



## تحلیل عددی تأثیر محرک پلاسما بر کارایی خنک کاری لایه‌ای روی مدل صفحه تخت

سامرا دولتی، نیما امانی‌فرد، حامد محدث دیلمی\*

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ آبان ۱۳۹۴  
بازنگری: ۲۱ بهمن ۱۳۹۴  
پذیرش: ۹ اسفند ۱۳۹۴  
ارائه آنلاین: ۲۰ مرداد ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

خنک کاری لایه‌ای  
محرک پلاسما  
کارایی آدیباتیک  
تحلیل عددی

**چکیده:** در مقاله حاضر، تأثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و دما در خنک کاری لایه‌ای روی مدل صفحه تخت به صورت عددی و با روش حجم محدود بررسی شده است. جریان به صورت دوبعدی، آشفتگی، تراکم‌ناپذیر و پایدار در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از یک شبکه سازمان‌یافته و غیریکنواخت و مدل آشفتگی کی - اپسیلون رینولدز پایین انجام شده است. مسئله حاضر در زاویه تزریق ۳۵ درجه، نسبت طول به قطر سوراخ تزریق ۵ و نسبت چگالی ۱/۲ تحلیل شده است. میدان جریان و دما در نسبت دمش‌ها و ولتاژهای ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر پارامترهای هندسی محرک پلاسما و موقعیت قرارگیری محرک بر کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای مطالعه شده است. بر اساس نتایج حاصل، محرک پلاسما بر کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای در نسبت دمش‌های پایین‌تر موثرتر می‌باشد و با افزایش ولتاژ اعمالی نیز اثر محرک پلاسما بر خنک کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله قرارگیری محرک نسبت به سوراخ تزریق، اثرگذاری آن بر کارایی کاهش می‌یابد. برخلاف کارهای مشابه، این مطالعه پارامترهای هندسی محرک پلاسما را نیز بررسی می‌کند. مطابق نتایج، افزایش ضخامت دی الکتریک باعث افزایش کمی در راندمان خنک کاری می‌گردد، اما کاهش فاصله طولی الکترودها مقدار متوسط کارایی خنک کاری لایه‌ای را افزایش می‌دهد.

### ۱- مقدمه

امروزه به‌منظور تولید توان بیشتر، طراحی توربین‌های گازی نوین به گونه‌ای است که اجزای آن‌ها تحت دماهای بسیار بالای گازهای حاصل از احتراق قرار می‌گیرند. این امر به‌واسطه پیشرفت‌های متالورژی و خنک کاری اجزای توربین امکان‌پذیر شده است. خنک کاری لایه‌ای یکی از مؤثرترین روش‌های خنک کاری خارجی پره‌های توربین گازی است که تحت دماهای بسیار بالا قرار دارند. در این روش با تزریق بخشی از هوای خنک خروجی از کمپرسور به داخل لایه مرزی حاصل از جریان گازهای داغ خروجی از محفظه احتراق، یک لایه محافظ در امتداد سطح پره تشکیل می‌شود. بنابراین انتقال حرارت از جریان اصلی گازهای داغ به سطح پره کاهش و کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در حوزه خنک کاری لایه‌ای بر روی پارامترهای جریانی و هندسی اثرگذار بر عملکرد خنک کاری لایه‌ای و با هدف تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر و افزایش کارایی این روش روی پره توربین و یا مدل صفحه تخت صورت گرفته است. ارتباط بین کارایی خنک کاری لایه‌ای و پارامترهای مؤثر لزوماً خطی نبوده و تأثیر هم‌زمان دو یا چند پارامتر مؤثر که ارتباطی غیرخطی دارند، سبب پیچیدگی تحلیل جریان می‌شود. از جمله مطالعات انجام شده در زمینه خنک کاری لایه‌ای می‌توان به کار تجربی سینها و همکاران [۱] اشاره کرد که تزریق از طریق یک ردیف سوراخ استوانه‌ای مجزا تحت زاویه ۳۵ درجه بر روی مدل صفحه تخت، برای مقادیر نسبت دمش ۱-۲۵/۰ و نسبت چگالی

۲-۱/۲ را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تأثیر جدایی جریان تزریقی بر کارایی خنک کاری لایه‌ای روی خط مرکزی ( $\eta_c$ ) بر حسب مختصه طولی  $x/D$  در نسبت مومنت‌های متفاوت مطالعه شده است. آن‌ها گزارش کردند که کاهش نسبت چگالی و افزایش نسبت شار مومنت سبب کاهش انتشار جت تزریقی و نهایتاً کاهش متوسط کارایی خنک کاری لایه‌ای ( $\eta$ ) می‌شود. پیترزیک و همکاران [۲] نیز به‌طور تجربی جریان ناشی از جت تزریقی مایل به داخل جریان اصلی گذرنده از روی مدل صفحه تخت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتایج نسبتاً جامعی در مورد میدان سرعت در کل ناحیه مورد بررسی شامل بالادست جت تزریقی، منطقه تقابل جت و جریان اصلی و پایین‌دست سوراخ تزریق، ارائه دادند و بر تأثیر شدید نسبت چگالی در شکل‌گیری میدان جریان تأکید نمودند. والترز<sup>۱</sup> و لیلک<sup>۲</sup> [۳] به‌صورت عددی تأثیر خنک کاری لایه‌ای بر افت آیرودینامیکی در توربین را با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که مدل کی - اپسیلون ریلیزبل<sup>۳</sup> از دقت مناسب‌تری نسبت به دیگر مدل‌های کی - اپسیلون برخوردار است. نقاش‌نژاد و همکاران [۴] با بهره‌گیری از نتایج تحلیل عددی و استفاده از شبکه‌های عصبی از نوع الگوریتم ژنتیک، یک رابطه ریاضی پیوسته برای کارایی خنک کاری لایه‌ای بر حسب پارامترهای جریانی و هندسی ارائه نمودند.

1 Walters  
2 Leylek  
3 Realizable k-ε

موردتوجه بسیاری از محققان شده است [۱۶-۱۴]. نیروی حجمی تولیدی توسط محرک پلاسما با تولید یک لایه پلاسما و در نتیجه انحراف سیال خنک‌کننده به سمت سطح پره، کارایی خنک‌کاری لایه‌ای را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد. یو<sup>۲</sup> و همکاران [۱۶]، به‌صورت عددی اثرات آیرودینامیکی محرک پلاسما را به‌منظور بهبود عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای از طریق یک سوراخ استوانه‌ای بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که سرعت و نسبت دمش تأثیر بسزایی بر راندمان خنک‌کاری لایه‌ای دارند. آن‌ها سپس به بررسی تأثیر موقعیت و تعداد محرک‌های پلاسما پرداختند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که به دلیل اثر حرارتی محرک آیرودینامیکی پلاسما، در ناحیه پیرامون محرک، کارایی خنک‌کاری پایین‌تر از حالت بدون استفاده از محرک می‌باشد. برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر کارایی محرک پلاسما شامل مشخصات هندسی و جنس الکترودها و ماده دی‌الکتریک، ولتاژ اعمالی، شکل موج ولتاژ، فرکانس‌های امواج انتقالی و تحریک، سیکل کاری و غیره است. ضمناً پارامترهای هندسی و جریانی خنک‌کاری لایه‌ای شامل قطر سوراخ تزریق، نسبت طول به قطر سوراخ تزریق، نسبت دمش، نسبت چگالی و غیره می‌باشد.

