



PSC 2007

98-F-EPG-139

استفاده از تحریک لایه مرزی جهت بهبود فرایند خنک کاری پره های توربین

مهدی شفاهی

سید محمد جوادی

پیام حق پرست

محسن کهرم

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

واژه های کلیدی: خنک کاری، تحریک لایه مرزی، انتقال حرارت، پره توربین

چکیده:

در این مقاله بهبود فرایند خنک کاری پره های توربین با استفاده از تحریک ساختار لایه مرزی سیال عامل، به کمک موانع مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. افزایش و یا کاهش آهنگ انتقال گرما از روی سطوح جامد از مسائل مورد توجه محققین علوم مهندسی در زمینه انرژی به حساب می آید. از آنجا که پره های ردیف اول و دوم توربین گازی نیاز به سرد شدن و انتقال حرارت شدید دارند، به منظور افزایش عمر پره های توربین تلاش شده است با تحریک لایه مرزی سیال عامل، میزان این انتقال حرارت افزایش داده شود.

ایجاد محرک در داخل لایه مرزی، سبب می شود که در اثر برخورد جریان با آنها، الگوی جریان عوض شده و پایداری لایه مرزی تغییر کند. شکل و موقعیت مانع برای تغییر در روند تحریک لایه مرزی بسیار با اهمیت تلقی می شود. نشان داده شده است که افزایش ارتفاع مانع مثلی و همچنین عدد رینولدز جریان باعث افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین از سطح می-شود، و افزایش طول قاعده مانع و فاصله مانع از سطح و نیز کاهش زاویه روبروی جریان از ۹۰ درجه به پایین باعث کاهش ضریب انتقال حرارت میانگین از سطح می شود. همچنین در مورد مانع مربعی نشان داده شده است که هر چه فاصله مانع را از دیواره پره بیشتر کنیم ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد. با افزایش طول مانع (a) ضریب انتقال حرارت کاهش یافته، درحالیکه با افزایش ارتفاع مانع (b) ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. در نهایت می توان گفت با قرار دادن موانع در فواصل مشخص در مسیر سیال خنک کاری، انتقال حرارت تا ۶ برابر افزایش می یابد.

مقدمه

امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی، بدلیل محدودیت فضا و هزینه نیاز به افزایش ضریب انتقال حرارت با استفاده از روش های مختلف احساس می شود، بهبود فرایند خنک کاری پره های توربین یکی از اساسی ترین نیازهای صنعتی است. خنک کاری پره های توربین یک عمل اساسی و لازم برای بهره برداری مطمئن و بهینه از توربین گازی است که باعث می شود پره های توربین در یک دمای مجاز کار کنند و نهایتاً منجر به افزایش عمر آنان می شود. یکی از روشهای تحریک لایه مرزی قرار دادن موانع با ابعاد و شکلهای گوناگون در فاصله مشخص از یک صفحه می باشد، بدین منظور در این مقاله سعی شده است که با قرار دادن یک مانع مربعی و یک مانع مثلی با ابعاد و فواصل متغیر در درون لایه مرزی مغشوش، اثر چهار عامل ویک، نقطه سکون، منطقه بازگشت و جت، را در میزان افزایش و یا کاهش آهنگ انتقال حرارت از پره توربین مورد بررسی قرار دهیم. محاسبات با استفاده از کد رایانه ای اصلاح شده *teach* انجام شده است.

در این مقاله جریان سیال خنک کاری در طول پره توربین همانند جریان در روی یک صفحه تخت فرض شده است، که با قرار دادن موانع مختلف در مسیر جریان سیال خنک کاری و

بصورت انتقال حرارت هدایت بوده که این سبب کاهش شدید انتقال حرارت می باشد، این لایه نقش یک لایه مقاوم در برابر انتقال حرارت جابجایی اجباری را ایفا می کند.

با تغییر الگوی جریان درون لایه مرزی و تغییر در میدان سرعت می توان ضریب انتقال حرارت را افزایش داد. روشهای متعددی برای ایجاد این تغییرات مورد آزمایش و تحقیق قرار گرفته و نتایج مختلفی حاصل گردیده است. مجموعه این تحقیقات با نام تحریک لایه مرزی شناخته شده است. اساس تحریک لایه مرزی بهره گیری از پدیده های مختلف سیالاتی نظیر نقطه سکون، گردابه، جدایش لایه مرزی، ایجاد جت سیال درون لایه مرزی می باشد. با استفاده از این پدیده ها الگوی جریان درون لایه مرزی به هم خورده و ضخامت لایه مرزی تغییر می کند. یک روش عمده برای ایجاد این اثر، قرار دادن موانع خارجی درون لایه مرزی و یا ایجاد برجستگیها و فرورفتگیها مختلف بر روی خود سطح صفحه می باشد.

