترهای عملکردی پمپ توربومولکولار در طبقات میانی و پایانی برای زوایای ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درجه با ثابت در نظر گرفتن زاویه پره‌ها در دو طبقه اول، بررسی شد. در نهایت نتایج حاصل از این مقاله به شرح زیر ارائه می‌گردد:

علائم یونانی

$\theta$	مؤلفه دورانی مکان مولکول، rad
$\alpha$	زاویه نصب پره، rad
$\psi$	زاویه محور تقارن پره در دستگاه مرجع، rad
$\omega$	سرعت زاویه‌ای پره، rad/s
$\rho$	مؤلفه تابع توزیع سرعت مولکولی
$\varphi$	مؤلفه تابع توزیع سرعت مولکولی
$\xi$	زاویه پره در لحظه صفر، rad
$\Sigma$	ضریب انتقال مولکولی

زیرنویس

۰	موقعیت اولیه
۱	ورودی یا بالادست جریان
۲	خروجی یا پایین‌دست جریان
۱۲	بالادست جریان به پایین‌دست
$i$	شماره طبقه

بالانویس

$a$	شماره تکرار
-----	-------------

مراجع

- in the transition and slip flow regimes,” *Bull. JSME*, vol. 22, no. 165, pp. 362–369, 1979.
- [10] S. Iida and O. Kimura, “On performance improvement of axial-flow molecular pump,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 13, no. S1, p. 9, 1974.
- [11] S. Katsimichas, A. J. H. Goddard, R. Lewington, and C. R. E. De Oliveira, “General geometry calculations of one-stage molecular flow transmission probabilities for turbomolecular pumps,” *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 13, no. 6, pp. 2954–2961, 1995.
- [12] T. N. Schneider, S. Katsimichas, C. R. E. De Oliveira, and A. J. H. Goddard, “Empirical and numerical calculations in two dimensions for predicting the performance of a single stage turbomolecular pump,” *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 16, no. 1, pp. 175–180, 1998.
- [13] R.-Y. Jou, H.-P. Cheng, Y.-W. Chang, F.-Z. Chen, and M. Iwane, “Designs, analyses, and tests of a spiral-grooved turbobooster pump,” *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 18, no. 3, pp. 1016–1024, 2000.
- [14] J.-S. Heo and Y.-K. Hwang, “DSMC calculations of blade rows of a turbomolecular pump in the molecular and transition flow regions,” *Vacuum*, vol. 56, no. 2, pp. 133–142, 2000.
- [15] P. A. Skovorodko, “The Topology of Molecular Flow in Axial Compressor,” *AVS 47th Int. Symp*, 2000.
- [16] Y.-W. Chang and R.-Y. Jou, “Direct simulation of pumping characteristics in a fully 3D model of a single-stage turbomolecular pump,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 169, pp. 772–776, 2001.
- [17] A. Amoli, R. Ebrahimi, and S. M. Hosseinalipour, “Some features of molecular flow in a rotor-stator row with real topology,” *Vacuum*, vol. 72, no. 4, pp. 427–438, 2004, doi: 10.1016/j.vacuum.2003.10.002.
- [18] S. Wang *et al.*, “Numerical study of a single blade row in turbomolecular pump,” *Vacuum*, vol. 83, no. 8, pp. 1106–1117, 2009.
- [19] H. Shkohmand, S. M. Tagvi, and N. Pirzai Khabazi, “Investigating the effect of thermal imbalance and thermal adaptation coefficient on axial turbomolecular pump performance,” *15th Iran International Conference on Mechanical Engineering (ISME2007)*. pp. 1–8, 2007. (In Persian)
- [20] R. Versluis, R. Dorsman, L. Thielen, and M. E. Roos, “Numerical investigation of turbomolecular pumps using the direct simulation Monte Carlo method with moving surfaces,” *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 27, no. 3, pp. 543–547, 2009.
- [21] M. Shams, H. Sheykhzadeh, and M. Taghavi, “Mathematical simulation of free molecular flow in a three-dimensional turbomolecular pump with nonparallel blades,” *J. Dispers. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 299–306, 2010.
- [22] M. Mastiani, A. Sohrabi Kashani, N. Pourmahmoud, and N. E. Yousefian Abroudi, “investigation of turbomolecular pump performance using direct Monte Carlo simulation method,” *19th International Conference on Mechanical Engineering of Iran (ISME2011)*. 2011. (In Persian)
- [1] A. Chambers, *Modern vacuum physics*. CRC Press, 2004.
- [2] D. Hoffman, B. Singh, and J. H. Thomas III, *Handbook of vacuum science and technology*. Elsevier, 1997.
- [3] J. A. Becker, “Study of surfaces by using new tools,” in *Solid State Physics*, vol. 7, Elsevier, 1958, pp. 379–424.
- [4] C. H. Kruger, “The axial-flow compressor in the free-molecule range.” Massachusetts Institute of Technology, 1960.
- [5] H. J. Finol, “Study of free molecule flow through a cascade.” Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 1958.
- [6] T. Sawada and K. Murakami, “The Axial Flow Molecular Pump (I),” *Shinku*, vol. 14, no. 2, pp. 33–41, 1971.
- [7] T. SAWADA, M. SUZUKI, and O. TANIGUCHI, “On the Axial Flow Molecular Pump : 2nd Report, The Performance of a Combination of Blade Rows,” *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, vol. 36, no. 285, pp. 781–791, 1970, doi: 10.1299/kikai1938.36.781.
- [8] T. SAWADA and O. TANIGUCHI, “On the Axial Flow Molecular Pump : 3rd Report, Trial Manufacture and the Performance Test,” *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, vol. 38, no. 310, pp. 1456–1461, 1972, doi: 10.1299/kikai1938.38.1456.
- [9] T. SAWADA, “Performance of a turbomolecular pump

- [23] N. Sengil and F. O. Edis, "Fast cell determination of the DSMC molecules in multi-stage turbo molecular pump design," *Comput. Fluids*, vol. 45, no. 1, pp. 202–206, 2011.
- [24] B. Han, Z. Huang, and Y. Le, "Design aspects of a large scale turbomolecular pump with active magnetic bearings," *Vacuum*, vol. 142, pp. 96–105, 2017.
- [25] N. Metropolis and S. Ulam, "The monte carlo method," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 44, no. 247, pp. 335–341, 1949.
- [26] A. Amoli, M. Hoseinalipour, and R. Ebrahimi, "Direct simulation of free molecular flow in fully 3-d axial rotor," in *36th AIAA Thermophysics Conference*, 2003, p. 3777, doi: 10.2514/6.2003-3777.