در مطالعه حاضر با انگیزه از توضیحات ارائه شده، به بررسی عددی اثرات محرک پلاسما بر میدان جریان و دما به ازای تغییرات پارامتر جریانی نسبت دمش ( $M = \rho_c V_c / \rho_m V_m$ )، پارامتر الکتریکی ولتاژ ورودی و پارامتر هندسی محل قرارگیری محرک پلاسما نسبت به خروجی سوراخ تزریق در نسبت چگالی ۱/۲، در حالت تزریق از طریق یک سوراخ استوانه‌ای پرداخته شده است. برخلاف کارهای مشابه، عملکرد محرک پلاسما در نسبت دمش خیلی پایین نیز تحلیل می‌شود. در تحقیق یو و همکاران [۱۶] عملکرد محرک پلاسما در حالت جایابی محرک در فاصله‌های دورتر از سوراخ تزریق یعنی  $x/D$  بزرگ‌تر از ۷ مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا به بررسی عملکرد محرک پلاسما در فاصله‌های نزدیک‌تر به سوراخ تزریق ( $x/D$  کوچک‌تر از ۷) پرداخته می‌شود. ضمناً با توجه به عدم بررسی اثر پارامترهای هندسی محرک پلاسما شامل ضخامت دی‌الکتریک و فاصله طولی بین الکترودها بر کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای توسط دیگران، این مطالعه اثر این پارامترهای هندسی را نیز بررسی می‌کند. نتایج حاصله می‌تواند سبب جایابی مؤثرتر محرک پلاسما در پایین‌دست سوراخ تزریق شود.

## ۲- هندسه مسئله و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

هندسه دوبعدی موردنظر مطابق شکل ۱ شامل کانال جریان اصلی، مجرای تزریق سیال خنک‌کننده، محفظه تزریق و محرک پلاسما متناظر با هندسه مورد مطالعه یو و همکاران می‌باشد [۱۶]. قطر سوراخ تزریق دایروی  $D = 12/7$  mm و ابعاد کانال جریان اصلی برابر  $10 \times 49D$  است که به دلیل شبیه‌سازی دوبعدی فاصله جانبی منظور نگردیده است. فاصله ابتدای کانال تا لبه حمله سوراخ تزریق  $19D$  و طول لوله تزریق برابر  $5D$  در نظر گرفته

امروزه دستیابی به روش‌های با کارایی بهتر و هزینه‌های کمتر جهت کنترل جریان موردتوجه محققان زیادی می‌باشد. که این امر سبب تحقیقات گسترده بر روی روش‌های مختلف غیرفعال<sup>۱</sup> و فعال<sup>۲</sup> کنترل جریان شده است [۵]. محرک‌های پلاسمایی یکی از انواع روش‌های مطرح در کنترل فعال جریان می‌باشند که نداشتن قطعات متحرک، قابلیت پاسخگویی سریع و تأخیر زمانی اندک، سادگی ساختار، مصرف کم انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی از ویژگی‌های مهم آن‌ها می‌باشد [۶].

محرک پلاسما از دو الکتروود تشکیل شده که یک الکتروود در معرض هوا قرار دارد و الکتروود دیگر کاملاً توسط ماده دی‌الکتریک پوشیده شده است. زمانی که به الکتروود در معرض هوا یک ولتاژ بالا اعمال می‌شود، مولکول‌های هوا در بالای الکتروود پوشیده با ماده دی‌الکتریک یونیزه شده و منطقه پلاسما تشکیل می‌گردد. در نتیجه با یونیزه شدن مولکول‌های هوا و برخورد آن با سایر مولکول‌ها، یک نیروی حجمی در جریان ایجاد می‌شود [۹-۶]. این نیروی حجمی تولید شده مکانیزمی جهت کنترل فعال جریان است. بردار نیروی ایجاد شده سبب شتاب‌گیری ناگهانی جریان مجاور دیواره، یا به‌عبارت‌دیگر، تزریق مومنتم به سیال می‌شود.

یکی از کاربردهای محرک پلاسما، کنترل لایه مرزی جریان، به‌وسیله افزایش مومنتم جریان در نواحی نزدیک به دیواره‌ها می‌باشد. ملیک و همکاران [۱۰] نخستین کسانی بودند که از نیروی جت حاصل از یک تخلیه توسط جریان مستقیم به‌منظور ایجاد یک ناحیه پلاسما و در نهایت کاهش نیروی بازدارندگی بر روی صفحات تخت استفاده کردند. فُرت و همکاران [۱۱] از جمله محققانی هستند که به بررسی تأثیر استفاده از محرک پلاسما بر جریان عبوری از روی یک بالواره پرداختند. آن‌ها در زمینه تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر هندسه، جنس الکترودها، ولتاژ ورودی، فرکانس و دیگر پارامترهای محرک پلاسما تحقیقات زیادی انجام داده‌اند. شمس طالقانی و همکاران [۱۲] تأثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی بر مشخصه‌های جریان یونی القایی توسط محرک‌های پلاسمایی را به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک موقعیت سرعت ماکزیمم به سطح نزدیک‌تر می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق بیان می‌کند که محرک‌های پلاسمایی گردابه‌هایی در همان فرکانس تحریک ولتاژ اعمال شده تولید می‌کنند. رفیع و همکاران [۱۳] به بررسی عددی تأثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و ضریب انتقال حرارت در یک کانال مسطح پرداختند. آن‌ها دریافتند که در یک رینولدز مشخص، با افزایش ولتاژ ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد، اما در یک ولتاژ ثابت با افزایش سرعت ورودی جریان، ضریب انتقال حرارت تا رینولدز ۲۵۰ نرخ صعودی داشته و پس از آن به دلیل کاهش اثر گردابه‌های حاصل از پلاسما سیر نزولی دارد.

اخیراً بهره‌گیری از محرک‌های پلاسمایی در فرآیند خنک‌کاری لایه‌ای

1 Passive

2 Active

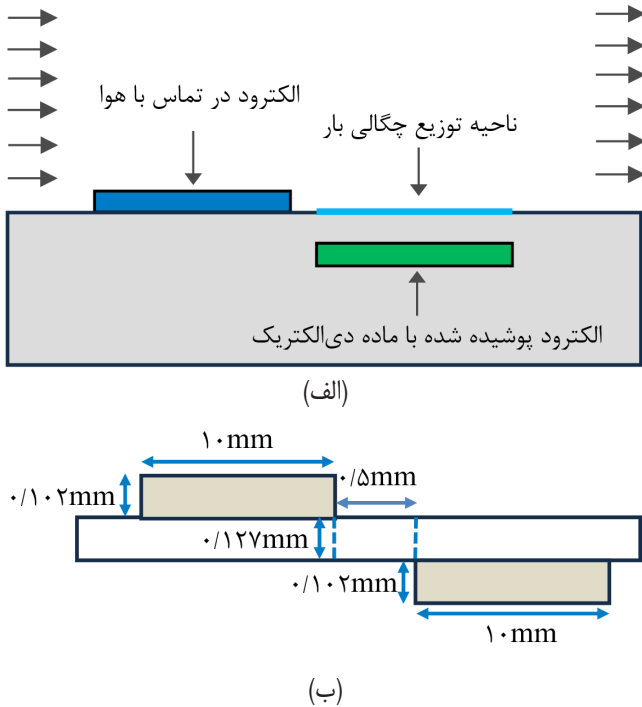


Fig. 2. Geometric configuration of plasma actuator, a) schematic of the plasma actuator, b) dimensions of the electrodes

شکل ۲: مشخصات هندسی محرک پلاسما، الف) نحوه قرارگیری محرک پلاسما، ب) ابعاد الکترودها

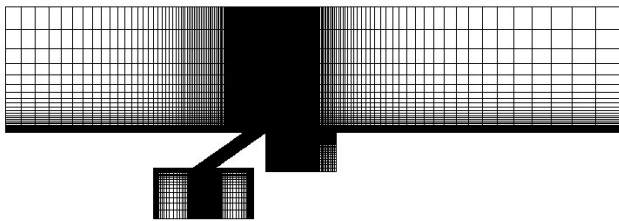


Fig. 3. The overall view of the computational grid

شکل ۳: نمای کلی شبکه محاسباتی

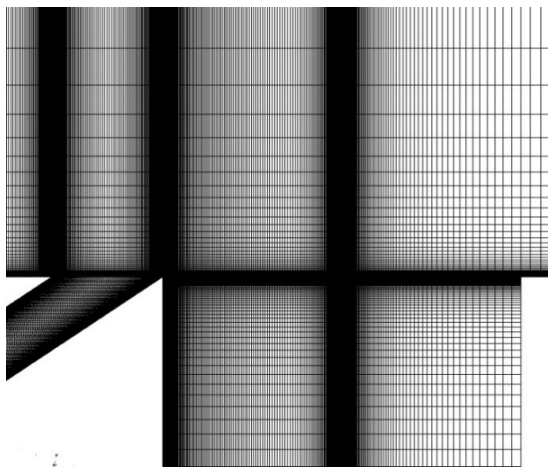


Fig. 4. Schematic view of the grid distribution around the injection hole and the electrodes

