

بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی و سرعت روتور بر میزان دبی نشتی براش سیل توربین گاز

محمد بهادری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

سعادت زیرک*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این تحقیق مدلی دو بعدی و تقارن محوری برای اندازه گیری اثر تغییر طول آزاد رشته‌ها (فاصله بین نوک رشته‌ها و حلقه مقابل)، ارتفاع رشته‌ها (فاصله بین حلقه پشتی و نوک رشته‌های براش سیل در تماس با روتور)، ضخامت رشته‌ها و لقی شعاعی رشته‌ها (فاصله بین نوک رشته‌های براش سیل و روتور) بر دبی نشتی براش سیل‌ها با استفاده از تحلیل عددی معادلات ناور-استوکس به روش میانگیری رینولدز و روش محیط متخلخل غیرداری به کار گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهند با افزایش ضخامت رشته‌ها و کاهش ارتفاع رشته‌ها، مقدار دبی نشتی کاهش پیدا می‌کند در حالی که دبی نشتی با افزایش طول آزاد رشته‌های براش سیل تقریباً بدون تغییر می‌ماند. با افزایش لقی شعاعی بر مقدار دبی نشتی افزوده می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد، جهت ایجاد کمترین مقدار نشتی، می‌بایست ارتفاع رشته‌های براش سیل و لقی شعاعی رشته‌ها حداقل بوده و ضخامت رشته سیم‌ها افزایش یابند. اثر سرعت چرخشی روتور بر میزان دبی نشتی نیز در تحقیق حاضر بررسی می‌شود. با توجه به نتایج، افزایش سرعت روتور باعث اندکی کاهش در دبی نشتی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: براش سیل، محیط متخلخل، نشتی، حل عددی.

Numerical investigation on effect of geometrical parameters and rotor speed on leakage flow of gas turbine brush seal

M. Bahadori Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

S. Zirak Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

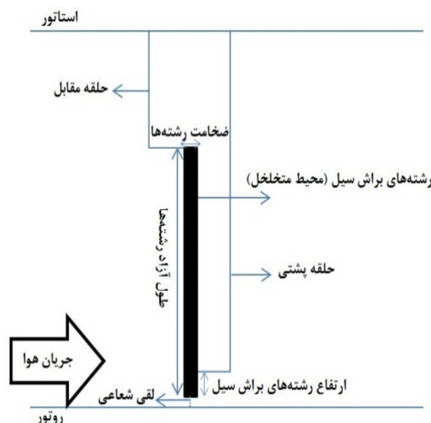
Abstract

In this paper a two-dimensional axisymmetric CFD model is used to investigate the effect of bristle pack free length (the distance between bristle pack tip and front plate), fence height (the distance between backing ring and bristle pack tip), bristle pack thickness and clearance (the gap between rotor surface and bristles tip) on leakage flow of brush seals using Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) and non-Darcian porous medium approach. The results show, the leakage flow decreases with increasing the bristle pack thickness and decreasing the fence height while there is almost no change in leakage flow, when increasing the bristle pack free length. The leakage flow of the brush seal increases with increasing the clearance. This work demonstrates that in order to have the minimum leakage, fence height and clearance should have their minimum values and bristle pack thickness should be increased. Moreover, the effect of rotor speed on leakage flow is investigated. As results indicate, increasing the rotational speed leads to a slight decrease in leakage flow.

Keywords: Brush seal, Porous medium, Leakage, CFD.

۱- مقدمه

براش سیل‌ها^۱، سیل‌های دایره شکلی هستند که برای کاهش نشت جریان در توربین‌های گاز و بخار استفاده می‌شوند. براش سیل‌ها از سه بخش اصلی حلقه مقابل^۲، حلقه پشتی^۳ و رشته سیم‌های^۴ براش سیل تشکیل شده‌اند. رشته‌های براش سیل، رشته‌هایی انعطاف پذیر هستند که بین حلقه پشتی و مقابل، با زاویه خوابیدگی^۵ به استاتور جوش خورده‌اند. شکل ۱ ساختمان براش سیل را نمایش می‌دهد. براش سیل‌ها برای بالا بردن قدرت خروجی و بازده توربین‌های گاز و بخار در سه دهه اخیر مورد توجه زیادی از سوی سازندگان قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- ساختمان یک براش سیل

- ¹ Brush seal
- ² Front plate
- ³ Backing ring
- ⁴ Bristle pack
- ⁵ Lay angle

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s_zirak@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۹

همان طور که فرگوسن [۱] بیان کرده است، برآش سیل‌ها به دلیل نیاز به فضای محوری کمتر نسبت به سیل‌های لایبرنس^۱ و همچنین عملکرد بهتر و کاهش قابل توجه میزان نشتی، جایگزین مناسبی برای سیل‌های لایبرنس هستند. بیلی و لانگ [۲] یک مدل تقارن محوری را دنبال کرده و در این مدل از فرض داری^۲ برای جریان در رشته‌های برآش سیل استفاده کردند و در نهایت نتایج را با داده‌های تجربی خود مقایسه کردند. هندریکس و همکاران [۳] دبی عبوری را با استفاده از روش جریان در محیط متخلخل^۳ ارگون [۴] که نوعی روش حل غیرداری^۴ بود، پیش بینی کردند و سپس نتایج را با داده‌های تجربی کارلیل و همکاران [۵] مقایسه کردند. چو و همکاران [۶] یک مدل دو بعدی و تقارن محوری را مورد مطالعه قرار دادند که در آن برای رشته‌های برآش سیل نیروهای مقاوم در برابر سیال در نظر گرفته شده بود. آنها ضرایب مقاومت را با استفاده از کالیبره کردن و با توجه به داده‌های تجربی به دست آوردند. در مدل آنها هر دو ضریب مقاومت اینرسی و لزجت در نظر گرفته شده بود. چو و هاگ [۷] مدلی یک بعدی را بر اساس روش غیر داری در محیط متخلخل مورد مطالعه قرار دادند و سپس نتایج خود را با داده‌های تجربی سه مرجع دیگر، کارلیل و همکاران [۵]، اونیل [۸] و بیلی و لانگ [۲] برای اعتبار سنجی محاسبات مقایسه کردند. ترنر و همکاران [۹] با استفاده از روش چو و همکاران [۶] تحقیق بیلی و لانگ [۲] را برای بررسی لقی رشته‌های برآش سیل و روتور^۵ ادامه دادند. چن و همکاران [۱۰] از ضرایب مقاومت بالاتری برای برآش سیل استفاده کردند و نتایج آنها دقیق تر از نتایج چو و همکاران [۶] بود و با داده‌های تجربی مطابقت بسیاری داشت. داگو [۱۱] برای بررسی جریان در رشته‌های برآش سیل از روش محیط متخلخل بالک استفاده کرد. او رشته سیم‌های برآش سیل را به دو قسمت بالایی و پایینی که در واقع همان فاصله بین حلقه پستی و نوک رشته‌های برآش سیل^۶ بود، تقسیم کرد و نشان داد قسمت بالایی که تحت نیروی نگهدارنده حلقه پستی است، مقاومت بیشتری در برابر جریان سیال دارد. او از سه معیار دبی عبوری، توزیع فشار در حلقه پستی و توزیع فشار در سطح روتور استفاده کرد و با استناد بر داده‌های تجربی، ضرایب مقاومت را برای هر دو قسمت برآش سیل تخمین زد. در این تخمین ضرایب قسمت بالایی ۲۰ درصد بیشتر از ضرایب قسمت پایینی برآش سیل بودند. داگو و اکسیت [۱۲] و [۱۳] مدلی عددی بر اساس روش جریان در محیط متخلخل را به کار بردند تا در نهایت تاثیرات هندسه حلقه پستی و حلقه مقابل بر دبی عبوری و توزیع فشار در برآش سیل را تحقیق نمایند. پوگاچو و هلم [۱۴] نیز از روش جریان در محیط متخلخل استفاده کردند تا با به کارگیری نمونه‌های کالیبره شده، نشتی جریان هوا و توزیع فشار در برآش سیل‌های مختلف با ضخامت‌های مختلف را بدست آورند. هوانگ و همکاران [۱۵] از مدلی عددی استفاده کردند تا با به کارگیری حلقه ای کوچک در قسمت پایین دست جریان، در زیر حلقه پستی، از دبی عبوری بکاهند. آنها برای این کار از ضرایب مقاومت بدست آمده توسط

