مطالعه عددی اثرات پارامترهای مختلف سوراخ‌های خنک کاری بر عملکرد حرارتی (راندمان حرارتی یا راندمان خنک کاری) توربین گاز

حسن طهماسبی1 ، آروین شیخ حسنی2\* ، محمد عباسی3

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

\* اراک، صندوق پستی 38137755886، [arwin23rwin@gmail.com](mailto:arwin23rwin@gmail.com)

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

چکیده

افزایش دمای سیال خروجی از محفظه احتراق می‌تواند آثار مخربی بر روی تجهیزات پایین‌دست آن ازجمله پره‌های توربین داشته باشد. روش‌های خنک کاری متعددی به منظور محافظت از قطعات توربین در برابر دمای بالای سیال ورودی استفاده می‌شود. یکی از سامانه‌های محافظتی در برابر دمای بالا، استفاده از جریان ثانویه خنک‌کننده از طریق سوراخ‌هایی است که می‌تواند تأثیر خوبی بر افزایش انتقال حرارت و خنک کردن جریان عبوری از محفظه احتراق ایفا کند. در این مقاله، به مطالعه‌ی عددی اثرات پارامترهای مختلف سازوکار سوراخ‌های خنک کاری با جریان ثانویه بر روی راندمان لایه خنک‌کننده سطح توربین در یک سیلندر مکعب مستطیلی پرداخته می‌شود. نتایج حاصل، مطابقت خوب نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. بر طبق یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی، افزایش تراکم سوراخ‌های خنک کاری (در عرض ثابت) و افزایش قطر روزنه تزریق هوای خنک کاری، راندمان آدیاباتیک خنک کاری را افزایش می‌دهد. همچنین بیشینه مقادیر راندمان خنک کاری در زوایای کوچک‌تر از 20 درجه رخ می‌دهد. با افزایش زاویه، راندمان به‌طور ناگهانی کاهش و مجدداً افزایش می‌یابد. با افزایش دبی جریان خنک کاری، راندمان سیر افزایشی و سپس کاهشی را تجربه می‌کند. در این حالت بیشینه مقدار راندمان در دبی بی‌بعد 0.3 اتفاق می‌افتد.

**کلی**د‌واژگ**ان**

محفظه احتراق؛ مطالعه عددی؛ توربین ؛ خنک کاری لایه‌ای؛ راندمان آدیاباتیک خنک کاری.

Numerical Investigation of Effects of Cooling Hole’s Parameters on the Adiabatic Film-Cooling Effectiveness of Gas Turbine

Hasan Tahmasebi1, Arvin Sheikh Hasani2\*, **Mohammad Abbasi3**

1- Department of Mechanical Engineering, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran

\* P.O.B. 3813775886 Arak, Iran, [arwin23rwin@gmail.com](mailto:arwin23rwin@gmail.com)

3- Department of Mechanical Engineering, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran

Abstract

Increasing the outlet temperature of the combustion chamber can have destructive effects on its downstream equipment, including turbine blades. Many cooling methods are used to protect the turbine compartments exposed to outlet extreme temperature. One of the high-temperature protection systems is the use of secondary coolant flow through holes that can have a great effect on increasing heat transfer and cooling the passing flow through combustion chamber. In this paper, numerical study is performed about effects of different parameters of mechanism of cooling pores in a rectangular cube cylinder. The results show that there is a good fitness between numerical simulation and experimental data. Based on the numerical simulation findings, the increased intensity of cooling pores (with constant width), promotes the effectiveness of adiabatic film-cooling. Furthermore, the maximum values of the cooling effectiveness occur in angels smaller than 20 degree. When the angle is increased, effectiveness of cooling suddenly will increase. Also, the increased flow rate of coolant flow, the adiabatic film-cooling effectiveness increases and then decreases. In this case, maximum value of film cooling efficiency occurred in 0.3 coolant flow rate

Keywords

Combustion Chamber; Numerical Study; Turbine; Film-Cooling; Adiabatic Film-Cooling Effectiveness

1. مقدمه

توربین گاز، یک ماشین دوار است که براساس انرژی گازهای ناشی از احتراق کار می‌کند. هر توربین گاز شامل یک کمپرسور برای فشرده کردن هوا، یک محفظه احتراق برای مخلوط کردن هوا با سوخت و محترق‌ کردن آن و یک توربین برای تبدیل کردن انرژی گازهای داغ و فشرده به انرژی مکانیکی است. افزایش بازده موتورهای توربینی و نسبت قدرت خروجی به وزن همواره اهمیت فراوانی داشته است. با این ‌وجود، افزایش دمای خروجی از محفظه احتراق آثار زیانباری بر قطعات پایین‌دست ازجمله پره‌های توربین دارد. لذا باید با استفاده از سامانه‌هایی مرتبط، لایه محافظتی مؤثری در برابر این قطعات بحرانی ایجاد نمود. خنک کاری توربین می‌تواند به‌وسیله هوا یا مایع خنک کاری صورت بگیرد، خنک کاری با مایع خنک‌کننده به دلیل ظرفیت گرمایی بالاتر مایعات و همچنین خاصیت سردسازی با تبخیر شدن مایع، می‌تواند جذاب‌تر باشد؛ روش‌های زیادی جهت خنک کاری توربین با هوا وجود دارد که می‌توان به روش جابجایی (همرفت)، روش لایه‌ نازک، روش فراتراوی (تعرق)، روش فوران و غیره اشاره کرد که همگی در دو دسته خنک‌کننده داخلی و خنک‌کننده خارجی قرار می‌گیرند. این درحالی‌ است که همه روش‌ها تفاوت‌های خود را دارند. با این‌حال همگی به‌وسیله هوای خنک به‌دست‌آمده از کمپرسور، گرمای پره‌ها و سطوح داخلی توربین را کاهش می‌دهند.