شکل ۴: نمای نزدیک از شبکه محاسباتی پیرامون سوراخ تزریق و محرک پلاسما

شده که در مقایسه با اندازه واقعی آن در توربین‌های گازی، بزرگ‌تر است ولی این امکان را فراهم می‌نماید تا با صرف‌نظر کردن از شرایط ورودی جت خنک‌کننده ناشی از محفظه تزریق، صرفاً به بررسی اثرات محرک پلاسما پرداخته شود. محرک پلاسما در این تحقیق شامل دو الکترود به ضخامت  $0.102 \text{ mm}$  و پهنای  $10 \text{ mm}$  است که با دی‌الکتریک کاپتون<sup>۱</sup> به ضخامت  $0.127 \text{ mm}$  و ثابت دی‌الکتریک  $\epsilon_r = 2.7$  از یکدیگر جدا شده‌اند و فاصله طولی الکترودها از یکدیگر  $0.5 \text{ mm}$  می‌باشد [۷]. جزئیات هندسی محرک پلاسما در شکل ۲ نشان داده شده است.

ابعاد هندسی محرک پلاسما (الکترودها و ماده دی‌الکتریک) برگرفته از مدل سوژن<sup>۲</sup> و هوآنگ<sup>۳</sup> می‌باشد [۷]. مبدأ مختصات در ابتدای الکترود غوطه‌ور در ماده دی‌الکتریک در نظر گرفته شده و محورهای  $x$  و  $y$  به ترتیب منطبق با جهت‌های طولی و عمودی می‌باشند.

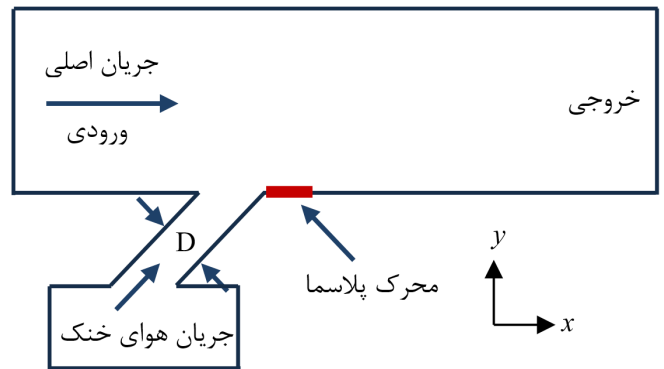


Fig. 1. Computational domain geometry

شکل ۱: هندسه ناحیه محاسباتی

طراحی مدل هندسی مورد تحلیل و تولید شبکه محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار گمبیت<sup>۴</sup> انجام گرفته و شبکه ایجاد شده به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و چهاروجهی می‌باشد. در شکل ۳ و شکل ۴ نمایی از شبکه محاسباتی نمایش داده شده است.

### ۳- معادلات حاکم

مدل آشفتگی دو معادله‌ای کی - اپسیلون رینولدز پایین لاندن - شارما [۱۷] بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده ناویر - استوکس<sup>۵</sup> جهت مدل‌سازی آشفتگی بکار رفته است. دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و معادلات انتقال  $k$  و  $\epsilon$  برای جریان تحت شرایط دوبعدی، تراکم‌ناپذیر، پایدار، لزج و تک‌فاز عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- 1 Kapton
- 2 Suzen
- 3 Huang
- 4 Gambit
- 5 Reynolds-Averaged Navier Stokes

به ترتیب دماهای یون و الکترون می‌باشد. با استفاده از اصل برهم‌نهی<sup>۴</sup> می‌توان پتانسیل اسکالر را به صورت زیر به دو بخش پتانسیل ناشی از میدان الکتریکی و پتانسیل ناشی از چگالی بار نمایش داد:

$$\Phi = \varphi + \phi \quad (۱۲)$$

اگر طول دمای کوچک باشد، سطح دی‌الکتریک شامل پتانسیل ایجاد شده توسط بار الکتریکی بوده و تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمالی قرار نمی‌گیرد. بنابراین می‌توان دو معادله مستقل برای عبارت‌های دو پتانسیل نوشت. معادله دیفرانسیل جزئی برای پتانسیل میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمالی مطابق رابطه (۱۳) عبارت است از:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \varphi) = 0 \quad (۱۳)$$

و معادله دیفرانسیل جزئی مربوط به پتانسیل دوم مطابق رابطه (۱۴) عبارت است از:

$$\nabla [\epsilon_r \nabla \rho_c] = \frac{\rho_c}{\lambda_d^2} \quad (۱۴)$$

باید دقت نمود که کوچک‌ترین سلول شبکه نباید بزرگ‌تر از مقیاس طول دمای در مجاورت پلاسما باشد.

#### ۴- روش حل عددی

حل عددی معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت<sup>۵</sup>، بر اساس روش حجم محدود و توسط حل‌کننده بر پایه فشار صورت گرفته و جهت گسسته‌سازی معادلات، تقریب مرتبه دوم بکار گرفته شده و همچنین برای حل هم‌زمان میدان‌های فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل<sup>۶</sup> بهره برده شده است. نیروی الکتریکی تولیدشده توسط محرک پلاسما و شرایط مرزی پیرامون آن نیز از طریق نوشتن تابع توسط کاربر<sup>۷</sup> محاسبه شده است.

به منظور تشخیص همگرایی حل، تکرارها تا جایی ادامه یافته‌اند که کاهش باقیمانده‌های تراز شده<sup>۸</sup> همه معادلات به مرتبه  $10^{-6}$  برسد. مقدار ضرایب زیرتخفیف برای معادلات فشار، مومنتم، انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی ( $\epsilon$ ) به ترتیب برابر  $0/۲$ ،  $0/۵$ ،  $0/۵$  و  $0/۷$ ،  $0/۷$ ،  $0/۳$ ،  $0/۷$  و  $0/۷$  انتخاب گردیده که نسبت به مقادیر پیش‌فرض متناظر (۰/۳، ۰/۷، ۰/۷ و ۰/۷) کاهش داده شده‌اند. این کاهش اگرچه باعث تأخیر همگرایی می‌شود اما پایداری حل را افزایش می‌دهد.

به منظور یافتن جواب‌های مستقل از شبکه، مطابق شکل ۵ مقایسه نتایج حل برای سه شبکه مختلف  $40 \times 218$ ،  $56 \times 000$  و  $79 \times 747$  سلول برای کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای روی خط مرکزی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج شبکه‌های دارای  $56 \times 000$  و  $79 \times 747$  سلول

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \bar{f}_b \quad (۲)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho k u_i - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = P - \rho \epsilon - \rho D \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho \epsilon u_i - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \\ = (C_{\epsilon 1} f_1 P - C_{\epsilon 2} f_2 \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k} - \rho E \end{aligned} \quad (۵)$$

مقدار نیروی حجمی حاصل از محرک پلاسما از رابطه (۶) قابل محاسبه می‌باشد، که به‌عنوان یک عبارت چشمه در معادلات بقای مومنتم وارد شده است [۷].

$$\bar{f}_b = \rho_c \bar{E} \quad (۶)$$

در این رابطه  $\rho_c$  و  $\bar{E}$  به ترتیب چگالی حجمی بار الکتریکی و بردار میدان الکتریکی می‌باشد. اگر از تغییرات زمانی میدان مغناطیسی صرف‌نظر شود، که معمولاً در پلاسما نیز همین‌گونه است، معادلات ماکسول<sup>۱</sup> به صورت  $\nabla \times E = 0$  خلاصه می‌شود [۷]. این بدان معناست که می‌توان میدان الکتریکی را از گرادیان یک پتانسیل عددی محاسبه کرد.