داگو [۱۱] بهره گرفتند. کیو و همکاران [۱۶] ویژگی‌های جریان جرمی عبوری هوا در برآش سیل چند مرحله ای را با استفاده از داده‌های تجربی بررسی کردند تا بتوانند اثرات لقی شعاعی بین روتور و نوک رشته‌های برآش سیل و همچنین سرعت روتور بر روی جریان سیال را پیش بینی کنند. گرشام و همکاران [۱۷] روشی عددی را بکار بردند تا تاثیر نسبت فشار بر روی ضریب نفوذپذیری در برآش سیل‌ها را مطالعه کنند.

در این تحقیق با استفاده از حل عددی توسط نرم افزار انسیس-فلوئنت^۷، میزان تغییرات دبی عبوری تحت تاثیر تغییر پارامترهای هندسی ارتفاع رشته‌های برآش سیل در تماس با روتور، تغییر ضخامت رشته‌ها^۸ و تغییر در طول آزاد رشته‌ها^۹ که همان فاصله بین نوک رشته‌ها و حلقه مقابل است، مطالعه خواهد شد. همچنین میزان اثرگذاری لقی شعاعی رشته‌های برآش سیل بر دبی عبوری، در سه نسبت فشار مختلف مطالعه خواهد شد. این پژوهش تاثیر سرعت چرخشی روتور بر نشت گاز در برآش سیل را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. اعتبارسنجی روش تحلیل بر اساس شرایط مرزی و مشخصات هندسی تحقیق تجربی بیلی و لانگ [۲] انجام می‌شود. جدول ۱ اندازه مشخصات هندسی برآش سیل مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این جدول اندازه‌ها به میلی متر نشان داده شده اند.

جدول ۱- پارامترهای هندسی برآش سیل بیلی و لانگ [۲]

مشخصات هندسی	اندازه‌ها (mm)
قطر نوک رشته‌ها	۱۲۱/۷۶
قطر درونی حلقه مقابل	۱۴۲/۴
قطر بیرونی	۱۵۱/۷۱
قطر حلقه پستی	۱۲۴/۵۶
فاصله بین نوک رشته‌ها و حلقه پستی	۱/۴
قطر هر رشته	۰/۰۷۶۲
ضخامت کلی	۳/۸۵
ضخامت حلقه پستی و حلقه مقابل	۱/۶۲۵
ضخامت رشته‌ها	۰/۶

۲- حل عددی و معادلات حاکم

در این تحقیق نرم افزار انسیس-فلوئنت و الگوریتم سیمپل^{۱۰} برای تحلیل عددی توزیع فشار و جریان عبوری استفاده می‌شود و مسئله به طور دو بعدی و تقارن محوری حل می‌شود. محور روتور به عنوان محور تقارن انتخاب شده است. جریان لزج، پایا و تراکم پذیر هوا به عنوان گاز ایده‌آل در این مطالعه استفاده شده است. برای جریان آشفته به کار رفته در حل، مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ انتخاب می‌شود. حل گر استفاده شده در مسئله، حل گر pressure based است. معیار همگرایی، در همه معادلات 10^{-5} انتخاب می‌شود.

¹ Labyrinth

² Darcy

³ Porous medium

⁴ Non-Darcian

⁵ Clearance

⁶ Fence height

⁷ Ansys-Fluent

⁸ Bristle pack thickness

⁹ Bristle free length

¹⁰ SIMPLE

درون رشته‌های برآش سیل نیروهای مقاوم در برابر سیال حضور دارند و این ناحیه به عنوان محیط متخلخل شناخته می‌شود. در این پژوهش همانند بسیاری از پژوهشگران همچون چو و همکاران [۶] و داگو [۱۱] از معادلات زیر که بیانگر جریان سیال در محیط متخلخل غیر داری است، استفاده می‌شود:

$$-\frac{dp}{dx_i} = a_{ij}\mu u_j + b_{ij}\rho |u| u_j \quad (5)$$

$$-\frac{dp}{dx_i} = (\alpha_{ij}|u| + \beta_{ij})u_j \quad (6)$$

که در معادله (۵)، a ضریب مقاومت لزجی b ضریب مقاومت اینرسی است. در معادله (۶)، α مقاومت اینرسی و β مقاومت لزجی است و در واقع معادله (۶) شکل دیگری از معادله (۵) است. چو و همکاران [۶] سمت راست معادله (۶) را به عنوان نیروی مقاوم در برابر سیال به سمت راست معادله مومنوم یا معادله (۲) اضافه کردند و به علت مقاومت بسیار زیاد محیط متخلخل در برابر سیال، از ترم‌های لزجی و اینرسی در معادله مومنوم صرف نظر شده و در نهایت معادله مومنوم به شکل معادله (۶) مشخص شد.