فرآيند خنک کاری لايه‌اي فرآيندي است كه در آن با استفاده از تزريق يك جريان هواي ثانويه به داخل يك محفظه احتـراق، از طريق تعدادي روزنه كه در دیوار محفظه احتـراق قـرار گرفتـه است از تماس مستقيم شعله و گازهاي داغ ناشي از احتراق بـا دیوار محفظه احتراق جلوگيري به عمل مي‌آيد و به اين صورت عمل خنک کاری بر روي دیوار موردنظر صورت می‌گیرد. ايـن روش خنک کاری بـراي اولـين بـار توسـط هوتـورن ، در سـال 1955 ارائه گرديـد [1]. از نخسـتين كارهـاي صـورت گرفته در اين مورد می‌توان به كار تجربي ايكرت و همكاران در سال 1966 اشاره كرد. آن‌ها دو گـاز هـوا و هليـوم را بـراي خنک کاری انتخاب نمودند و بعـد از انجـام آزمون‌های متعـدد نشان دادند كه اثربخشي خنک کاری لايه‌اي در هنگـام اسـتفاده از هليوم نسبت به هوا به‌مراتب بيشتر است [2]. پیترزیک و همکاران [3]، به بررسی اثر نرخ چگالی در جریان همراه با خنک کاری لایه‌ای پرداختند. سينها و همکاران، دست به انجام آزمایش‌های مختلفي زده و رابطه ميان نيمرخ جريان و لايه خنک‌کننده توربين گاز را نشان دادند [4 و 5]. بيسـن و همكـاران [6]، تأثير دماي سيال تزريق شده از روزنه‌هاي محفظه احتراق را بـر روي اثربخشي خنک کاری لايـه‌اي و درصـد گازهـاي ناشـي از احتـراق را مـورد تحقيـق و بررسـي قـرار دادنـد. لایلک و زرکل [7]، به بررسی پاشش جریان عرضی به‌منظور خنک کاری لایه‌ای به‌صورت تجربی و عددی پرداختند. محدوده آزمایش‌های آن‌ها در نسبت طول به قطر لوله 1.75 تا 3.5 و نرخ پاشش 0.5 تا 2 در زاویه پاشش 35 درجه بوده است. وی به بیان جریان پیچیده در نزدیکی سوراخ‌ها می‌پردازد و بیان می‌کند که وجود جریان‌های غیر چرخشی و جت محلی باعث ایجاد جریان‌های بیضوی می‌شود. قدرت این فرایند را ناشی از سه پارامتر نسبت طول به قطر لوله، نرخ پاشش و زاویه نازل بیان می‌کند. بونس همکاران [8]، به بررسی اثر اغتشاش جریان آزاد بر راندمان خنک کاری لایه‌ای پرداختند. هندسه مورد استفاده آن‌ها در این پژوهش، صفحه تختی با تعداد 5 عدد سوراخ خنک کاری بود. زاویه پاشش جریان خنک‌کننده 35 درجه و نسبت طول به قطر لوله‌ها 3.5 در نظر گرفته شد. وی در محدوده نرخ پاشش جریان خنک‌کننده 0.55 تا 1.85 و با تغییرات اغتشاش جریان از 0.9% تا 17% آزمایش‌ها را انجام داد و بیان کرد که جریان با اغتشاش زیاد باعث 50% تا 100% افزایش راندمان خنک کاری لایه‌ای می‌شود. ريدهولم [9] يك محفظه احتراق را ساخت و آزمايش كرد. شرايط آزمايش در این پژوهش به نحوي طراحي شد كه مشابه شرايط واقعي محفظه‌های احتراق باشد. اين مدل از يك رديف سوراخ خنک‌کننده با زاويه 30 درجه نسبت به ديوار به وجود آمد. از طريق اين سوراخ‌ها هواي خنك به درون جريان اصلي پاشيده می‌شود در محفظه‌های احتراق واقعي چند رديف سوراخ خنک‌کننده وجود دارد. با بررسي نتايج آزمايشگاهي، ميدان جريان سه‌بعدی قوي با دو گردابه چرخشي در دو طرف جت مشاهده می‌شود. با افزايش نسبت چگالي گرادیان‌های سرعت كاهش می‌یابند. با كاهش گرادیان‌های سرعت مقدار اغتشاشات موجود كمتر می‌شود. علاوه بر اين نتايج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند كه اغتشاش نزديك سوراخ غير آيزنتروپيك است. تاكور و همكاران [10]، خنک کاری لايه‌اي را در جريان مافوق صوت مـورد تحقيـق و بررسـي قـرار دادند و نشان دادند كه با افزايش عدد مـاخ، ضـريب اصـطكاك پوسته و نرخ انتشار و شدت توربولانس در لایه مرزي موردنظر كاهش پيدا مي‌کند و توزيع يكنواخت سرعت به‌وسیله تزريـق مماســي از طريــق ديــواره‌هــاي متخلخــل، منجــر بــه كــاهش اصطكاك پوسته و كم شدن ميزان اختلاط و درنتیجه بهبـود اثربخشي خنک کاری لايه‌اي مي‌گردد. اميديو و همكاران [11]، يك بانك اطلاعاتي براي طراحي صـحيح و درسـت پارامترهاي روزنه‌هاي چندمنظوره مورد استفاده در خنک کاری لايه‌اي، ارائه دادند كه در آن نسبتي مناسـب بـين هـواي سـرد مصرفي و سطح مطلوب درجه حرارت ديـواره ارائـه شـده اسـت. پنگ و همكاران [12]، طي مقاله‌اي جريان سيال را به چندين قسمت اصلي تقسيم نمودند كـه آن منـاطق عبارت بودند از: ناحیه جريان پشتي، ناحیه اختلاط و ناحیه پيشرو. درنهایت نشان دادند كه ساختار يك جريان سيال می‌تواند متضمن غلظت و تـراكم صـحيح سـوخت در داخـل يـك محفظه احتراق و تأثير صحيح و مناسـب توزيـع هـوا در ميـان روزنه‌هاي رقيق‌كننده با روزنه‌هاي كوچـك خنک کاری باشـد. ليو و همكاران [13]، ايشـان بـا اسـتفاده از روش ديناميك سيالات محاسباتي و با استفاده از بخـش CFX نرم‌افزار Ansys احتـراق و خنک کاری لايـه‌اي در يـك موتـور هوا تنفسی را مورد تحقيق و بررسي قرار دادند و نشان دادند كه رفتار جريان در بعد از هر كدام از روزنه‌هايي كـه بـراي خنک کاری لايه‌اي مورد اسـتفاده قـرار مـي‌گيرنـد، بـه شـرايط وزش جريان و تأثيرات جريـان اصـلي و جريـان رقيـق‌كننـده بسـيار وابسته است. وی و بوگارد [14]، نوع دهانه ورودی لوله هوای خنک کاری به میدان جریان را در مقادیر مختلف نرخ پاشش بررسی کردند. تااو و همكاران [15]، تأثير چـرخش بر روي خنک کاری لايه‌اي را با اسـتفاده از آزمون‌های تجربـي مورد تحقيق و بررسي قرار دادند. آن‌ها نشان دادند كه به خاطر چرخش جريان دو ناحیه فشار و مكش در محفظه احتـراق بـه وجود مي‌آيد، كه در ناحیه فشـار بـا افـزايش سـرعت چـرخش، اثربخشي خنک کاری لايه‌اي آدياباتيك، ابتدا افزايش و سپس كاهش مي‌يابد و اين در حالي است كه در ناحیه مكش اين اثربخشي، به‌سرعت چرخش حساسيتي ندارد. ميچل و همكاران [16]، يك مطالعه تجربـي و عـددي بـر روي پیامدهای يك خنک کاری لايه‌اي بر روي يـك ديـواره بـا روزنه‌هاي فراوان در يك محفظه احتراق ساده شده، انجام دادند. آن‌ها نحوه ورود جريان خنك‌كننده را مـورد تحقيـق و بررسـي قرار دادند. هایس و همکاران [17]، به بررسی خنک کاری لایه‌ای با سوراخ‌های ضد گردابه‌ای پرداختند. آن‌ها اثر شدت توربولانس جریان آزاد در محدوده شدت توربولانس 1% تا 11.7% و نرخ پاشش 0.5 تا 1.5 را مورد بررسی قراردادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش شدت توربولانس باعث افزایش راندمان سوراخ‌های ضد گردابه‌ای می‌شود. همچنین افزایش نرخ پاشش در تمامی شرایط توربولانسی باعث افزایش راندمان خنک کاری می‌شود. سونگ و همکاران [18]، به بررسی تأثیر زاویه نازل و نرخ پاشش در صفحه تخت همراه با زائده ایجادکننده گردابه در پایین‌دست روزنه‌های خنک کاری به‌صورت تجربی پرداختند. آن‌ها زاویه روزنه در محدوده 20 تا 40 درجه را در نرخ پاشش 0.5 تا 1.5 مورد بررسی قراردادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که قرار دادن تیغه در جلو روزنه به علت ایجاد پدیده فرووزش باعث افزایش راندمان خنک کاری تا 248% می‌شود. در شرایط زاویه پاشش 40 درجه با افزایش نرخ پاشش، راندمان خنک کاری به علت جدا شدن لایه هوای خنک از دیواره کاهش می‌یابد.