$$\bar{E} = -\nabla \varphi \quad (۷)$$

با استفاده از معادله اول ماکسول (قانون گاوس) داریم:

$$\nabla \cdot (\epsilon \bar{E}) = \rho_c \quad (۸)$$

و یا،

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = -\rho_c \quad (۹)$$

که در رابطه فوق  $\epsilon$  ضریب نفوذپذیری بر حسب فاراد است که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (۱۰)$$

که  $\epsilon_r$  واحد نفوذپذیری متوسط و  $\epsilon_0$  واحد نفوذپذیری فضای آزاد می‌باشد [۱۲ و ۷]. یکی از پارامترهای مهم در محرک‌های پلاسمایی طول دمای<sup>۲</sup> با علامت  $\lambda_d$  است که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_i T_e}{e^2 n_0 T_i + T_e}} \quad (۱۱)$$

که  $e$  بار پایه،  $n_0$  چگالی پلاسمای زمینه،  $k$  ثابت بولتزمن<sup>۳</sup> و  $T_i$  و  $T_e$

- 4 Super Position
- 5 Fluent
- 6 Simple
- 7 User Defined Function
- 8 Scaled Residuals

- 1 Maxwell
- 2 Debye
- 3 Boltzmann

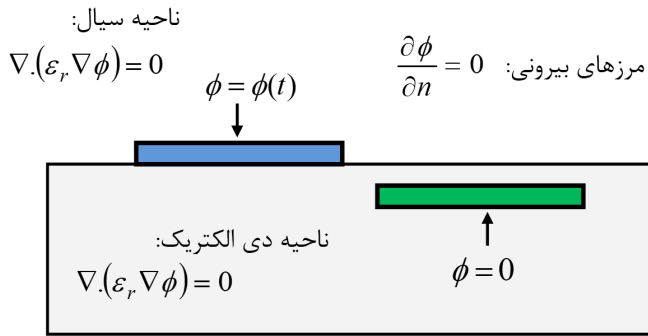


Fig. 6. Boundary conditions of plasma governing equations (Eq. (13))  
شکل ۶: شرط مرزی برای معادلات حاکم بر محرک پلازما (معادله (۱۳))

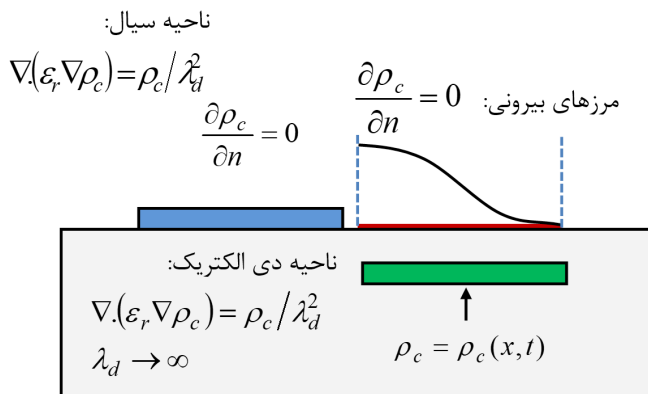


Fig. 7. Boundary conditions of plasma governing equations (Eq. (14))  
شکل ۷: شرط مرزی برای معادلات حاکم بر محرک پلازما (معادله (۱۴))

$$\phi(t) = \phi_{max} f(t) \quad (15)$$

که  $f(t)$  به صورت یک تابع موج، مطابق رابطه (۱۶) تعریف می‌گردد:

$$f(t) = \sin(2\pi\omega t) \quad (16)$$

در رابطه بالا  $\omega$  فرکانس موج و  $\phi_{max}$  دامنه موج می‌باشد.  $\phi(t)$  تابعی از زمان بوده و برای حل حالت پایا بایستی حالت مستقل از زمان بکار برده شود. در حالت پایا  $f(t)$  بر اساس موج مربعی طبق رابطه (۱۷) بیان می‌شود:

$$f(t) = \begin{cases} +1 & \sin(2\pi\omega t) \geq 0 \\ -1 & \sin(2\pi\omega t) \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی در بالای الکتروود پوشیده شده با ماده دی‌الکتریک نیز مطابق رابطه (۱۸) می‌باشد:

$$\rho_{c,w}(x, t) = \rho_c^{max} G(x) f(t) \quad (18)$$

در رابطه بالا تابع  $G$  یک تابع توزیع نیمه گاوسی است که به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$G(x) = \exp\left[-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma^2}\right], x \geq 0 \quad (19)$$

در این رابطه پارامتر  $\mu_x$  بیانگر مقدار بیشینه مکانی  $x$  و  $\sigma$  نسبت طول الکتروود به طول دبای به‌عنوان شاخصه مقیاس می‌باشد.

تقریباً بر هم منطبق می‌باشند و لذا برای دستیابی به جواب‌هایی صحیح و به اندازه کافی دقیق، در حالت تزریق ۳۵ درجه شبکه دارای ۵۶۰۰۰ سلول مناسب می‌باشد. همچنین استقلال شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

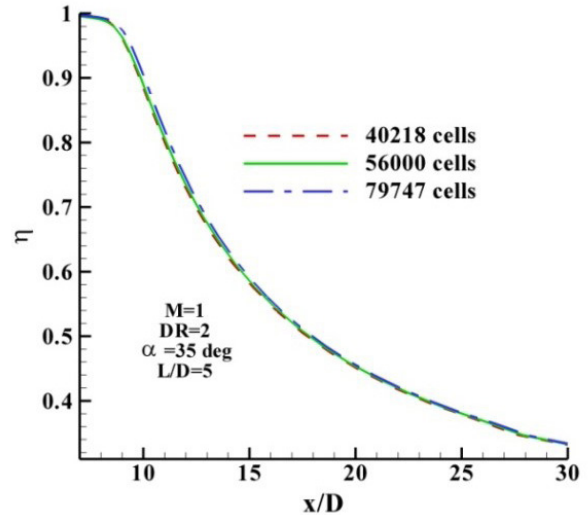


Fig. 5. Grid independence test by centerline film cooling effectiveness  
شکل ۵: بررسی استقلال شبکه از طریق توزیع راندمان خنک‌کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی

در این مطالعه هوا به‌عنوان سیال عامل و به‌صورت گاز ایده‌آل تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در ورودی کانال جریان اصلی، جریان با سرعت یکنواخت ۹m/s، دمای ۳۰۲K، شدت آشفستگی ۲٪ و مقیاس طول آشفستگی برابر یک‌دهم اندازه بعد عمودی کانال به کار رفته است [۳]. در ورودی کانال تزریق نیز شرط ورودی سرعت لحاظ شده که مقدار یکنواخت سرعت در این مرز متناسب با نسبت دمش در هر حالت، متغیر می‌باشد. همچنین در مرز مذکور شدت آشفستگی برابر ۲٪ در نظر گرفته شده است. خروجی کانال دارای شرط مرز خروجی فشار می‌باشد. همچنین به دلیل اینکه مرز بالایی کانال جریان اصلی در فاصله کافی ( $10D$ ) از مرز پایینی قرار داشته و گرادیان متغیرها در راستای عمود بر این مرز ناچیز می‌باشد، استفاده از شرط مرزی تقارن برای آن قابل قبول می‌باشد. دیواره‌های پایینی کانال و دیواره‌های مجرای تزریق هم به‌صورت عایق و بدون لغزش فرض شده‌اند. همچنین برای حل معادلات میدان الکتریکی نیاز به شرایط مرزی مناسب برای پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی می‌باشد.

بنابراین شرایط مرزی متناظر معادلات (۱۳) و (۱۴) که شرایط مرزی حاکم بر محرک پلازما می‌باشند به‌طور خلاصه در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است.

مطابق شکل روی الکتروود تزریق‌کننده، پتانسیل الکتریکی به‌صورت جریان متناوب و مطابق رابطه (۱۵) اعمال می‌شود:

می‌باشد و با نزدیک شدن به سطح الکتروود پوشیده با ماده دی‌الکتریک از مقدار آن کاسته می‌شود.