۳-۲- استقلال حل از تعداد سلول شبکه

برای تضمین دقت مش و وابسته نبودن حل عددی به تعداد سلول‌های شبکه، پنج شبکه با تعداد سلول ۸۰۷۱، ۱۳۳۱۶، ۲۰۷۹۷، ۲۶۷۱۶ و ۳۲۰۷۰ تحت شرایط یکسان و نسبت فشار ($R_p = p_u/p_d$) ۲/۵ آزمایش شدند. شکل ۲ نمایشگر نمودار دبی بر حسب تعداد سلول‌های شبکه است. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شبکه با تعداد سلول‌های ۲۶۷۱۶، شبکه ای قابل قبول برای حل عددی است. شکل ۳ نمایی دو بعدی از محدوده مش برای تحلیل عددی جریان سیال در برآش سیل مورد نظر را نمایش می‌دهد. شکل ۳ نشانگر مش و هندسه برآش سیل است که توسط نرم افزار گمبیت^۲ طراحی شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، مش در اطراف دیواره‌ها و مرز بین نواحی مختلف به علت تغییرات شدیدتر، ریزتر شده است. مش استفاده شده در این تحقیق مش ساختاری است و همان طور که از شکل ۳ پیداست، علاوه بر ریز بودن مش در نزدیکی دیواره‌ها، مش در نواحی مرزی محیط متخلخل هم به علت تغییرات در خواص جریان ریزتر شده است.

۲-۱- شرایط مرزی

فشار و دمای سکون ورودی و فشار خروجی شرایط مرزی حل مسئله هستند. فشار در خروجی فشار اتمسفر در نظر گرفته می‌شود و فشار ورودی از ۱۲۵ kPa تا ۴۰۰ kPa متغیر است. به این ترتیب نسبت فشارهای ۱/۲۵ تا ۴ بررسی می‌شوند. دمای گاز 20°C در نظر گرفته می‌شود. برای پیش بینی تاثیر چهار پارامتر هندسی اصلی برآش سیل بر میزان نشتی چرخش روتور در نظر گرفته نمی‌شود و جریان در دو بعد شعاعی و محوری حل خواهد شد. عدم چرخش روتور سبب می‌شود تا ضرایب مقاومت رشته‌های برآش سیل تنها در دو جهت شعاعی و محوری تعریف شوند [۱۱]. هنگام تحلیل و بررسی تاثیر چرخش روتور بر میزان نشتی علاوه بر تعریف ضرایب مقاومت در جهت‌های محوری و شعاعی، ضرایب در جهت محیطی هم تعریف می‌شوند. شرط عدم لغزش برای تمام دیوارها در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- معادلات حاکم

هندسه این پژوهش از نظر معادلات جریانی به دو بخش محفظه‌های بالادست و پایین دست جریان و رشته‌های برآش سیل تقسیم می‌شود. در خارج از رشته‌های برآش سیل معادلات ناویر-استوکس^۱ حاکم هستند. معادلات (۱) و (۲) معادلات ناویر-استوکس در جریان آشفتنه را بیان می‌کنند و معادله (۳) نشان دهنده تنش رینولدز در جریان آشفتنه است که با استفاده از فرض بوزینسک به دست می‌آید [۱۸]. معادله (۴) معادله انرژی را نشان می‌دهد [۱۸].

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنوم

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - 2/3 \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i u_j) \quad (2)$$

تنش رینولدز

$$\left(-\rho u_i u_j \right) = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [u_j (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(k_{eff}) \frac{\partial T}{\partial x_j} + (\tau_{eff})_i u_i \right] + S_h \quad (4)$$

² Gambit

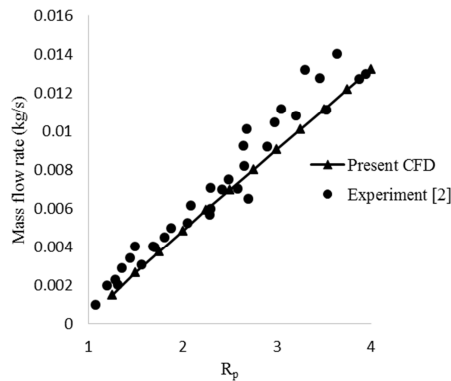
¹ Navier-Stokes

جدول ۲- ضرایب مقاومت گزارش شده توسط داگو [۱۱]

رشته‌های برآش سیل	$a_z (m^{-2})$	$a_r (m^{-2})$	$b_z (m^{-1})$	$b_r (m^{-1})$
قسمت پایینی	$2/51 \times 10^{-12}$	$5/58 \times 10^{-9}$	$5/81 \times 10^{-6}$	$7/75 \times 10^{-4}$
قسمت بالایی	$3/01 \times 10^{-12}$	$6/69 \times 10^{-9}$	$6/97 \times 10^{-6}$	$9/30 \times 10^{-4}$

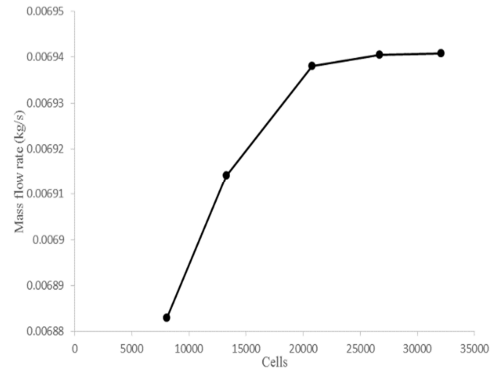
۵-۲- اعتبارسنجی حل عددی

برای اعتبارسنجی حل عددی، نتایج عددی بدست آمده با داده‌های تجربی بیلی و لانگ [۲] مقایسه می‌شوند. سه معیار دبی عبوری، توزیع فشار شعاعی بر روی حلقه پشتی و توزیع فشار محوری بر روی روتور برای سنجش اعتبار نتایج عددی با نتایج تجربی قیاس می‌شوند. در شکل ۵، تغییرات دبی جرمی عبوری در نسبت فشارهای مختلف با داده‌های تجربی بیلی و لانگ [۲] مقایسه شده است.