جین وانگ و همکاران[20] به بررسی عملکرد سوراخهای مختلف فیلم خنک کننده، از جمله سوراخ ترکیبی، سوراخ استوانه، سوراخ مخروطی و سوراخ فن شکل پرداختند. نتایج نشان می دهد که بهترین عملکرد خنک کننده برای سوراخ های مخروطی و فن شکل در نسبت دمیدن 75/0 به دست می آید. راندمان نیروگاه توربین گازی با دمای ورودی توربین افزایش می یابد و دمای کار پره های توربین گازی به 1500 درجه سانتیگراد افزایش می یابد، که به نوبه خود نیاز خنک کننده را افزایش می دهد. بهاراتکمار و همکاران [21] به بررسی تأثیر عیوب در پارامترهای مختلف جریان در توربین گازی پرداختند. یک صفحه مسطح با سوراخ خنک کننده که در زیر فاصله 0.1 میلی متر از لبه اصلی صفحه قرار گرفته است، مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که عیوب 32 درصد کارایی را کاهش می دهد.

یکی از سامانه‌های خنک کاری لایه‌ای استفاده از سوراخ‌هایی است که می‌تواند تأثیر خوبی برافزایش انتقال حرارت به‌ویژه در نسبت‌های بالای جریان داشته باشند. در این پژوهش به مطالعه عددی روی جریان مغشوش، سه‌بعدی، تراکم ناپذیر و سیال غیر دائم درون یک سیلندر مکعب مستطیل دما ثابت با شکل سوراخ‌هایی دایره‌ای شکل بر روی وجوه آن پرداخته می‌شود. این امر به‌منظور بررسی اثرات پارامترهای مختلف سامانه خنک کاری بر روی راندمان حرارتی انجام شده است. به همین منظور پارامترهای قطر سوراخ، نسبت تراکم آن، زاویه پاشش جریان خنک کننده و نسبت دبی جرمی دمش به‌عنوان پارامترهای موثر بر راندمان لایه خنک‌کننده سطح توربین در سیلندر مکعب مستطیلی انتخاب شده است.

2- راندمان آدیاباتیک خنک کاری

در محاسبات انجام شده از راندمان آدیاباتیک خنک کاری در خط مرکزی () استفاده ‌شده است. تعریف آن به‌صورت رابطه (1) است.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

دمای جریان آزاد،  دمای آدیاباتیک دیوار و  دمای سیال خنک کاری است. دمای آدیاباتیک دیواره در خط مرکزی مورد مطالعه قرارگرفته است.

همچنین مقدار دمش هوای سرد به درون محفظه با توجه به رابطه (2) بی‌بعدسازی شده است. این رابطه عبارت‌اند از: حاصل‌ضرب چگالی در سرعت هوای خنک‌کننده به جریان آزاد.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

3- روند حل

3-1- شبیه‌سازی عددی

استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در تحلیل‌های مهندسی به یکی از روش‌های اساسی در حل این قبیل مسائل به شمار میرود. این روش در واقع به‌منظور کاهش هزینه‌های ناشی از روش‌های متداول آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه پژوهش به شرح کامل روش عددی مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود.

3-2-هندسه مدل، تولید شبکه و شرایط مرزی

به‌منظور بررسی پارامترهای مختلف در فرایند سرمایش سطحی (فیلم کولینگ) یک مکعب مستطیل که درون آن هوای داغ جریان دارد، انتخاب ‌شده است. به‌منظور بررسی بهتر نتایج تنها از یک ضلع مکعب تزریق هوای سرد با دبی مشخص به‌وسیله روزنه‌ها انجام می‌شود. شکل 1، جزئیات ابعاد هندسی مدل را نشان می‌دهد. طول محفظه مورد آزمایش 600 میلیمتر، عرض آن 80 میلیمتر و ارتفاع آن 60 میلیمتر است. فاصله مکان تزریق هوای سرد تا ابتدای صفحه 90 میلیمتر است. قطر سوراخ‌ها برابر با 4 میلیمتر و نسبت طول لوله‌های تزریق به قطر سوراخ‌ها برابر با 18 است. فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر 2.85 برابر قطر سوراخ‌ها است. زاویه ورود لوله‌ها به محفظه آزمون برابر با 35 درجه است. در ادامه اثر این پارامترهای ابعادی بر روی راندمان حرارتی لایه خنک‌کننده سطح توربین در سیلندر مکعب مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 1- مدل شماتیک محفظه توربین مورد بررسی الف) نمای مجاور ب) نمای بالا |

شکل 2، شرایط مرزی در مسئله مورد بررسی را نشان میدهد. ورودی هوای داغ به‌صورت شرط مرزی سرعت ورودی با مقدار 115 متر بر ثانیه و دمای 333 کلوین تعریف‌ شده است. همچنین ورودی هوای سرد به‌صورت سرعت ورودی و با دمای 293 کلوین تعریف ‌شده است. برای دیواره‌ها از شرط عدم لغزش استفاده‌ شده و سطح دیواره‌ها عایق فرض شده است. در خروجی نیز از شرط مرزی فشار خروجی استفاده‌ شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 2- شرایط مرزی و دامنه حل در شبیه‌سازی عددی |

تولید هندسه و شبکه‌بندی هندسه موردنظر در نرم‌افزار گمبیت انجام شده است. شبکه‌بندی مورد استفاده به‌صورت هیبرید است که ترکیبی از سلول‌های منشوری پنج‌وجهی و سلول‌ها مکعبی شش‌وجهی است که به‌صورت با سازمان شبکه‌بندی شده است. در شبکه‌بندی سعی شده است در نواحی با گرادیان سرعت و دما، شبکه متراکم‌تر باشد تا تغییرات خواص در این نواحی به‌خوبی تحلیل شود. به‌منظور اطمینان از استقلال نتایج از شبکه، تعداد چهار عدد شبکه‌بندی انجام شده است و نتایج آن به‌صورت شکل 3 ارائه‌ شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 3- منحنی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی |

با توجه به شکل ‏3 از تعداد سلول 516000 عدد به بعد نتایج مستقل از شبکه است. درنتیجه در محاسبات از شبکه محاسباتی با این تعداد سلول استفاده ‌شده است. شکل 4، شبکه نهایی مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد.

|  |
| --- |
| **E:\projects\Mr.Tahmasebi\mesh1.jpg** |
| شکل 4- شبکه نهایی مورد استفاده برای ادامه پژوهش |

* 1. **تنظیمات حل‌گر- شرایط شبیه‌سازی**

شبیه‌سازی عددی به‌منظور تحلیل جریان به‌صورت حجم محدود، سه‌بعدی و به‌وسیله کد تجاری فلوئنت در حالت ناپایا انجام شده است. سیال مورد استفاده در این پژوهش هوا و به‌صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. برای ترم‌های مختلف معادلات از اسکیم تفاضلی بالادست مرتبه دوم و برای حل مسئله از روش فشار مبنا در حالت ضمنی استفاده‌ شده است. از الگوریتم کاپل[[1]](#footnote-1) برای حل میدان جریان استفاده ‌شده است. معادله توربولانس  همراه با معادلات استاندارد دیواره مورد استفاده قرارگرفته است. مطابق شکل 5، با توجه به مقادیر  بر روی دیواره انتخاب معادلات استاندارد دیواره، مناسب این شرایط است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 5- مقادیر موجود بر روی دیواره |

4-نتایج

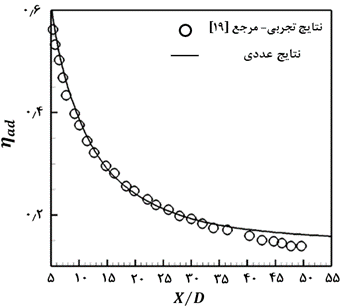
4-1 اعتبارسنجی نتایج عددی

اعتبارسنجی و بررسی صحت نتایج حاصل از حل عددی با نتایج معتبر آزمایشگاهی، پیش از استفاده گسترده از آن‌ها در روند شبیه‌سازی، امری اجتناب‌ناپذیر است. به همین سبب در این قسمت به‌منظور اعتبارسنجی حل عددی، راندمان آدیاباتیک حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی لوتیوم [19]، در شرایط هندسی و مرزی یکسان مورد مقایسه قرارگرفته است. شرایط مورد آزمایش در شکل ‏6 نشان داده شده است. همچنین ابعاد محفظه و روزنه‌های خنک کاری مورد استفاده به‌صورت شکل 7 است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 6- شماتیک اجزای آزمایش [19] |

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏7- ابعاد محفظه و روزنه‌های خنک کاری [19] |

لوتیوم در نسبت‌های مختلف طول لوله خنک کاری به قطر سوراخ و در دبی‌های مختلف آزمایش‌هایی را انجام داد و اثرات آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شرایط این آزمون تجربی در ادامه بیان شده است. در این شرایط هفت عدد سوراخ خنک کاری با قطر 4 میلیمتر در عرض 80 میلیمتر در نظر گرفته ‌شده است. مقدار پارامتر طول میله خنک کاری به قطر آن 18 در نظر گرفته شده است. دبی بی‌بعد هوای خنک کاری 0.52M‌=‌ است. فاصله سوراخ‌های خنک کاری S=11.4 میلیمتر است. زاویه تزریق جریان 35 درجه است. شکل 8، مقایسه راندمان آدیاباتیک کار حاضر با نتایج تجربی مرجع ]19[ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ‏8، حل عددی انجام شده مخصوصاً در نزدیکی روزنه‌ها از اعتبار نتایج بسیار خوب و قابل قبولی برخوردار است.



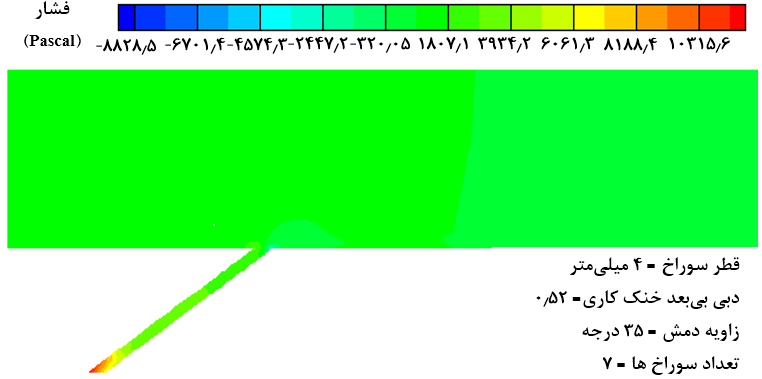
شکل ‏8- مقایسه و اعتبار سنجی حل عددی با نتایج تجربی لوتیوم [19]

شکل 9 کانتور سرعت برای این حالت در صفحه جانبی را نشان می‌دهد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏9- کانتور سرعت در صفحه جانبی  (واحد برحسب m/s) |

با توجه به شکل ‏9 مشاهده می‌شود که جریان هوای خنک کاری درون لوله شتاب گرفته است و سرعت آن نسبت به ورودی افزایش ‌یافته است. این مورد می‌تواند به علت سرعت بالای جریان آزاد باشد که باعث مکش جریان درون لوله شده است. همچنین بیشترین مقدار سرعت در ابتدای ورود هوای خنک‌کننده به میدان است. علت این امر برهم‌کنش دو بردار سرعت می‌تواند باشد. یکی از نکات مهم در این حالت، به هم ریختن لایه ‌مرزی جریان در مکان تزریق هوای خنک‌کننده است. در این حالت جت هوای خنک کاری لایه ‌مرزی را قطع کرده است و هوا به بیرون لایه ‌مرزی تزریق می‌شود.

کانتور فشار استاتیک بر روی صفحه جانبی گذرنده از میدان محاسباتی به‌صورت شکل 10 به دست می‌آید. لازم به ذکر است که کانتور ارائه ‌شده مربوط به فشار استاتیک گیج[[2]](#footnote-2) است و برای محاسبه فشار مطلق بایستی با فشار محیط () جمع شود.