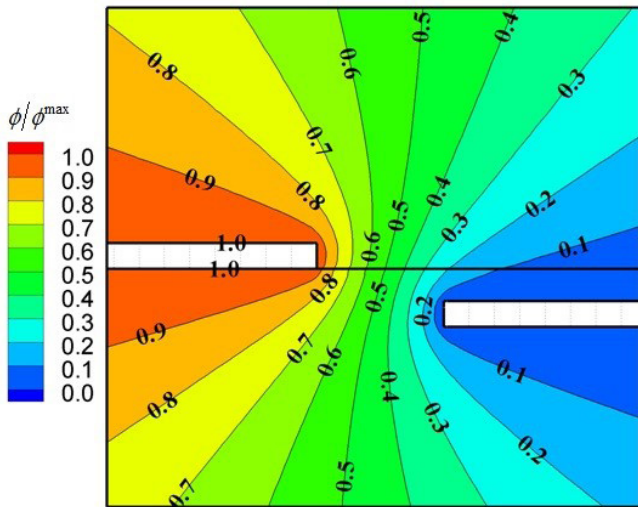


Fig. 9. Electric potential contours

شکل ۹: توزیع پتانسیل الکتریکی

بنابراین نیروی الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ الکتریکی، در مجاورت الکتروود در تماس با هوا بیشتر است و انتظار می‌رود جریان ثانویه تولیدی در اثر یونیزاسیون سیال دی‌الکتریک دارای قدرت بیشتری باشد. در نتیجه تغییر ولتاژ اعمالی می‌تواند در تغییر الگوی جریان سیال داخل کانال نقش مؤثری ایفا کند.

هدف اصلی، تحلیل خنک‌کاری لایه‌ای در حضور محرک پلاسما می‌باشد. بنابراین در مرحله بعدی، مدل خنک‌کاری لایه‌ای تحقیق حاضر بدون حضور محرک پلاسما با نتایج تجربی سینها و همکاران [۱] برای کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای در نسبت دمش ۰/۵ مطابق شکل ۱۰ مقایسه شده است.

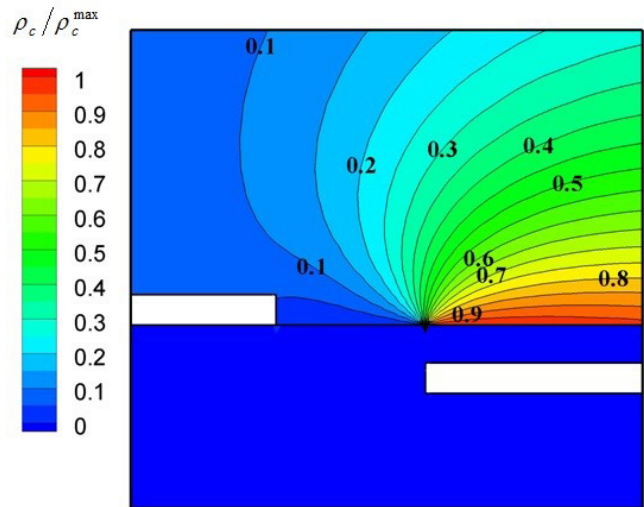
پس از اعتبارسنجی دو مفهوم محرک پلاسما و خنک‌کاری لایه‌ای، به محاسبه توزیع نیروی حجمی حاصل از محرک پلاسما پرداخته شده و مدل سازی جریان با قرار دادن محرک پلاسما در پایین دست سوراخ تزریق صورت گرفته است.

خطوط میدان جریان هوای خنک قبل و بعد از به‌کارگیری محرک پلاسما در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود جریان هوای خنک در پایین دست سوراخ تزریق تحت تأثیر این محرک قرار گرفته و تزریق مومنتم خارجی سبب انحراف جریان خنک‌کننده به سطح صفحه خنک‌شونده می‌شود که امری مطلوب در خنک‌کاری سطح می‌باشد. شایان ذکر است که نقطه شروع انحراف جریان هوای خنک و پیوستگی به سطح، بلافاصله پس از محرک پلاسما می‌باشد.

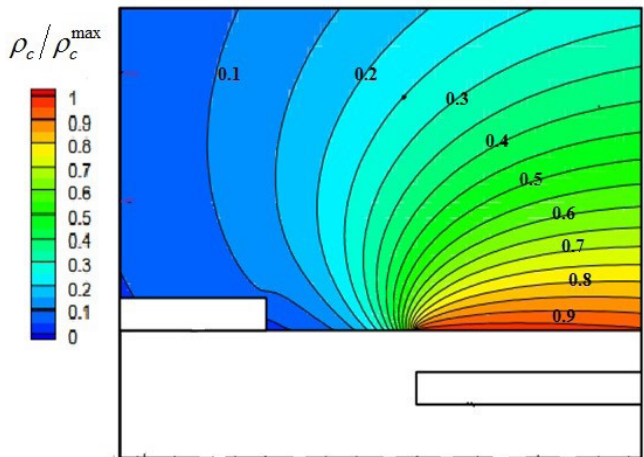
به‌منظور بررسی میزان تأثیرگذاری تزریق مومنتم خارجی به لایه مرزی جریان اصلی در حضور محرک پلاسما پروفیل سرعت جریان عبوری در مقطعی مشخص از کانال (ابتدای الکتروود پوشیده با ماده دی‌الکتریک در

## ۵- بحث و بررسی نتایج

جهت حصول اطمینان از صحت نتایج، اعتبارسنجی مسئله در دو مرحله انجام شده است. ابتدا نتایج تحلیل عددی حاضر در خصوص تولید نیروی حجمی ناشی از محرک پلاسما با نتایج عددی سوزن و همکاران برای یک صفحه تخت مقایسه شده است [۷]. بدین منظور در حالتی که ولتاژ ۱۶ کیلوولت به الکتروود تزریق‌کننده اعمال می‌شود، توزیع چگالی بار الکتریکی در شکل ۸ با نتایج عددی سوزن و همکاران [۷] مقایسه شده، که از تطابق قابل قبولی برخوردار است. مطابق شکل، مقدار چگالی بار الکتریکی در بالای الکتروود پوشیده با ماده دی‌الکتریک به مقدار بیشینه خود می‌رسد و با فاصله گرفتن از سطح مذکور، به تدریج کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

Fig. 8. Charge density contours, a) present work, b) Numerical study of Suzen

شکل ۸: توزیع چگالی بار الکتریکی، (الف) تحقیق حاضر، (ب) تحقیق عددی سوزن [۷]

همچنین توزیع پتانسیل الکتریکی مربوطه در شکل ۹ حاکی از آن است که پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکتروود تزریق‌کننده دارای مقدار بیشینه

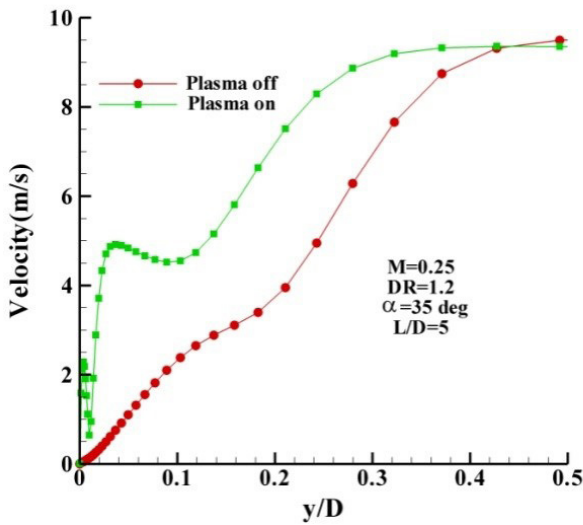


Fig. 12. Velocity profiles in the vicinity of embedded electrode at  $x = 0$  for without and with plasma actuator

شکل ۱۲: پروفیل سرعت جریان عبوری از سطح کانال در مقطع  $x=0$  در دو حالت بدون محرک پلاسما و با محرک پلاسما

ارزیابی تأثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و دما تحت شرایط مختلف الکتریکی، جریانی و هندسی پرداخته شده است. این پارامتر که جهت بررسی عملکرد خنک کاری لایه‌ای می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{(T_m - T_{aw})}{(T_m - T_c)} \quad (20)$$

که در رابطه فوق  $T_m$ ،  $T_c$  و  $T_{aw}$  به ترتیب نمایانگر دمای سیال اصلی، دمای سیال خنک‌کننده و دمای آدیاباتیک دیواره هستند و  $\eta$  در هر نقطه منحصر به فرد است.