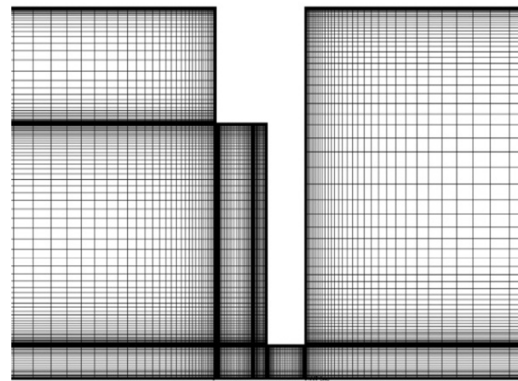


شکل ۵- مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی

شکل‌های ۶ و ۷ نشان دهنده نمودار تغییرات نسبت فشار بی بعد، $p^* = \frac{p-p_d}{p_u-p_d}$ ، نسبت به فاصله شعاعی بی بعد از روتور روی حلقه پشتی، $Y=y/h_{bf}$ ، در نسبت فشارهای ۱/۵ و ۲/۵ هستند. h_{bf} فاصله میان نوک رشته‌های برآش سیل و حلقه مقابل است. شکل ۸ نمایانگر نمودار فشار بی بعد، p^* ، نسبت به مختصات محوری، Z ، است. تمامی محاسبات در نسبت فشار یکسان ۲/۵ انجام شده اند. دلیل اختلاف نتایج عددی با داده‌های تجربی در شکل ۸، انحراف محوری و خمیدگی رشته‌هاست که ناشی از اختلاف فشار دو طرف برآش سیل است [۲ و ۱۱]. در تحقیق حاضر از این انحراف صرف نظر شده است و مکان رشته‌ها ثابت فرض می‌شود. با توجه به شکل‌ها نتایج عددی با داده‌های تجربی مطابقت دارند.



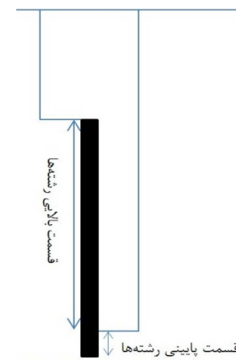
شکل ۲- تغییرات دبی جرمی در تعداد سلول‌های مختلف



شکل ۲- نمایشی از سلول‌های شبکه

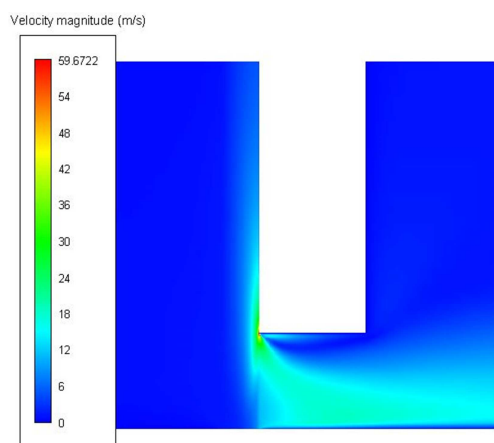
۴-۲- ضرایب مقاومت برآش سیل

داگو [۱۱] تحقیق خود را در دو بعد شعاعی و محوری انجام داد. او مطابق شکل ۴ رشته‌های برآش سیل را به دو قسمت بالایی که توسط حلقه پشتی نگهداشته می‌شود و قسمت پایینی که آزاد هستند تقسیم بندی کرد و از طریق کالیبره کردن نتایج تجربی برای هر یک از قسمت‌ها، دو مقاومت اینرسی و لزجت را تعریف کرد. در پژوهش حاضر با توجه به منابع [۱۱] و [۱۵] از ضرایب مقاومت تعریف شده توسط داگو [۱۱] استفاده شده است. این ضرایب در جدول ۲ مشخص شده اند. از اثرات نسبت فشار بر ضرایب مقاومت نیز صرف نظر شده و مقادیر ضرایب مقاومت در تمامی مراحل و نسبت فشارها ثابت فرض می‌شوند.

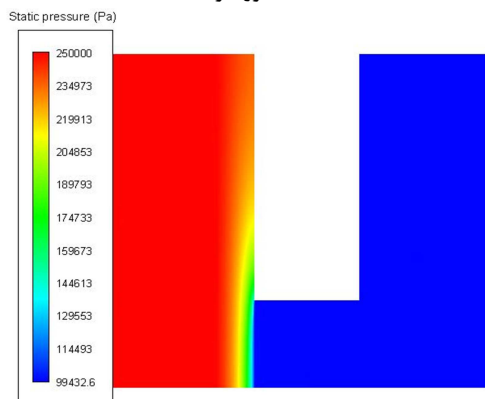


شکل ۴- تقسیم بندی رشته‌های برآش سیل

عبوری به طور مجزا تحقیق می‌شوند. شکل ۹ کانتورهای فشار استاتیک و سرعت جریان هوا در براش سیل را با توجه به ابعاد داده شده در جدول ۱ و نسبت فشار ۲/۵ نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نمودار تغییرات دبی جرمی نسبت به طول آزاد رشته‌های براش سیل را نمایش می‌دهد. در این نمودار مقدار نشت جریان هوا در چهار طول آزاد رشته‌های براش سیل با مقادیر ۸/۳۲، ۹/۳۲، ۱۰/۳۲ و ۱۱/۳۲ میلی متر در سه نسبت فشار ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ نمایش داده شده است. همان طور که از شکل پیداست با افزایش طول آزاد رشته‌های براش سیل، دبی عبوری به میزان بسیار ناچیزی افزایش می‌یابد (به سختی قابل مشاهده است) که بیان کننده تاثیر بسیار اندک این پارامتر بر کاهش نشت هوا در براش سیل‌ها است. جدول ۳ تاثیر تغییر طول آزاد رشته‌ها بر میزان دبی نشتی را به خوبی نشان می‌دهد. این افزایش بسیار اندک هم به علت افزایش سطح مقطع بین حلقه مقابل و نوک رشته‌هاست.