مشخصات مدل مورد بررسی و نحوه مش بندی

مطابق شکل (۱) برای بررسی اثر تحریکی مانع، یک مانع مثلثی به قاعده a ، ارتفاع b و به فاصله h از صفحه تخت ایجاد گشته است. در شکل (۲) چگونگی قرارگیری مقطع مربعی در کنار دیواره و پارامترهای ابعادی متغیر نشان داده شده است.

با توجه به موانع موجود در لایه مرزی در دو ناحیه نیاز به شبکه بندی ریز داریم: یکی در کنار صفحه تخت و دیگری محل قرارگیری مانع. بنابراین در جهت طول (x ها) از ابتدای میدان، شبکه بندی درشت انتخاب شده است و با یک ضریب انقباض مناسب تا قبل از محل قرارگیری مانع ریز می شود. در محل قرارگیری مانع شبکه بندی ریز و یکنواخت انتخاب شده است. بعد از محل مانع نیز شبکه بندی با ضریب انبساط مناسبی تا انتهای صفحه درشت شده است. می توان درشکلهای (۳) و (۴) این شبکه بندی را مشاهده کرد. در جهت عرض میدان جریان (y ها) در کنار صفحه تخت و چسبیده به آن همچنین در اطراف مانع شبکه بندی ریز انتخاب شده است. در این مقاله نوع سیال هوا و با سرعت 14 متر بر ثانیه فرض شده است.

تحریک لایه مرزی قصد افزایش میزان انتقال حرارت را داریم. پره های توربین گازی نیاز به سرد شدن و انتقال حرارت شدید دارند، زیرا پارامترهای ترمودینامیکی سیکل مربوطه به گونه ای می باشد که دمای گازهای داغ آن بیشتر از دامنه تحمل مواد بکار رفته در پره ها می باشد. به همین دلیل از سیستم خنک کاری استفاده می شود تا مقاومت پره ها را در برابر گازهای داغ افزایش دهند. لازم به ذکر است که در رابطه با کاربرد تحریک لایه مرزی به کمک موانع مختلف، جهت خنک کاری پره توربین تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است.

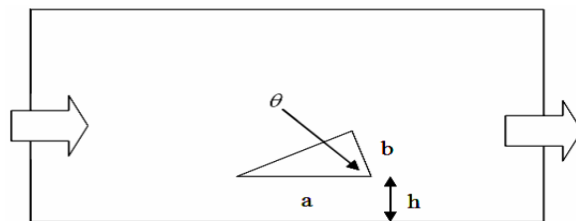
باردوناس و همکاران [1] بر آمدگی مستطیلی شکل را روی یک سطح قرار دادند و به کمک سرعت سنج سیم داغ، تغییرات شدت توربولنس در لایه مرزی و بیرون آنرا اندازه گیری کردند. آزمایش مشابهی با قرار دادن مقطع مستطیلی بر روی صفحه تخت درون لایه مرزی آرام و اندازه گیری همبستگی میان شدت توربولنس لایه مرزی، طول منطقه گذار به توربولنس و ابعاد مقطع توسط دارست و بکر [2] انجام پذیرفت. در این اندازه گیری نشان داده می شود که حتی اگر لایه مرزی دارای ماهیت لایه ای باشد، قرار دادن یک مانع با مقطع مستطیلی می تواند ضمن معشوش کردن لایه، در زیر لایه آرام ($30 \sim y^+$) تولید اغتشاش با شدت قابل توجهی بنماید. وورنر و همکاران [3] یک مانع با شکل نیم دایره و همچنین یک مقطع مستطیلی با نسبت های متفاوت ابعادی را روی سطح تخت قرار دادند و پایداری لایه مرزی آرام را در نتیجه وجود گردابه های ناشی از ویک پشت جسم بررسی نمودند. سوهانکار [4] و همکاران ایجاد ناپایداری و توزیع ناهمگون فشار در اطراف یک مقطع استوانه ای را در رینولدزهای مختلف بررسی نمودند.