ولتاژ ورودی به عنوان یکی از پارامترهای الکتریکی مؤثر بر عملکرد محرک‌های پلاسما می‌باشد که بر میزان تزریق مومنتم به لایه مرزی اثرگذار است. در شکل ۱۳ کارایی خنک کاری لایه‌ای برای ولتاژهای مختلف ورودی در الکتروود تزریق‌کننده نشان داده شده است (موقعیت قرارگیری محرک پلاسما در نزدیکی لبه فرار سوراخ تزریق می‌باشد). مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ اعمالی، به دلیل افزایش سرعت سیال و در نتیجه ازدیاد قدرت یونیزه کردن سیال در لایه مرزی، کارایی خنک کاری لایه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۱۳ بهبود کارایی خنک کاری لایه‌ای رابطه‌ای مستقیم و صعودی با افزایش ولتاژ ورودی دارد. برای ولتاژ ورودی ۴ کیلوولت میزان بهبود کارایی خنک کاری لایه‌ای تقریباً برای تمامی  $x/D$  ها یکسان می‌باشد. برای ولتاژ ورودی ۱۲ کیلوولت میزان افزایش برای  $x/D$  های ۹ تا ۱۲ کیلوولت قابل توجه‌تر می‌باشد. با به کارگیری ولتاژهای ورودی ۲۰ و ۲۸ کیلوولت نیز بهبود کارایی به ترتیب در فاصله  $x/D$  های ۹ تا ۱۶ کیلوولت و ۹ تا ۲۰ کیلوولت نسبت به حالت بدون به کارگیری محرک پلاسما آشکار می‌باشد. نکته حائز اهمیت این است که در ولتاژهای بالاتر اثرات

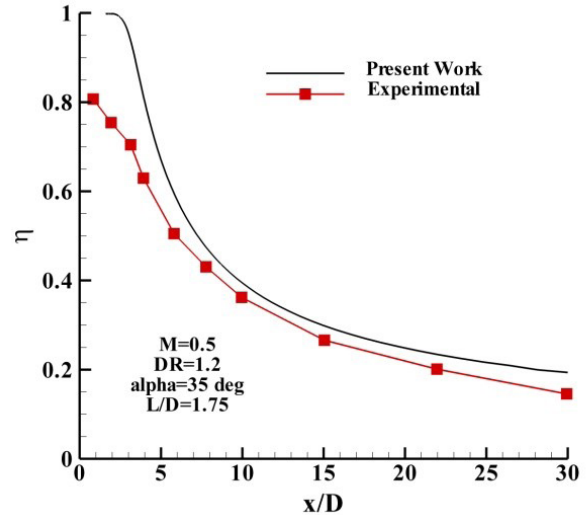


Fig. 10. Validation of the current numerical results for film cooling effectiveness

شکل ۱۰: مقایسه کارایی خنک کاری لایه‌ای تحقیق حاضر با نتایج تجربی سینها [۱]

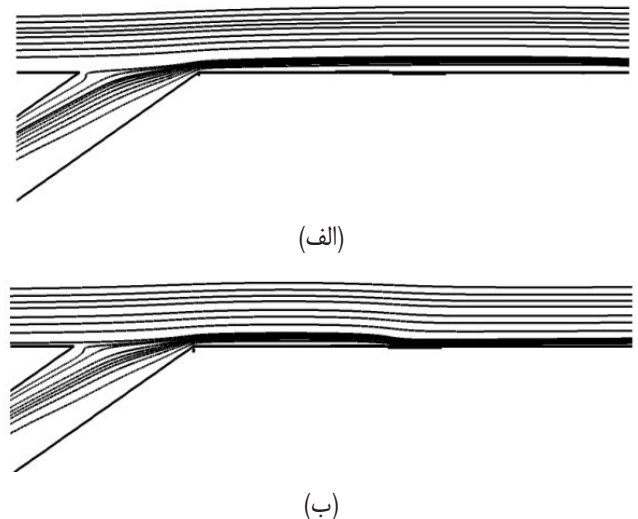


Fig. 11. Stream lines from the film hole at  $M=0.25$ , a) without plasma actuator, b) with plasma actuator

شکل ۱۱: خطوط جریان در خروجی سوراخ تزریق در نسبت دمش ۰/۲۵، الف) بدون محرک پلاسما، ب) با محرک پلاسما

در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق شکل، سیال بالای الکتروود تحت تأثیر نیروی الکتریکی تولیدی شتاب گرفته و این امر سبب افزایش مومنتم جریان می‌شود.

لازم به ذکر است که تغییرات میدان جریان و دما در حضور محرک پلاسما از دو مکانیزم تشکیل شده است. مکانیزم اول تولید گردابه‌های ایجاد شده در محیط سیال بر اثر تأثیر محرک پلاسما است و مکانیزم دوم، افزایش مومنتم در لایه مرزی هیدرودینامیکی است که با افزایش سرعت سیال در لایه مرزی حرارتی و افزایش انتقال حرارت همراه است.

در ادامه، با استفاده از پارامتر کارایی آدیاباتیک خنک کاری لایه‌ای به

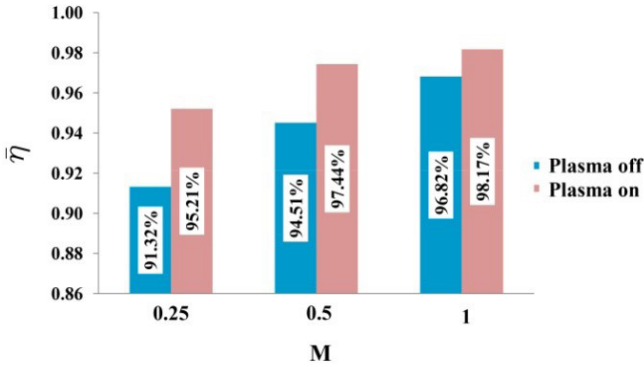


Fig. 15. Average film cooling effectiveness at various blowing ratios without and with plasma actuator

شکل ۱۵: نمودار ستونی متوسط راندمان خنک‌کاری لایه‌ای در حالت بدون محرک پلاسما و با محرک پلاسما در نسبت دم‌های مختلف

به‌منظور بررسی مکان قرارگیری محرک پلاسما در پایین‌دست سوراخ تزریق، محرک پلاسما در مکان‌های مختلف در امتداد صفحه خنک‌شونده در ولتاژ ۲۰ کیلوولت نصب شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۶ نشان داده شده است موقعیت قرارگیری محرک پلاسما تأثیر زیادی روی کارایی خنک‌کاری لایه‌ای دارد.

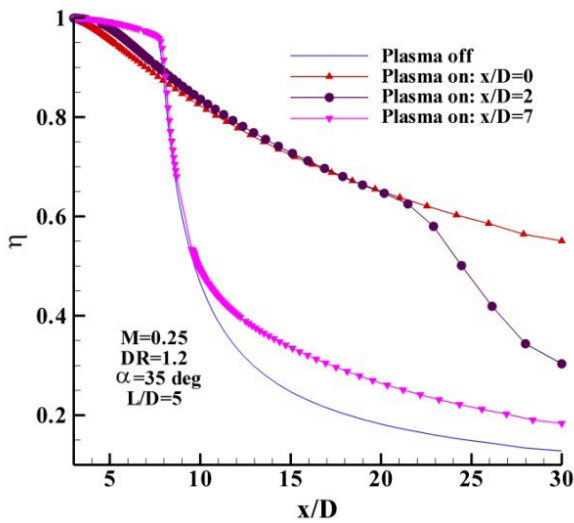


Fig. 16. Film cooling effectiveness at different positions of plasma actuator

شکل ۱۶: کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در موقعیت‌های مختلف قرارگیری محرک پلاسما نسبت به لبه فرار سوراخ تزریق

وقتی محرک پلاسما در لبه فرار سوراخ تزریق و نیز در فاصله  $2D$  از آن قرار دارد، کارایی خنک‌کاری لایه‌ای بهترین حالت را دارد. البته در این حالات برای های کوچک‌تر از ۸ به علت اثرات گرمایشی محرک پلاسما کاهش کارایی خنک‌کاری لایه‌ای مشاهده می‌شود. در موقعیت  $7D$  به‌کارگیری محرک پلاسما نسبت به دو حالت قبل، تأثیر کمتری در بهبود خنک‌کاری لایه‌ای دارد و اثرات آن پس از محرک پلاسما قابل‌رویت می‌باشد.