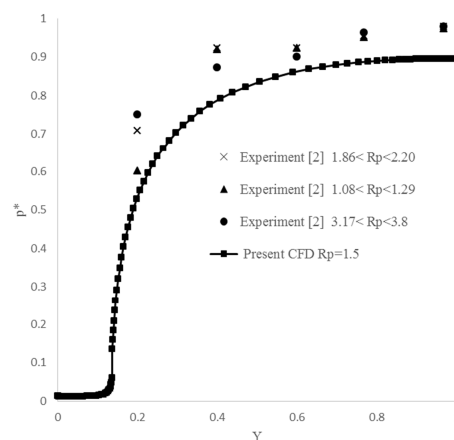


الف) کانتور سرعت

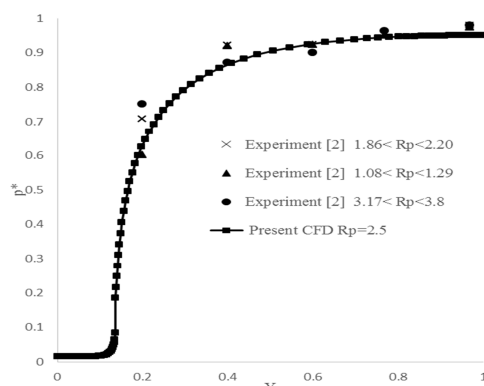


ب) کانتور فشار استاتیک

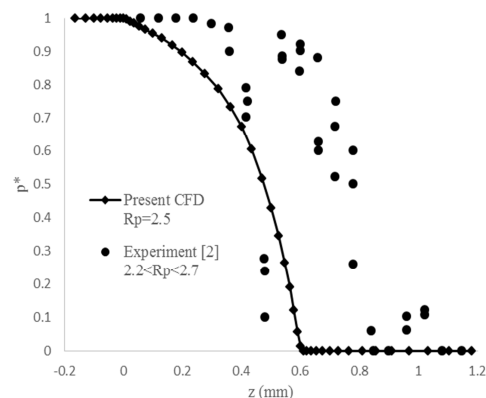
شکل ۹- کانتورهای سرعت و فشار استاتیک در براش سیل بدون لقی شعاعی



شکل ۶- مقایسه تغییرات فشار بی بعد در طول حلقه پشتی



شکل ۷- مقایسه تغییرات فشار بی بعد در طول حلقه پشتی



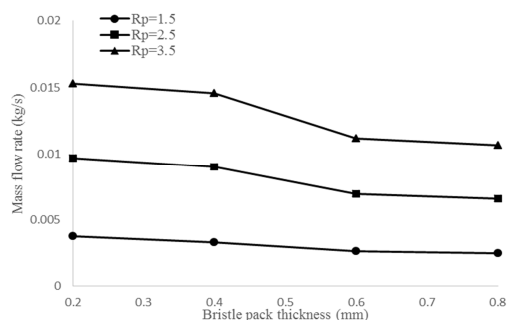
شکل ۸- مقایسه تغییرات فشار بی بعد در سطح روتور

۳- نتایج

۳-۱- تاثیر اندازه پارامترهای هندسی اصلی براش سیل بر

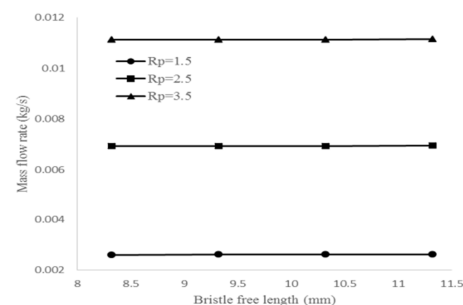
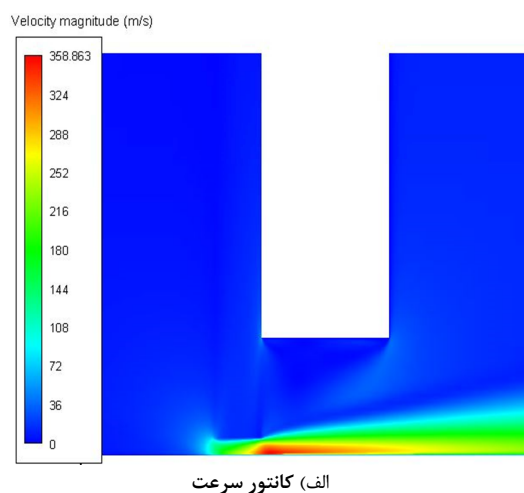
نشتی آن

این مقاله میزان اثرگذاری چهار پارامتر هندسی براش سیل بر جریان جرمی عبوری و توزیع فشار هوا را بررسی می‌کند. تاثیر طول آزاد رشته‌های براش سیل، ارتفاع رشته‌های براش سیل، ضخامت رشته‌های براش سیل و لقی شعاعی رشته‌های براش سیل بر دبی



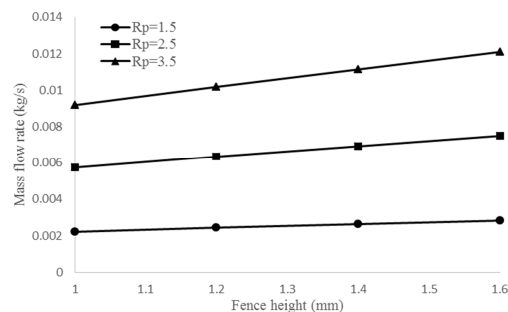
شکل ۱۲- تغییرات دبی جرمی هوا نسبت به ضخامت رشته‌های براش سیل

در شکل ۱۳ کانتورهای فشار استاتیک و سرعت جریان هوای اطراف رشته‌های براش سیل برای لقی 0.2 میلی متر بین نوک رشته‌ها و روتور، در نسبت فشار $2/5$ به عنوان نمونه نشان داده شده است. شکل ۱۴ نمودار جریان دبی عبوری نسبت به لقی‌های مختلف رشته‌های براش سیل در سه نسبت فشار $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ را نمایش داده که بیانگر افزایش بسیار زیاد نشت هوا با افزایش این فاصله است. این افزایش هم به علت نبودن مقاومت‌های محیط متخلخل و ایجاد فاصله میان نوک رشته‌ها و روتور است که موجب می‌شود تا جریان جرمی بیشتری از هوا از این ناحیه عبور کند. همان طور که از شکل ۱۳ پیداست، مقدار سرعت ماکزیمم هم با افزایش لقی رشته سیم‌های براش سیل به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- تغییرات دبی جرمی هوا نسبت به طول آزاد رشته‌های براش سیل

شکل ۱۱ نمودار تغییرات جریان جرمی عبوری بر حسب ارتفاع‌های مختلف رشته‌های براش سیل را نمایش می‌دهد. در این نمودار چهار فاصله $1/5$ ، $1/4$ و $1/6$ میلی متر در سه نسبت فشار $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ دیده می‌شوند. این نمودار بیان کننده افزایش نشت هوا با افزایش ارتفاع رشته‌ها است. این افزایش به دلیل افزایش سطح مقطع بین حلقه پشتی و نوک رشته‌ها است. همان طور که از شکل پیداست با افزایش فشار، علاوه بر افزایش میزان نشتی، با افزایش ارتفاع رشته‌ها شیب افزایش نشتی هم بیشتر می‌شود. محاسبات با صفر در نظر گرفتن فاصله نوک رشته‌ها از روتور انجام گرفته اند.