در جریان اجباری هوا بر روی سطوح، می توان از سرعت جریان، لزجت سیال، سطح مقطع تماس جریان با جدار جامد به عنوان عوامل موثر بر ضریب انتقال حرارت نام برد. در میان این عوامل می توان لزجت سیال را به عنوان عاملی موثر بر کاهش ضریب انتقال حرارت بدلیل کاهش سرعت سیال در مجاورت سطوح جامد و شکل گیری لایه مرزی نام برد. بطوریکه مکانیزم انتقال حرارت در لایه چسبیده به دیوار

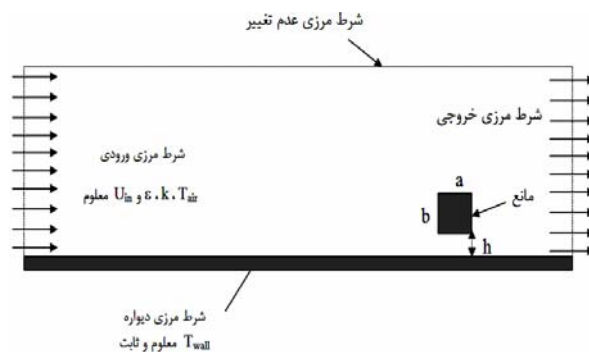
هوا در توربین گازی در زمان استارت از کمپرسور کمکی و در زمان بهره برداری از کمپرسور محوری واحد تامین می شود. قسمت اعظم هوا برای خنک کردن محفظه احتراق بکار می رود. همچنین با توجه به اینکه پره های ثابت و متحرک توربین در معرض ماحصل احتراق گازهای داغ قرار دارند برای جلوگیری از سوختن پره ها بایستی توسط هوا، خنک شوند. برای این کار هوای خنک کاری روتور کولینگ و استارت کولینگ بکار برده می شوند، این هوا از خروجی کمپرسور گرفته شده و دمای آن بالا می باشد و بایستی توسط رادیاتور خنک شود تا دمای آن به ۱۳۰ درجه سانتیگراد برسد و هوای خنک شده از طریق لوله ها به اولین و دومین ردیف پره های متحرک و ثابت که بیشتر در معرض احتراق قرار دارند برسد و پس از خنک کردن پره ها از طریق سوراخهای موجود در پره ها خارج شود.

سیستم هوای خنک کاری توربین

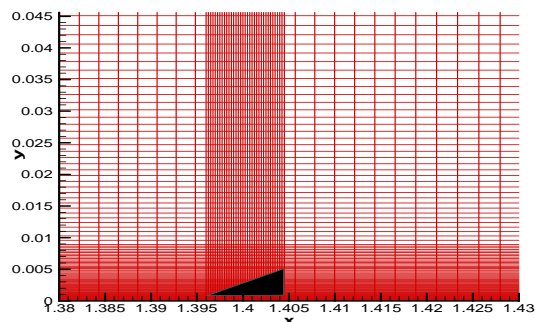
یک عمل اساسی و لازم برای بهره برداری مطمئن و بهینه از توربین گازی، خنک کاری پره های توربین است که باعث می شود پره های توربین در یک دمای مجاز کار کنند و نهایتاً منجر به افزایش عمر آنان شود. در این عمل، هوای خنک کاری را به طور مستقیم برای قسمت های داغ توربین گاز مانند پره های توربین تامین می کنند. بدیهی است با افزایش دمای ورودی به توربین روش خنک کاری قسمت های داغ نیز بهبود می یابد برای این منظور از هوای خروجی مرحله چهاردهم کمپرسور در خنک کاری پره های ثابت ردیف دوم توربین به کار می رود و از هوای خارج شده از طبقه یازدهم کمپرسور جهت خنک کاری پره های ثابت ردیف سوم توربین و هوای خارج شده از طبقه ششم جهت خنک کاری پره های ثابت ردیف چهارم توربین استفاده می شود و دلیل این امر نیز به این خاطر است که دمای طبقه ابتدایی کمپرسور به دمای طبقه انتهایی توربین نزدیکتر است و از ایجاد تنش حرارتی بر روی پره های ثابت توربین جلوگیری می کند برای خنک کاری دیسکهای توربین و پره های ردیف اول و دوم توربین، هوای منشعب شده از محفظه احتراق پس از عبور از کولر و فیلتر مورد استفاده قرار



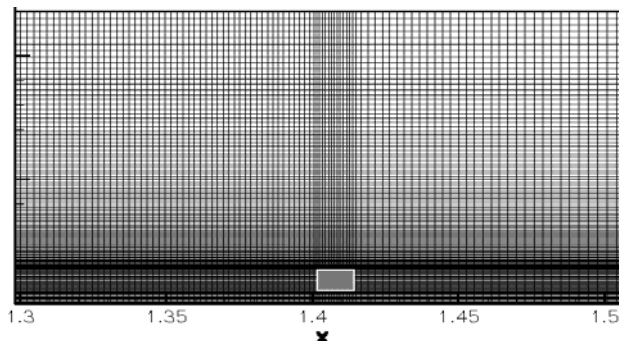
شکل ۱- هندسه مورد استفاده برای بررسی تاثیر قرارگیری مانع مثلثی در کنار دیواره بر ضریب انتقال حرارت صفحه