شکل ‏10- کانتور فشار استاتیک بر روی صفحه جانبی گذرنده از میدان محاسباتی (واحد برحسب پاسکال)

|  |
| --- |
| شکل ‏10- کانتور فشار استاتیک بر روی صفحه جانبی گذرنده از میدان محاسباتی (واحد برحسب پاسکال) |

مشاهده می‌شود که در ورودی لوله خنک کاری که سرعت هم کم است، بیشترین مقدار فشار را دارد. با افزایش سرعت جریان فشار نیز کاهش می‌یابد که این مورد با قانون برنولی مطابقت دارد. کانتور دمای استاتیک در صفحه جانبی میدان محاسباتی به‌صورت شکل 11 به دست می‌آید.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 11- کانتور دمای استاتیک در صفحه جانبی (واحد برحسب کلوین) |

با توجه به شکل 11 مشاهده می‌شود که پس از ورود هوای خنک کاری با زاویه 35 درجه به محیط محفظه آزمون، زاویه برآیند جت هوای خنک کاهش ‌یافته و به دیواره نزدیک شده است. البته در ادامه با توجه به گرم بودن دیواره محفظه آزمون دمای سیال خنک کاری نزدیک دیواره افزایش ‌یافته است. به‌منظور بررسی بهتر دمای دیواره، کانتور دما نمای بالایی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری در شکل ‏12 رسم شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 12- کانتور دمای استاتیک بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری (واحد برحسب کلوین) |

با توجه به شکل ‏12 مشاهده می‌شود که با خنک کاری علاوه بر کاهش دمای دیواره در راستای روزنه، دمای دیواره در فاصله بین سوراخ‌ها نیز کاهش ‌یافته است.

* 1. **4-2 بررسی پارامترهای مختلف سوراخ‌های خنک کاری بر روی راندمان حرارتی محفظه**

به‌منظور بررسی ساختارهای مختلف سوراخ‌های خنک‌کننده شرایط مختلف مطابق جدول 1 مورد تحلیل قرارگرفته است. در مطالعات پارامتری عموماً ابعاد هندسی به‌صورت بی‌بعد تعریف می‌گردند. بی‌بعدسازی پارامترهای ساختاری به‌وسیله قطر روزنه‌های تزریق هوای سرد انجام شده است. در این پژوهش دو پارامتر قطر سوراخ و تعداد سوراخ در عرض ثابت خنک کاری، به‌عنوان پارامترهای ساختاری سوراخ خنک کاری و همچنین دو پارامتر زاویه تزریق هوا به داخل محفظه و دبی بی‌بعد شده‌ی جریان خنک کاری، به‌عنوان پارامترهای مؤثر دیگر این روش، بر روی راندمان حرارتی در نظر گرفته شده‌اند. از طرفی با توجه به نتایج لوتیوم [19] مقدار نسبت طول لوله تزریق گاز خنک‌کننده به قطر آن در راندمان خنک کاری تأثیر دارد که روند تغییر آن در مرجع [19] ذکر شده است. به‌منظور عدم تأثیر آن بر نتایج، تحلیل‌ها در شرایط ثابت انجام شده است.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول 1- پارامترهای مؤثر سوراخ‌های تزریق جریان خنک‌کننده و طرح‌های آزمایشی مورد بررسی | | | | | |
| شماره نمونه | قطر سوراخ d (mm) | فاصله سوراخ‌ها S (mm) | تعداد سوراخ در طول ثابت | زاویه تزریق (درجه) θ | دبی دمش بی‌بعد  M |
| 1 | 4 | 16 | 5 | 35 | 0.52 |
| 2 | 4 | 11.4 | 7 | 35 | 0.52 |
| 3 | 4 | 8.889 | 9 | 35 | 0.52 |
| 4 | 3 | 11.4 | 7 | 35 | 0.52 |
| 5 | 4 | 11.4 | 7 | 35 | 0.52 |
| 6 | 5 | 11.4 | 7 | 35 | 0.52 |
| 7 | 6 | 11.4 | 7 | 35 | 0.52 |
| 8 | 4 | 11.4 | 7 | 20 | 0.52 |
| 9 | 4 | 11.4 | 7 | 35 | 0.52 |
| 10 | 4 | 11.4 | 7 | 50 | 0.52 |
| 11 | 4 | 11.4 | 7 | 65 | 0.52 |
| 12 | 4 | 11.4 | 7 | 35 | 0.2 |
| 13 | 4 | 11.4 | 7 | 35 | 0.3 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 15 | 4 | 11.4 | 7 | 35 | 0.52 |

شایان‌ذکر است در جدول 1، حالت 5 مشابه حالت 2 است. این امر به‌منظور مقایسه دوباره انجام گرفته است. نتایج حالات فوق در ادامه ارائه‌ شده است.

در طول مطالعه و برای تمامی حالت‌های موجود، نسبت طول لوله تزریق گاز خنک‌کننده به قطر آن ثابت و مقدار آن 18 در نظر گرفته شده است. همچنین دمای هوای داغ ورودی 333 کلوین و دمای هوای خنک کاری 293 کلوین است.

* + 1. **بررسی اثر تعداد سوراخ‌های خنک کاری در عرض ثابت**

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر راندمان خنک کاری در ساختار سوراخ‌های خنک‌کننده دیواره، تعداد سوراخ‌ها در عرض ثابت صفحه است. در این قسمت به بررسی اثر تعداد سوراخ بر روی راندمان آدیاباتیک خنک کاری در طول ثابت صفحه پرداخته می‌شود. مطابق حالت‌های 1 تا 3 در جدول 1، تعداد 5، 7 و 9 سوراخ با قطر 4 میلی‌متر در زاویه تزریق 35 درجه و دبی بی‌بعد دمش 0.52، در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد عرض کانال ثابت و مقدار آن 80 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جدول 2، اثر تعداد سوراخ‌ها در عرض ثابت بر روی راندمان خنک کاری در طول محفظه را نشان می‌دهد.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول 2- نتایج اثر تعداد سوراخ در عرض ثابت بر راندمان خنک کاری صفحه | | | | |
| شماره نمونه | فاصله سوراخ‌ها  S  (میلی‌متر) | تعداد سوراخ در طول ثابت | متوسط دمای سطح خنک شده (کلوین) | راندمان حرارتی متوسط سطح خنک شده |
| 1 | 16 | 5 | 330.0252 | 0.074369542 |
| 2 | 11.4 | 7 | 328.69437 | 0.10764117 |
| 3 | 8.889 | 9 | 325.6176 | 0.18456058 |

مشاهده می‌شود که با افزایش تراکم سوراخ‌های خنک کاری راندمان آدیاباتیک خنک کاری افزایش می‌یابد. همچنین نمودار تغییرات این پارامتر در طول صفحه به‌صورت شکل 13 رسم شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏13- نمودار تغییرات راندمان خنک کاری در تعداد سوراخ مختلف خنک کاری |

با توجه به شکل ‏13 مشاهده می‌شود که تعداد روزنه تزریق گاز خنک‌کننده در فواصل نزدیک روزنه خنک کاری تأثیر چندانی ندارد؛ اما با دور شدن از روزنه، افزایش تعداد سوراخ باعث افزایش راندمان خنک کاری شده است. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش فاصله سوراخ‌ها، از 16 به 11.4 میلی‌متر، راندمان آدیاباتیک خنک کاری در فاصله = 100 از مکان روزنه 15% افزایش ‌یافته است. با کاهش بیشتر فواصل از تعداد 7 به 9 سوراخ، راندمان آدیاباتیک خنک کاری در فاصله = 100 از مکان روزنه 40% افزایش ‌یافته است. همچنین در این حالت، مقدار افزایش راندمان آدیاباتیک خنک کاری در نزدیک سوراخ نسبت به دو حالت قبل نیز چشمگیر است.