شکل ۱۱- تغییرات دبی جرمی هوا نسبت به ارتفاع رشته‌های براش سیل

نمودار تغییرات دبی جرمی عبوری بر حسب ضخامت‌های مختلف رشته‌های براش سیل در شکل ۱۲ دیده می‌شود. در این نمودار چهار ضخامت مختلف رشته سیم‌های براش سیل با اندازه‌های 0.2 ، 0.4 ، 0.6 و 0.8 میلی متر در سه نسبت فشار $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ نمایش داده شده است. همان گونه که از این نمودار پیداست، افزایش ضخامت رشته‌های براش سیل، دبی عبوری را به طور چشم گیری کاهش داده است. علت این کاهش، گسترش محیط تخلخل به بالادست جریان و در نتیجه آن اضافه شدن مقاومت در برابر مسیر سیال و در نتیجه کاهش دبی جرمی عبوری است. بنابراین تغییرات ضخامت رشته‌ها نقش مهمی را برای کاهش نشت هوا ایفا می‌کند.

نسبت میزان نشتی هوا در براش سیل بدون لقی به میزان نشتی هوا در براش سیل با لقی‌های مختلف را نمایش می‌دهد. با توجه به این جدول نشت گاز در براش سیل بدون لقی شعاعی نسبت به نشت گاز در براش سیل با ۰/۶ میلی متر لقی شعاعی در نسبت فشار ۱/۵، ۰/۰۴۸ گزارش شده است، درحالی که نشتی گاز در براش سیل بدون لقی در نسبت فشار ۳/۵ نسبت به نشت گاز در براش سیل با ۰/۲ میلی متر لقی شعاعی ۰/۲۲۲ است.

جدول ۳- درصد افزایش نشت هوا با افزایش طول آزاد رشته‌های

براش سیل نسبت به طول آزاد اولیه ۸/۳۲ میلی متر

نسبت فشار	نسبت فشار	نسبت فشار	طول آزاد رشته‌های براش سیل
۳/۵	۲/۵	۱/۵	
۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۵۲	۹/۳۲
۰/۱۱	۰/۲۴	۰/۸۷	۱۰/۳۲
۰/۱۴	۰/۲۹	۱/۰۶	۱۱/۳۲

جدول ۴- درصد افزایش نشت هوا با افزایش ارتفاع رشته‌های

براش سیل نسبت به ارتفاع اولیه ۱ میلی متر

نسبت فشار	نسبت فشار	نسبت فشار	ارتفاع رشته‌های براش سیل
۳/۵	۲/۵	۱/۵	
۱۰/۹۰	۱۰/۵۹	۹/۶۴	۱/۳
۲۱/۴۰	۲۰/۷۰	۱۸/۷۸	۱/۴
۳۱/۶۴	۳۰/۵۴	۲۷/۶۰	۱/۶

جدول ۵- درصد کاهش نشت هوا با افزایش ضخامت رشته‌های

براش سیل نسبت به ضخامت اولیه ۰/۲ میلی متر

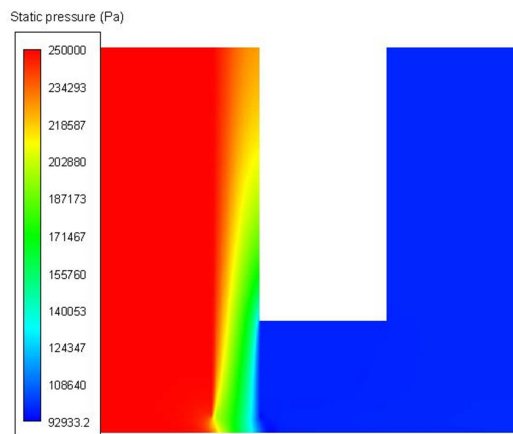
نسبت فشار	نسبت فشار	نسبت فشار	ضخامت رشته‌های براش سیل
۳/۵	۲/۵	۱/۵	
۴/۷۸	۷/۰۸	۱۲/۴۹	۰/۴
۲۷/۰۶	۲۸/۱۵	۳۰/۰۹	۰/۶
۳۰/۳۹	۳۱/۸۶	۳۴/۸۹	۰/۸

جدول ۶- نسبت میزان نشتی هوا در براش سیل بدون لقی به

میزان نشتی هوا در براش سیل با لقی‌های مختلف

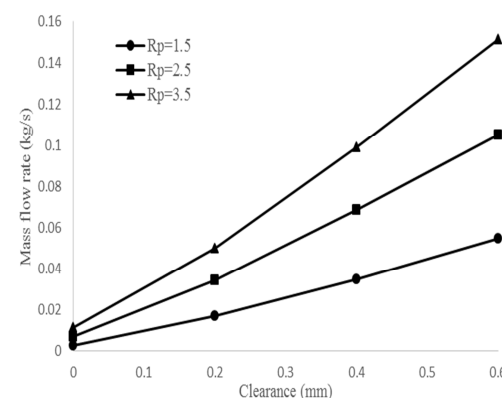
نسبت فشار	نسبت فشار	نسبت فشار	لقی رشته‌های براش سیل
۳/۵	۲/۵	۱/۵	
۰/۲۲۲	۰/۲۰۲	۰/۱۵۶	۰/۲
۰/۱۱۲	۰/۱۰۱	۰/۰۷۵	۰/۴
۰/۰۷۴	۰/۰۶۶	۰/۰۴۸	۰/۶

در براش سیل بدون فاصله با روتور، ماکزیمم سرعت در نزدیکی لبه حلقه پستی اتفاق می‌افتد و در واقع جریان هوا به طور شعاعی از قسمت بالایی و مقاوم تر نسبت به سیال، به سمت فاصله بین حلقه پستی و روتور می‌آید و با جریان محوری هوا در قسمت پایینی رشته‌های براش سیل که مقاومت کمتری نسبت به جریان سیال دارد، ترکیب شده، از طریق فاصله بین حلقه پستی و روتور به قسمت پایین دست براش سیل انتقال می‌یابد. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در