گرمایشی محرک پلاسما بیشتر می‌شود، چنانچه در ولتاژ ۲۸ کیلوولت برای  $x/D$  کوچک‌تر از ۱۱ اندکی کاهش در کارایی خنک‌کاری لایه‌ای مشاهده می‌گردد.

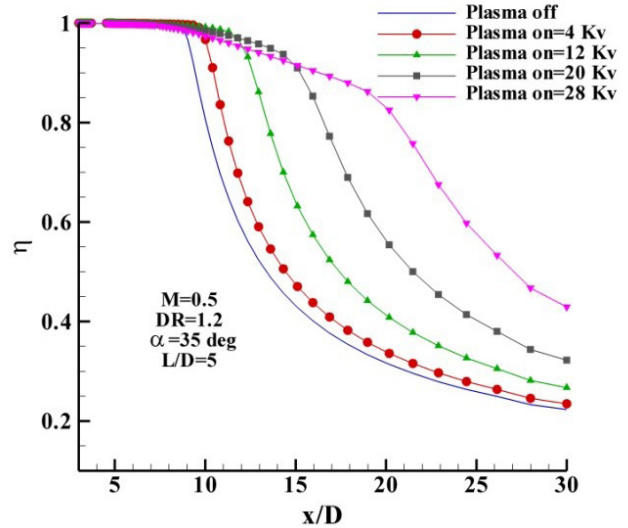


Fig. 13. Film cooling effectiveness at various voltages without and with plasma actuator

شکل ۱۳: کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در حالت بدون محرک پلاسما و با محرک پلاسما تحت ولتاژهای مختلف

تأثیر پارامتر جریانی نسبت دم‌ها در ولتاژ ۲۰ کیلوولت در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت دم‌ها به دلیل دور شدن هسته هوای خنک از صفحه، میزان انحراف سیال خنک کاهش یافته در نتیجه کارایی محرک پلاسما کاهش می‌یابد. در شکل ۱۵ میزان بهبود به‌صورت نمودار ستونی ارائه شده است.

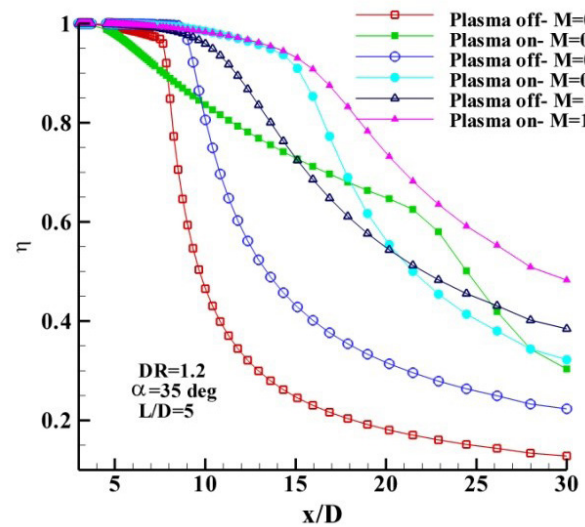


Fig. 14. Film cooling effectiveness at various blowing ratios without and with plasma actuator

شکل ۱۴: کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در حالت بدون محرک پلاسما و با محرک پلاسما در نسبت دم‌های مختلف



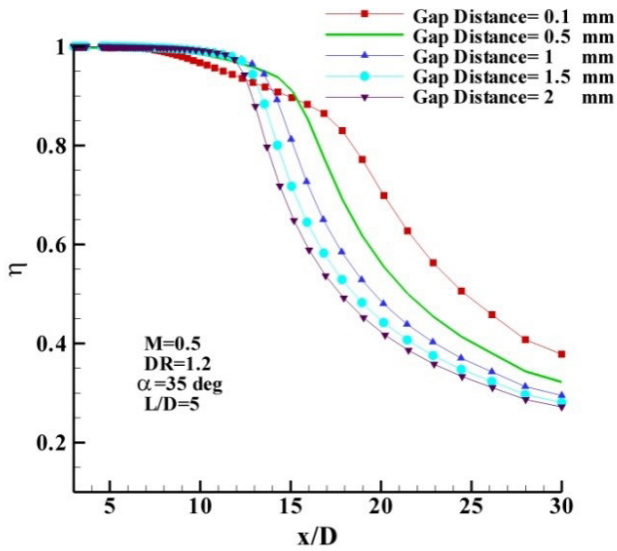


Fig. 18. Film cooling effectiveness at different gap distances of the electrodes

شکل ۱۸: کارایی خنک کاری لایه‌ای در فاصله‌های طولی مختلف دو الکترود نسبت به یکدیگر

محسوسی کاهش می‌دهد.

## ۶- نتیجه‌گیری

میدان‌های جریان و دما در خنک کاری لایه‌ای از طریق یک ردیف سوراخ مجزا بر روی مدل صفحه تخت با به‌کارگیری محرک پلاسما در خروجی سوراخ تزریق، به ازای تغییرات در نسبت دمش، ولتاژ اعمالی به الکترود تزریق‌کننده، موقعیت قرارگیری محرک پلاسما نسبت به خروجی سوراخ تزریق و پارامترهای هندسی محرک پلاسما شامل ضخامت دی‌الکتریک و فاصله طولی بین دو الکترود به صورت عددی تحلیل شده است. هدف اصلی بررسی تأثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و دما و در نتیجه کارایی خنک کاری لایه‌ای می‌باشد. به‌طور کلی مهم‌ترین نتایج را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. با افزایش ولتاژ ورودی، میزان نیروی اعمالی توسط محرک پلاسما افزایش یافته و در نتیجه خنک کاری لایه‌ای بهبود بیشتری می‌یابد.
۲. بهبود کارایی خنک کاری لایه‌ای با به‌کارگیری محرک پلاسما در نسبت‌های دمش‌های پایین‌تر رخ می‌دهد و با افزایش نسبت دمش به دلیل افزایش سرعت جریان هوای خنک و بهبود کارایی خنک کاری لایه‌ای، میزان اثرگذاری محرک پلاسما بر آن کاهش می‌یابد.
۳. با افزایش فاصله محرک پلاسما از خروجی سوراخ تزریق، اثرگذاری آن بر جریان هوای خنک و بهبود کارایی خنک کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد.
۴. به‌طور کلی حالت‌های بهینه برای  $\eta$  در نسبت چگالی نسبت چگالی ۱/۲ به ازای ولتاژ ورودی ۲۰ کیلوولت، نسبت دمش ۰/۲۵

برای سایر موقعیت‌های قرارگیری محرک پلاسما در فاصله‌های بزرگ‌تر از  $7D$  نیز به دلیل دور شدن محرک از خروجی سوراخ تزریق و تأثیرگذاری کمتر آن بر جریان هوای خنک پس از محرک پلاسما، اثرات کمتری بر کارایی خنک کاری لایه‌ای خواهد داشت.

کارایی محرک پلاسما تحت تأثیر پارامترهای زیادی می‌باشد که در اینجا مشخصات هندسی آن شامل ضخامت دی‌الکتریک و فاصله طولی الکترودها از یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۷ کارایی آدیاباتیکی خنک کاری لایه‌ای برای دی‌الکتریک با ضخامت‌های  $0/0635\text{mm}$ ،  $0/127\text{mm}$  و  $0/254\text{mm}$  معادل  $1/2$ ،  $2$  و  $10$  برابر ضخامت هندسه مرجع نشان داده شده است. در تمامی حالات سایر مشخصات هندسی محرک پلاسما ثابت در نظر گرفته شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در ولتاژ ورودی یکسان، محرک پلاسما با دی‌الکتریک ضخیم‌تر، مقادیر کارایی خنک کاری بالاتری دارد. اگرچه این افزایش به میزان قابل توجه نمی‌باشد.