شکل‌ 14 الف و ب، کانتور دمای استاتیک در صفحه جانبی به‌ترتیب برای حالت های تعداد 5 و 9 سوراخ را نشان می‌دهند.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 14- کانتور دمای استاتیکی صفحه جانبی محفظه در حضور الف) 5 سوراخ ب) 9 سوراخ |

با توجه به شکل 14 الف و ب، مشاهده می‌شود که پس از ورود هوای خنک کاری با زاویه 35 درجه به محیط محفظه آزمون، زاویه برآیند جت هوای خنک کاهش ‌یافته و به دیواره نزدیک شده است. البته در ادامه با توجه به گرم بودن دیواره محفظه آزمون دمای سیال خنک کاری نزدیک دیواره افزایش ‌یافته است. به‌منظور بررسی بهتر دمای دیواره، کانتور دما بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری در شکل ‏15 رسم شده است. با توجه به شکل 15-الف، مشاهده می‌شود که در حالت 5 سوراخ، خنک کاری فقط باعث کاهش دمای دیواره در راستای روزنه شده است و دمای دیواره در فاصله بین سوراخ‌ها چندان کاهش نیافته است. این در حالی است که مطابق شکل 15-ب، با افزایش تعداد سوراخ‌ها، علاوه بر کاهش دمای دیواره در راستای روزنه، دمای دیواره در فاصله بین سوراخ‌ها نیز کاهش ‌یافته است.

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
| شکل 15- کانتور دمای استاتیک بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری الف) 5 سوراخ ب) 9 سوراخ (واحد برحسب کلوین) |

* + 1. **بررسی اثر قطر سوراخ خنک کاری**

یکی از پارامترهای دیگر تأثیرگذار بر راندمان خنک کاری، قطر سوراخ‌های خنک کاری است. در این قسمت به بررسی اثر قطر سوراخ بر روی راندمان آدیاباتیک خنک کاری در طول ثابت صفحه پرداخته می‌شود. مطابق حالت‌های 4 تا 7 در جدول 1، اقطار 3، 4، 5، 6 برای سوراخ‌های خنک کاری در تعداد ثابت 7 سوراخ، زاویه تزریق 35 درجه و دبی بی‌بعد دمش 0.52، در نظر گرفته شده است. جدول 3، اثر اقطار مختلف سوراخ در عرض ثابت بر روی راندمان خنک کاری و متوسط دمای سطح خنک شونده را نشان می‌دهد.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول 3- نتایج اثر قطر سوراخ‌های خنک کاری در عرض ثابت بر راندمان خنک کاری صفحه | | | | |
| شماره نمونه | قطر سوراخ‌ها  (میلی‌متر) d | فاصله سوراخ‌ها (میلی‌متر)  s | متوسط دمای سطح خنک شده (کلوین) | راندمان حرارتی متوسط سطح خنک شده |
| 4 | 3 | 11.4 | 329.9203 | 0.07699324 |
| 5 | 4 | 11.4 | 328.6944 | 0.1076412 |
| 6 | 5 | 11.4 | 327.5411 | 0.1364729 |
| 7 | 6 | 11.4 | 325.1821 | 0.1954476 |

مشاهده می‌شود که با افزایش قطر روزنه تزریق هوای خنک کاری، راندمان آدیاباتیک خنک کاری افزایش یافته است. همچنین نتایج این بررسی، به‌صورت شکل ‏16 ارائه ‌شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 16- بررسی اثر قطر سوراخ‌های خنک کاری بر راندمان خنک کاری |

با توجه به شکل 16 مشاهده می‌شود که تغییر قطر روزنه تأثیر مستقیم بر راندمان خنک کاری دارد. برخلاف اثر تعداد سوراخ خنک‌کننده، تغییر قطر سوراخ‌ها باعث تغییر راندمان خنک کاری در نزدیکی سوراخ‌ها نیز شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر سوراخ از 3 به 4 میلی‌متر، راندمان آدیاباتیک آن در حدود 50%، با افزایش قطر سوراخ از 4 به 5 میلی‌متر، راندمان آدیاباتیک خنک کاری در حدود 20% و با افزایش قطر سوراخ از 5 به 6 میلی‌متر، راندمان خنک کاری در حدود 38% افزایش ‌یافته است. نمودار تغییرات راندمان خنک کاری برحسب نسبت فاصله بی‌بعد (برحسب قطر) روزنه‌ها از یکدیگر‌، برای هفت حالت اولیه موجود در طرح آزمایش، به‌صورت شکل ‏17 رسم شده است. مطابق شکل 17 مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بی‌بعد سوراخ‌ها نسبت به یکدیگر، راندمان آدیاباتیک خنک کاری افزایش می‌یابد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏17- تغییرات راندمان نسبت به فاصله بی‌بعد سوراخ ها از یکدیگر (بی‌بعد سازی نسبت به قطر سوراخ) |
| شکلهای 18 الف و ب، به‌ترتیب کانتور دمای استاتیکی در صفحه جانبی برای سوراخ با اقطار 3 و 6 میلی‌متر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 18 الف و ب، مشاهده می‌شود که پس از ورود هوای خنک کاری با زاویه 35 درجه به محیط محفظه آزمون، زاویه برآیند جت هوای خنک کاهش ‌یافته و به دیواره نزدیک شده است. در ادامه با توجه به گرم بودن دیواره محفظه آزمون دمای سیال خنک کاری نزدیک دیواره افزایش ‌یافته است. به‌منظور بررسی بهتر دمای دیواره، کانتور دما بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری مطابق 19 رسم شده است. با توجه به شکل 19-الف، مشاهده می‌شود که خنک کاری فقط باعث کاهش دمای دیواره در راستای روزنه شده است و دمای دیواره در فاصله بین سوراخ‌ها چندان کاهش نیافته است. این در حالی است که مطابق شکل 19-ب، با افزایش قطر سوراخ خنک کاری، علاوه بر کاهش دمای دیواره در راستای روزنه، دمای دیواره در فاصله بین سوراخ‌ها نیز کاهش ‌یافته است. |
|  |
|  |
| شکل 18- کانتور دمای استاتیک در صفحه جانبی برای حالت‌های الف) قطر سوراخ 3 میلی‌متری ب) قطر سوراخ 6 میلی‌متری |

|  |
| --- |
|  |
|  |
| شکل 19- کانتور دما بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری برای حالت‌های الف) قطر سوراخ 3 میلی‌متری ب) قطر سوراخ 6 میلی‌متری |

**4-2- 3بررسی اثر زاویه تزریق هوای خنک‌کننده**

ازجمله عوامل تأثیرگذار بر طول نفوذ جت خنک‌کننده به درون جریان سیال داغ و تأثیر بر راندمان خنک کاری، زاویه تزریق هوای خنک کاری است. با کاهش زاویه تزریق انتظار می‌رود هوای خنک کاری در نزدیکی دیواره باقی‌مانده و از دیواره دور نشود. این حالت باعث کاهش بیشتر دمای دیواره می‌شود.