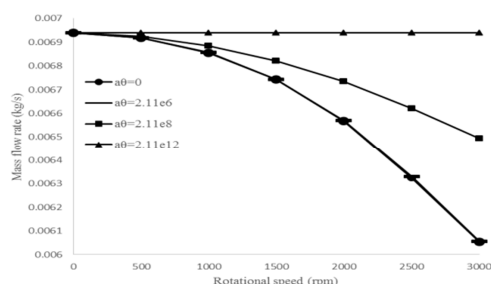
ب) کانطور فشار استاتیک

شکل ۱۳- کانطورهای سرعت و فشار استاتیک در براش سیل با ۰/۲ میلی متر لقی شعاعی

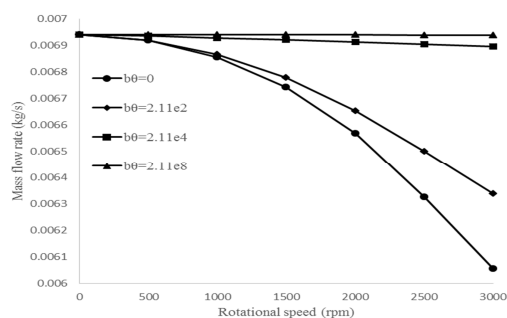


شکل ۱۴- تغییرات دبی جرمی هوا نسبت به لقی شعاعی رشته‌های براش سیل

جدول‌های (۳-۶) به طور دقیق میزان تغییر نشت هوا با چهار پارامتر طول آزاد رشته‌های براش سیل، ارتفاع رشته‌های براش سیل، ضخامت رشته‌ها و لقی شعاعی بین رشته‌ها و روتور را نشان می‌دهد تا هندسه بهینه جهت بیشترین کاهش در نشت هوا مشخص شود. با توجه به جدول ۳ افزایش نشت هوا با افزایش طول آزاد رشته‌های براش سیل بسیار ناچیز است و در بیشترین حالت در نسبت فشار ۱/۵ با طول آزاد ۱۱/۳۲ میلی متر به میزان ۱/۰۶ درصد نسبت به حالت اولیه یعنی ۸/۳۲ میلی متر افزایش در میزان نشتی گزارش شده است، در حالی که با افزایش ارتفاع رشته‌های براش سیل به میزان بسیار زیادی بر دبی نشتی افزوده می‌شود. جدول ۴ نشان می‌دهد با ۰/۶ میلی متر افزایش در ارتفاع رشته‌های براش سیل نسبت به ارتفاع اولیه یعنی ۱ میلی متر، دبی نشتی در دو نسبت فشار ۲/۵ و ۳/۵ بیش از ۳۰ درصد افزایش یافته است. جدول ۵ نشان دهنده کاهش نشت هوا با افزایش ضخامت رشته‌های براش سیل است. همان طور که در این جدول دیده می‌شود با افزایش ضخامت براش سیل از ۰/۲ تا ۰/۸ میلی متر در هر سه نسبت فشار دبی نشتی بیش از ۳۰ درصد کاهش یافته است. همان طور که انتظار می‌رود این کاهش در ضخامت‌های دیگر کمتر است. جدول ۶



شکل ۱۵- تاثیر سرعت روتور بر دبی جرمی هوا ($\theta_0 = 0$)



شکل ۱۶- تاثیر سرعت روتور بر دبی جرمی هوا ($\theta_0 = 0$)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر تغییر طول آزاد رشته‌های برآش سیل، ارتفاع رشته‌های برآش سیل، ضخامت رشته‌ها و لقی شعاعی رشته‌های برآش سیل بر دبی عبوری در سه نسبت فشار مختلف بررسی شد. با افزایش طول آزاد رشته‌های برآش سیل به میزان بسیار ناچیزی بر دبی عبوری هوا افزوده می‌شد در حالی که با افزایش ارتفاع رشته‌های برآش سیل به میزان بسیار بیشتری بر دبی عبوری افزوده می‌شد. همچنین با افزایش ضخامت رشته‌های برآش سیل از دبی عبوری کاسته می‌شد. با افزایش لقی شعاعی بین نوک رشته‌ها و روتور دبی جرمی عبوری به طور قابل توجهی افزایش می‌یافت که این افزایش به علت نبود مقاومت رشته‌های برآش سیل در برابر هوا بود. سه پارامتر ارتفاع رشته‌های برآش سیل، ضخامت رشته‌ها و لقی شعاعی، از نظر تاثیر در مقدار دبی جرمی عبوری بسیار مهم هستند و تغییر در آنها نشتی جریان را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد در حالی که تغییر در دبی جرمی عبوری متاثر از تغییر طول آزاد رشته‌های برآش سیل بسیار ناچیز است. با توجه به نتایج به دست آمده، با به حداکثر رساندن ضخامت رشته‌های برآش سیل و حداقل کردن ارتفاع و لقی شعاعی این رشته‌ها میزان نشت گاز به حداقل رسیده و از مصرف سوخت در توربین گاز کاسته می‌شود. انتخاب ابعاد مناسب و بهینه در طراحی برآش سیل‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است زیرا این انتخاب باعث می‌شود نشت گاز به حداقل مقدار ممکن نزول پیدا کرده و در نتیجه موجب افزایش بازدهی و کاهش مصرف سوخت در توربین گاز می‌شود. تاثیر سرعت روتور بر نشت گاز هم در این مطالعه بررسی شد. نتایج نشان دهنده کاهش میزان دبی عبوری و نشتی با افزایش سرعت چرخش روتور است. با افزایش مقاومت‌های لزجی و اینرسی در جهت محیطی از اثر سرعت چرخشی روتور بر دبی عبوری کاسته می‌شود.

رشته‌های برآش سیل دارای فاصله از روتور، بیشترین مقدار سرعت در نزدیکی روتور رخ می‌دهد. بیشترین جریان جرمی هم از همان فاصله بین نوک رشته‌ها و روتور گذر می‌کند.

برای رسیدن به نشتی کمتر، اندازه پارامترهای هندسی اصلی برآش سیل‌ها نقشی اساسی دارند. طراحان برآش سیل باید تاثیر هر پارامتر بر نشت هوا را بررسی کنند تا بهینه ترین ابعاد هندسی از نظر مکانیکی و کاهش در میزان نشتی برای ساخت و طراحی این نوع سیل‌ها به کار گرفته شود. در کمتر تحقیقی به تاثیر پارامترهای هندسی اصلی برآش سیل بر نشت گاز در نسبت فشارهای مختلف پرداخته شده است. در این تحقیق تاثیر طول آزاد رشته‌های برآش سیل، ارتفاع رشته‌های برآش سیل، ضخامت رشته‌ها و لقی شعاعی بین رشته‌ها و روتور بر کاهش نشت گاز در برآش سیل در نسبت فشارهای مختلف مطالعه شده است. این پژوهش نشان می‌دهد با به حداقل رساندن ارتفاع رشته‌های برآش سیل و لقی شعاعی بین روتور و نوک رشته‌ها و همچنین با حداکثر کردن ضخامت رشته‌های برآش سیل، میزان نشت گاز به حداقل می‌رسد که این امر موجب کاهش مصرف سوخت خواهد شد. برای طراحی بهینه ترین ابعاد هندسی در برآش سیل‌ها جهت کاهش نشت گاز مطالعات بیشتری نیاز است.