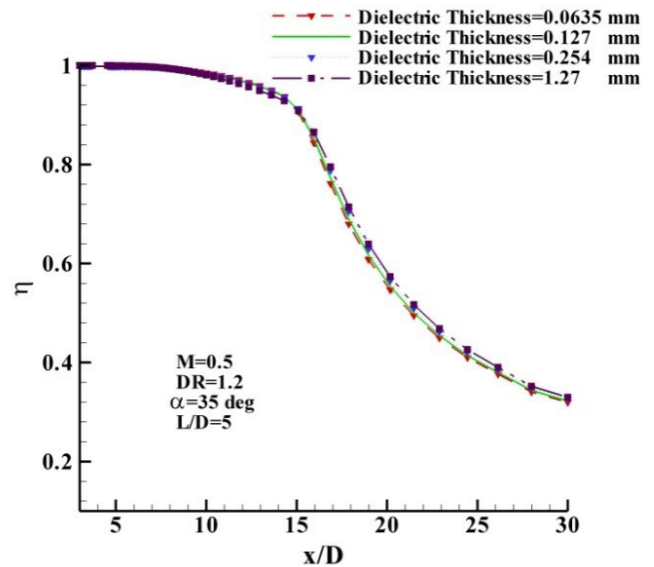


Fig. 17. Film cooling effectiveness at different thicknesses of the dielectric  
شکل ۱۷: کارایی خنک کاری لایه‌ای در ضخامت‌های مختلف دی‌الکتریک

پارامتر هندسی دیگر مورد بررسی، فاصله طولی بین دو الکترود است. بدین منظور نتایج مربوط به بررسی ۴ فاصله طولی  $0/1\text{mm}$ ،  $1\text{mm}$ ،  $5\text{mm}$  و  $10\text{mm}$  به همراه فاصله طولی دو الکترود در حالت مرجع ( $0/5\text{mm}$ ) در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مطابق نتایج حاصله در شرایط یکسان بودن سایر پارامترها، محرک پلاسما به این فاصله طولی حساس می‌باشد و در مقادیر پایین‌تر فاصله طولی بین دو الکترود، خنک کاری لایه‌ای بهتری حاصل می‌شود. به‌گونه‌ای که در فواصل نزدیک به سوراخ تزریق تا  $x/D$  حدود ۱۳ با کاهش فاصله الکترودها از یکدیگر کارایی خنک کاری لایه‌ای نیز به میزان ناچیزی کاهش می‌یابد. درحالی‌که در  $x/D$ ‌های بالاتر از ۱۶، نتیجه معکوس شده و افزایش فاصله طولی بین دو الکترود کارایی را به‌طور

بالانویس‌ها

- مقدار متوسط

### منابع

- [1] A. Sinha, D. Bogard, M. Crawford, Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio, *ASME J. Turbomach*, 113(3) (1991) 442-449.
- [2] J. Pietrzyk, D. Bogard, M. Crawford, Hydrodynamic measurements of jets in crossflow for gas turbine film cooling applications, *ASME J. Turbomach*, 111(2) (1989) 139-145.
- [3] D.K. Walters, J.H. Leylek, Impact of film-cooling jets on turbine aerodynamic losses, in: *ASME, Journal of turbomechanical, American Society of Mechanical Engineers*, 2000, pp. 537-545.
- [4] M. Naghashnejad, N. Amanifard, H. Deylami, A predictive model based on a 3-D computational approach for film cooling effectiveness over a flat plate using GMDH-type neural networks, *Heat and Mass Transfer*, 50(1) (2014) 139-149.
- [5] A. Bergles, Techniques to enhance heat transfer, *Handbook of heat transfer*, 3 (1998) 11.11-11.76.
- [6] T.C. Corke, M.L. Post, D.M. Orlov, Single-dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: concepts, optimization, and applications, *Journal of Propulsion and Power*, 24(5) (2008) 935-945.
- [7] Y. Suzen, P. Huang, J. Jacob, D. Ashpis, Numerical simulations of plasma based flow control applications, *AIAA paper*, 4633 (2005) 2005.
- [8] B. Jayaraman, Y. Lian, W. Shyy, Low-Reynolds number flow control using dielectric barrier discharge actuators, *AIAA paper*, 3974 (2007).
- [9] B. Jayaraman, W. Shyy, Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer, *Progress in Aerospace Sciences*, 44(3) (2008) 139-191.
- [10] M. Malik, L. Weinstein, M. Hussaini, Ion Wind Drag Reduction, *AIAA paper*, 0231 (1983).
- [11] M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, M. Cazalens, Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control, *Experiments in Fluids*, 43(6) (2007) 917-928.
- [12] S. Seyyed ShamsTaleghani, A. Shadaram, M. Mirzaee, *Experimental investigation of geometric and electrical characteristics by measurements of the induced flow velocity*, (2013) 132-145(in Persian).
- [13] A. Rafi, N. Amanifard, H.M. Deylami, F. Dolati,

و موقعیت قرارگیری محرک پلاسما در لبه فرار سوراخ تزریق، حاصل می‌شود.

۵. پارامترهای هندسی محرک پلاسما بر کارایی خنک‌کاری لایه‌ای تأثیرگذارند. افزایش ضخامت دی‌الکتریک باعث افزایش کمی در راندمان می‌گردد، اما کاهش فاصله طولی الکترودها مقدار متوسط کارایی خنک‌کاری لایه‌ای را افزایش می‌دهد.

### فهرست علائم

$C_{e1}$	ثابت مدل آشفستگی
$C_{e2}$	ثابت مدل آشفستگی
$D$	قطر سوراخ تزریق، m
$DR$	نسبت دمش
$f_1$	ثابت مدل آشفستگی
$f_2$	ثابت مدل آشفستگی
$K$	انرژی جنبشی آشفستگی، $m^2/s^2$
$L/D$	نسبت طول به قطر سوراخ تزریق
$M$	نسبت دمش
$P$	فشار، $N/m^2$
$Pr$	عدد پرانتل
$Pr_i$	عدد پرانتل آشفستگی
$T$	دما، K
$u$	سرعت، m/s
$E$	بردار میدان الکتریکی، V/m
$f_b$	نیروی حجمی در واحد حجم، $F/m^3$

### علائم یونانی

$\alpha$	زاویه شیب در راستای جریان اصلی، deg
$\varepsilon$	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفستگی، $m^2/s^3$
$\varepsilon_0$	نفوذپذیری سطح آزاد
$\varepsilon_r$	نفوذپذیری محیط مورد نظر
$\eta$	کارایی خنک‌کاری لایه‌ای
$\bar{\eta}$	متوسط کارایی خنک‌کاری لایه‌ای
$\nu$	لزجت سینماتیکی، $m^2/s$
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$

### زیرنویس‌ها

aw	دیواره آدیاباتیک
m	جریان اصلی

*AIAA Paper*, 1092 (2010) 2010.

- [16] J.-L. Yu, L.-m. He, Y.-f. Zhu, W. Ding, Y.-q. Wang, Numerical simulation of the effect of plasma aerodynamic actuation on improving film hole cooling performance, *Heat and Mass Transfer*, 49(6) (2013) 897-906.
- [17] B. Launder, B. Sharma, Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, *Letters in heat and mass transfer*, 1(2) (1974) 131-137.

Numerical investigation of the plasma actuator effects on the flow field and heat transfer coefficient in a flat channel, *Modares Mechanical Engineering*, 15(6) (2015) (in Persian).

- [14] C.-C. Wang, S. Roy, Active cooling of turbine blades using horse-shoe plasma actuator, *AIAA Paper*, 679 (2009) 2009.
- [15] C.-C. Wang, S. Roy, Physics based analysis of horseshoe plasma actuator for improving film cooling effectiveness,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Dolati, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, "Numerical Investigation of The Effect of Plasma Actuator on Film Cooling Effectiveness" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(3) (2017) 605-616.  
DOI: 10.22060/mej.2016.716