جدول 4، مجموعه حالت‌های مختلف زاویه تزریق هوای خنک‌کننده بر راندمان آدیاباتیک خنک‌کننده را نشان می‌دهد.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول 4- نتایج اثر زوایای مختلف تزریق سیال خنک کاری بر راندمان خنک کاری صفحه | | | | |
| شماره نمونه | قطر سوراخ‌ها (میلی‌متر) d | زاویه تزریق (درجه)  θ | متوسط دمای سطح خنک شده (کلوین) | راندمان حرارتی متوسط سطح خنک شده |
| 8 | 4 | 20 | 326.2583 | 0.1685421 |
| 9 | 4 | 35 | 328.6944 | 0.1076412 |
| 10 | 4 | 50 | 327.8275 | 0.1293115 |
| 11 | 4 | 65 | 327.0848 | 0.1478809 |

مشاهده می‌شود که زاویه‌های کوچک‌تر تزریق جریان دارای بیشترین راندمان خنک کاری هستند. در زاویه حمله حدود 20 درجه هوای خنک کاری به درون لایه ‌مرزی تزریق می‌شود؛ اما با افزایش زاویه تزریق، هوای خنک کاری به بیرون لایه ‌مرزی جریان هدایت شده است. در ادامه با افزایش زاویه تزریق و به علت مغشوش کردن جریان در این نواحی راندمان به‌صورت تدریجی افزایش یافته است. شکل 20، منحنی اثر زاویه تزریق نسبت به راندمان آدیاباتیک خنک کاری را نشان می‌دهد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 20- اثر زاویه تزریق بر روی راندمان خنک کاری |

مشاهده می‌شود که در زاویه‌های کوچک تزریق جریان خنک‌کننده، راندمان خنک کاری در نزدیکی روزنه بیشتر از زاویه‌های بالای تزریق است. در فواصل دورتر از روزنه‌ها، با افزایش زاویه تزریق ابتدا راندمان آدیاباتیک افزایش ‌یافته است و سپس کاهش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده این مورد است که مقدار زاویه تزریق دارای حالت بهینه‌ای است.

به‌منظور بررسی جامع‌تر اثر زاویه تزریق جریان بر راندمان حرارتی، کانتورهای دما در صفحات بالا و جانبی دیواره برای دو حالت زاویه تزریق 20 و 65 درجه در نظر گرفته شد. با توجه به شکل 21 الف و ب، مشاهده می‌شود که پس از ورود هوای خنک کاری در زوایای مختلف به محیط محفظه آزمون، زاویه برآیند جت هوای خنک کاهش ‌یافته و به دیواره نزدیک شده است. البته در ادامه با توجه به گرم بودن دیواره محفظه آزمون دمای سیال خنک کاری نزدیک دیواره افزایش ‌یافته است. به‌منظور بررسی بهتر دمای دیواره، کانتور دما بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری مطابق 22 رسم شده است. با توجه به شکل 22 الف و ب، مشاهده می‌شود که در زوایای مختلف تزریق جریان خنک‌کننده، علاوه بر کاهش دمای دیواره در راستای روزنه، دمای دیواره در فاصله بین سوراخ‌ها نیز کاهش‌ محسوسی می‌یابد.

|  |
| --- |
|  |
|  |
| شکل ‏21- کانتور دمای استاتیک در صفحه جانبی برای زوایای دمش الف) 20 درجه ب) 65 درجه |
|  |
|  |
| شکل 22- کانتور دمای استاتیک بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری برای زوایای دمش الف) 20 درجه ب) 65 درجه |

* + 1. **بررسی اثر دبی گاز خنک‌کننده**

دبی بی‌بعد گاز خنک‌کننده همان‌طور که در رابطه (2) اشاره شد عبارت است از نسبت حاصل‌ضرب سرعت در چگالی گاز خنک‌کننده به جریان آزاد.

به‌منظور بررسی اثر دبی گازهای خنک‌کننده، دبی‌های مختلف گاز خنک‌کننده مورد بررسی قرارگرفته است. شرایط هندسی مورد استفاده برای این تحلیل‌ها به‌صورت قطر سوراخ‌های خنک کاری 4 میلی‌متر، تعداد سوراخ خنک کاری 7 عدد، نسبت فاصله لوله‌ها به قطر لوله 2.85 و زاویه تزریق 35 درجه است. شرایط مختلف دبی تزریقی به‌صورت جدول 5 در نظر گرفته شده است.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول 5- نتایج اثر دبی بی‌بعد دمش جریان خنک‌کننده بر راندمان خنک کاری صفحه | | | | |
| شماره نمونه | قطر سوراخ‌ها (میلی‌متر)  d | دبی بی‌بعد دمش  M | متوسط دمای سطح خنک شده (کلوین) | راندمان حرارتی متوسط سطح خنک شده |
| 12 | 4 | 0.2 | 326.7629 | 0.1559282 |
| 13 | 4 | 0.3 | 326.4177 | 0.1645581 |
| 14 | 4 | 0.4 | 327.3211 | 0.141973 |
| 15 | 4 | 0.52 | 328.6944 | 0.1076412 |

مشاهده می‌شود که با افزایش دبی خنک کاری، ابتدا راندمان افزایش و سپس کاهش یافته است. بیشترین مقدار راندمان حرارتی در این شرایط هندسی مربوط به دبی بی‌بعد 0.3 است.

همچنین تغییرات راندمان آدیاباتیک نسبت به مکان در مقادیر مختلف دبی خنک کاری مختلف در شکل 23 رسم شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 23- تغییرات راندمان آدیاباتیک نسبت به مکان در مقادیر مختلف دبی بی‌بعد جریان خنک کاری |

مطابق شکل 23 مشاهده می‌شود که با افزایش دبی اثر آن بر روی راندمان خنک کاری در فواصل نزدیک روزنه با فواصل دورتر از روزنه متفاوت است. در فواصل نزدیک روزنه تزریق هوای خنک‌کننده، با افزایش دبی ابتدا راندمان افزایش ‌یافته سپس کاهش می‌یابد؛ اما در فواصل دورتر با افزایش دبی راندمان خنک کاری افزایش می‌یابد.

|  |
| --- |
| شکل‌های 24 و 25 به ترتیب کانتورهای دمای استاتیک در صفحه جانبی و نمای بالای محفظه آزمون در دو دبی بی‌بعد دمش 0.2 و 0.52 را نشان می‌دهند. مطابق شکل 24 الف و ب، در هر دو حالت دبی بی‌بعد 0.2 و 0.52، پس از ورود هوای خنک کاری با زاویه 35 درجه به محیط محفظه آزمون، زاویه برآیند جت هوای خنک کاهش ‌یافته و به دیواره نزدیک شده است. در ادامه با توجه به گرم بودن دیواره محفظه آزمون دمای سیال خنک کاری نزدیک دیواره افزایش ‌یافته است. به‌منظور بررسی بهتر دمای دیواره، کانتور دما بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری مطابق ‏25 رسم شده است. با توجه به شکل‌های 25 مشاهده می‌شود که با خنک کاری علاوه بر کاهش دمای دیواره در راستای روزنه، دمای دیواره در فاصله بین سوراخ‌ها نیز مقداری کاهش می‌یابد. |
|  |
|  |
| شکل 24- کانتور دمای استاتیک در صفحه جانبی برای دبی بی‌بعد دمش الف) 0.2 ب) 0.52 |

|  |
| --- |
|  |
|  |
| شکل 25- کانتور دمای استاتیک بر روی دیواره در نزدیکی روزنه‌های خنک کاری برای دبی‌ بی‌بعد دمش الف) 0.2 ب) 0.52 |