۳-۲- تاثیر سرعت روتور بر نشتی جریان

در این پژوهش همچنین تاثیر سرعت چرخشی روتور بر میزان جریان عبوری از برآش سیل مطالعه می‌شود. ضرایب مقاومت اینرسی و لزجی در جهت محیطی هم به علت چرخش روتور به ضرایب در جهت‌های محوری و شعاعی افزوده می‌شوند. جریان نشتی در هفت سرعت چرخشی ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه محاسبه می‌شود. شکل ۱۵ تاثیر سرعت چرخشی روتور بر نشت جریان در برآش سیل را در ۴ مقاومت مختلف لزجی نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل از تاثیرات مقاومت اینرسی صرف نظر شده است ($\theta_0 = 0$). با توجه به شکل ۱۵، با افزایش سرعت چرخشی روتور از میزان دبی عبوری و نشتی کاسته می‌شود. میزان تاثیر سرعت روتور بر دبی عبوری در مقاومت‌های لزجی بالاتر به شدت کاهش می‌یابد. شکل ۱۶ تاثیر سرعت چرخشی روتور بر نشت جریان در برآش سیل را در ۴ مقاومت مختلف اینرسی نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است، از تاثیرات مقاومت لزجی صرف نظر شده است ($\theta_0 = 0$). با توجه به شکل، افزایش سرعت روتور دبی نشتی را کاهش می‌دهد. میزان تاثیر سرعت روتور بر دبی عبوری در مقاومت‌های اینرسی بالاتر هم به شدت کاهش می‌یابد. همان طور که در هر دو شکل پیداست، برای کاهش اثر سرعت چرخشی روتور به مقاومت‌های اینرسی با مقادیر کمتری نسبت به مقاومت‌های لزجی نیاز است. محاسبات در نسبت فشار ۲/۵ انجام می‌گیرد.

- [3] Hendricks R.C., Flower R., Howe H., A Brush Seals Program Modeling and Developments, *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 4, No. 2, pp. 91-96, 1998.
- [4] Ergun S., Fluid flow through packed columns, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, pp. 89-94, 1952.
- [5] Carlile J.A., Hendricks R.C., Yoder D.A., Brush seal leakage performance with gaseous working fluids at static and low rotor speed conditions, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Transactions of the ASME, Vol. 115, No. 2, pp. 397-403, 1993.
- [6] Chew J., Lapworth B., Millener P., Mathematical modeling of brush seals, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 16, No. 6, pp. 493-500, 1995.
- [7] Chew, J., Hogg, S., Porosity modeling of brush seals, *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Tribology*, Vol. 119, pp. 769-775, 1997.
- [8] O'Neill A., *Experiments on the Performance of Single and Multiple Brush Seals at Engine Representative Conditions*, Msc. thesis. Department of Engineering, University of Oxford, 1993.
- [9] Turner M.T., Chew J.W., Long C.A., Experimental investigation and mathematical modelling of clearance brush seals, in: *ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, American Society of Mechanical Engineers, 1997.
- [10] Chen L., Wood P., Jones T., Chew J., An iterative CFD and mechanical brush seal model and comparison with experimental results, *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 121, No. 4, pp. 656-662, 1999.
- [11] Dogu Y., Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach, in: *ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference*, American Society of Mechanical Engineers, pp. 1091-1101, 2003.
- [12] Dogu Y., Aksit M.F., Effects of Geometry on Brush Seal Pressure and Flow Fields—Part I: Front Plate Configurations, *Journal of turbomachinery*, Vol. 128, No. 2, pp. 367-378, 2006.
- [13] Dogu Y., Aksit M.F., Effects of Geometry on Brush Seal Pressure and Flow Fields—Part II: Backing Plate Configurations, *Journal of turbomachinery*, Vol. 128, No. 2, pp. 379-389, 2006.
- [14] Pugachev A., Helm P., Calibration of porous medium models for brush seals, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, Vol. 223, No. 1, pp. 83-91, 2009.
- [15] Huang S.Q., Suo S.F., Du K.B., Li Y.J., Wang Y.M., Study on a Type of Low-Leakage Brush Seal Porous Media Model, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, pp. 345-349, 2013.
- [16] Qiu B., Li J., Yan X., Investigation into the flow behavior of multi-stage brush seals, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, Vol. 228, No. 4, pp. 416-428, 2014.
- [17] Gresham T.G., Weaver B.K., Wood H.G., Untaroiu A., Characterization of Brush Seal Permeability, in: *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [18] FLUENT 6.3 User's Guide, *Fluent Incorporated*, 2006.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	ضریب مقاومت لزجی ($1/m^2$)
b	ضریب مقاومت اینرسی ($1/m$)
E	انرژی کل (J)
h_{bf}	طول آزاد رشته‌های براش سیل (mm)
k	انرژی جنبشی توربولانسی (m^2/s^2)
k_{eff}	ضریب هدایت موثر (w/mk)
p	فشار استاتیک (Pa)
*	فشار بی بعد
p	نسبت فشار
R_p	نسبت فشار
S_h	منبع گرمایی حجمی (w/m^3)
u	مولفه سرعت (m/s)
x	مختصات مکانی (mm)
y	فاصله شعاعی از روتور (mm)
Y	مختصات شعاعی بی بعد
z	مختصات محوری (mm)

علائم یونانی

α	مقاومت اینرسی (kg/m^4)
β	مقاومت لزجی (kg/m^3s)
ε	اتلاف توربولانسی (m^2/s^3)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (Pas)
μ_t	ویسکوزیته توربولانسی (Pas)
ρ	چگالی (kg/m^3)
$(\tau_{ij})_{eff}$	تنش موثر (Pa)

زیرنویس‌ها

d	پایین دست
i	جهت مختصات
j	جهت مختصات
r	جهت شعاعی
u	بالا دست
z	جهت محوری
θ	جهت محیطی

۶- مراجع

- [1] Ferguson J., Brushes as high performance gas turbine seals, in: *ASME 1988 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 1988.
- [2] Bayley, F., Long, C., A combined experimental and theoretical study of flow and pressure distributions in a brush seal, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 115, No. 2, pp. 404-410, 1993.