**جمع­بندی و نتیجه­گیری**

یکی از سامانه‌های خنک کاری لایه‌ای استفاده از سوراخ‌هایی است که می‌تواند تأثیر خوبی برافزایش انتقال حرارت به‌ویژه در نسبت‌های بالای جریان داشته باشند. در این پژوهش به بررسی عددی اثر پارامترهای مختلف موجود در سامانه خنک کاری سوراخ‌های تزریق سیال ثانویه پرداخته شد. شبیه‌سازی عددی روی جریان مغشوش، سه‌بعدی، تراکم ناپذیر و سیال غیر دائم درون یک سیلندر مکعب مستطیل دما ثابت با شکل سوراخ‌هایی دایره‌ای شکل بر روی وجوه آن انجام پذیرفت. بر طبق مشاهدات شبیه‌سازی عددی، نتایج حاصل از حل عددی به‌خوبی با نتایج آزمایشگاهی تطبیق دارد. افزایش تراکم و قطر سوراخ‌های خنک کاری سبب افزایش راندمان آدیاباتیک خنک کاری می‌شود. در زوایای تزریق سیال ثانویه کوچک‌تر از 20 درجه، راندمان خنک کاری بیشترین مقدار است، با افزایش زاویه تزریق سیال ثانویه، راندمان به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد در زاویه حمله حدود 20 درجه هوای خنک کاری به درون لایه‌ مرزی تزریق می‌شود؛ اما با افزایش زاویه تزریق، هوای خنک کاری به بیرون لایه‌ مرزی جریان هدایت می‌شود. در ادامه با افزایش زاویه تزریق و به علت مغشوش کردن جریان در این نواحی راندمان به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی خنک کاری، ابتدا راندمان افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت این امر نیز در تزریق جریان ثانویه هوا درون لایه مرزی در دبی‌های کم و مغشوش شدن جریان در دبی‌های بالا است. شایان‌ذکر است بیشترین مقدار راندمان حرارتی در دبی بی‌بعد دمش 0.3 اتفاق می‌افتد.

1. **فهرست علائم**

|  |  |
| --- | --- |
|  | دما،K |
|  | چگالی، Kg/ m3 |
|  | سرعت، m/s |
|  | دبی (بی‌بعد شده) دمش |
| **علائم یونانی** |  |
|  | راندمان |
| *θ* | زاویه دمش، Degree |
| **زیرنویس‌ها** |  |
|  | آدیاباتیک |
|  | سیال خنک کاری |
|  | جریان آزاد |
|  | دیواره |
|  | خنک کاری |

6- مراجع

[1] Karcz M, Badur J (2003) An alternative turbulent heat flux modelling for gas turbine cooling application. *Transaction of the IFFM* 113: 201-212.

[2] Goldstein R, Rask R, Eckert E (1966) Film cooling with helium injection into an incompressible air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 9: 1341-1350.

[3] Pietrzyk J, Bogard D, Crawford M (1989) Effects of density ratio on the hydrodynamics of film cooling. *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*.

[4] Sinha A, Bogard D, Crawford M (1991) Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio. *ASME J. Turbomach* 113: 442-449.

[5] Sinha A, Bogard D, Crawford M (1991) Gas turbine film cooling: flowfield due to a second row of holes. *ASME J. Turbomach* 113: 450-456.

[6] Bicen A, Tse D, Whitelaw J (1990) Combustion characteristics of a model can-type combustor. *combustion and Flame* 80: 111-125.

[7]     J, Leylek J, Zerkle R (1993) Discrete-jet film cooling: a comparison of computational results with experiments. *1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*.

[8]  Bons J P, MacArthur C D, Rivir R B (1994) The effect of high freestream turbulence on film cooling effectiveness. *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*.

[9]  Rydholm H A (1996) An experimental investigation of the velocity and temperature fields of cold jets injected into a hot crossflow. *International Gas Turbine* *and Aeroengine Congress and Exhibition*.

[10]  Schuchkin V, Osipov M, Shyy W, Thakur S (2002) Mixing and film cooling in supersonic duct flows. *International journal of heat and mass transfer* 45: 4451-4461.

[11]  Leger B, Miron P, Emidio J (2003) Geometric and aero-thermal influences on multiholed plate temperature: application on combustor wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46: 1215-1222.

[12]  Li L, Liu T, Peng X (2005) Flow characteristics in an annular burner with fully film cooling. *Applied thermal engineering* 25: 3013-3024.

[13]  Li L, Peng X, Liu T (2006) Combustion and cooling performance in an aero-engine annular combustor. *Applied Thermal Engineering* 26: 1771-1779.

[14] Waye S K, Bogard D G (2007) High-resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations. *Journal of Turbomachinery* 129: 294-302.

[15]  Tao Z, Yang X, Ding S, Xu G, Wu H, Deng Het al (2008)Experimental study of rotation effect on film cooling over the flat wall with a single hole. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32: 1081-10.

[16]  Michel B, Gajan P, Strzelecki A, Savary N, Kourta A, Boisson H C (2009) Full coverage film cooling using compound angle. *Comptes Rendus Mécanique* 337: 562-572.

[17]  Hayes S A, Nix A C, Nestor C M, Billups D T, Haught S M (2017) Experimental investigation of the influence of freestream turbulence on an anti-vortex film cooling hole. *Experimental Thermal and Fluid Science* 81: 314-326.

[18] Song L, Zhang C, Song Y, Li J, Feng Z (2017) Experimental investigations on the effects of inclination angle and blowing ratio on the flat-plate film cooling enhancement using the vortex generator downstream. *Applied Thermal Engineering* 119: 573-584.

[19]  Lutum E, Johnson B V (1998) Influence of the hole length-to-diameter ratio on film cooling with cylindrical holes. *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*.

[20] Jin Wang, Ke Tian, Jing Luo & Bengt Sundén (2019) Effect of hole configurations on film cooling performance. *NUMERICAL HEAT TRANSFER.*

[21] H. Bharathkumar, J. Jensin Joshua, P. Booma Devi & D. Raja Joseph (2019) Effect of cooling passage imperfection on the flow

characteristics of film-cooled gas turbine blade*. International Journal of Ambient Energy*

1. Coupled [↑](#footnote-ref-1)
2. Gauge [↑](#footnote-ref-2)