شکل ۲- هندسه مورد استفاده برای بررسی تاثیر قرارگیری مانع مربعی در کنار دیواره بر ضریب انتقال حرارت صفحه



شکل ۳- نمایی نزدیک از شبکه بندی مورد استفاده برای مانع مثلثی



شکل ۴- نمایی نزدیک از شبکه بندی مورد استفاده برای مانع مربعی

هوای خنک کننده در توربین گازی

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \overline{u'v'} \right) \quad (3)$$

جمله $-\rho \overline{u'v'}$ - تنش رینولدز (شار اندازه حرکت مغشوش) نامیده می شود که از اغتشاش میدان جریان با روشهای متفاوتی به مساله القاء می شود و نتیجه کارهای نظری در محاسبات عددی در انتخاب مدل اغتشاشی و چگونه ارتباط آنها به میدانهای متوسط محاسباتی است.

در این بررسی از مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ استفاده شده است. در این مدل از تعریف انرژی جنبشی اغتشاشی و انرژی استهلاک استفاده می شود که بصورت زیر است:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (4)$$

$$\epsilon = C \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (5)$$

با این تعاریف دو معادله فوق به معادلات حاکم اضافه می شود:

$$\text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + G - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\text{div}(\rho \epsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

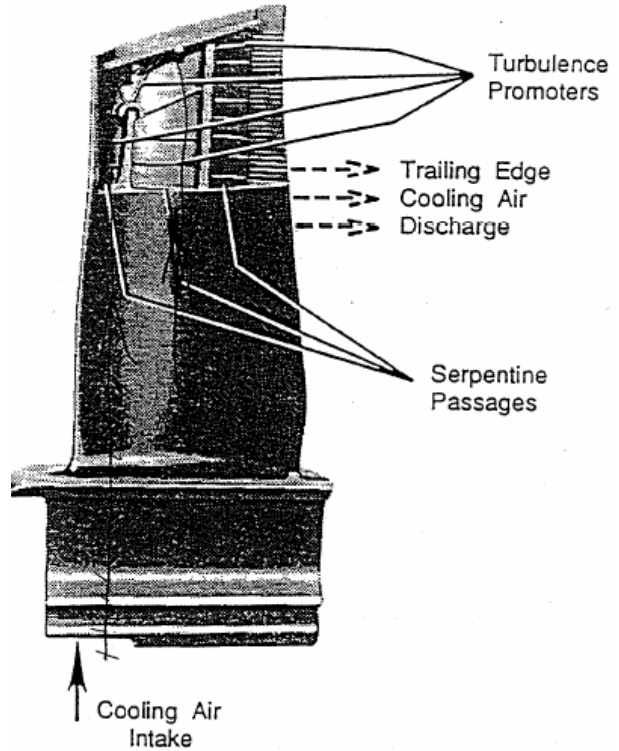
که در آن g نرخ تولید k یا ϵ است [5,6].

مدل عددی

جهت حل معادلات جریان مغشوش از محاسبات رایانه ای بهره گرفته شده است و در این میان بهره گیری از یک رویه حل عددی که علاوه بر دقت بالا، زمان کمی را برای محاسبه مطالبه نماید لازم می باشد. حوزه حل شامل سیال و مانع، توسط یک شبکه غیریکنواخت، گره بندی شده است. شبکه بندی به سمت صفحه و در حول مانع، ظریف تر می باشد. دما، فشار، گرمای ویژه و چگالی در هر گره محاسبه می شود. معادلات حاکم از روش حجم کنترل گسسته سازی می شوند. جملات جابه جایی در معادلات اندازه حرکت و انرژی، از روش قاعده توانی محاسبه می شوند. [7]

در این مقاله از روش نیمه ضمنی الگوریتم سیمپل و شبکه بندی جابجا شده بهره گرفته شد. در ارتباط با چگونگی

می گیرد. برای طبقه اول توربین که در معرض درجه حرارت شدید قرار دارد، نوع خنک کاری بسیار حائز اهمیت است. بنابراین علاوه بر خنک کاری *double-insert* خنک کاری فیلمی هم مورد نیاز است تا همراه با خنک کاری سوزنی - پره ای که شامل خنک کردن نوک پره می شود در کاهش دمای پره مؤثر باشد. در شکل (5) نمایی از پره توربین و مسیرهای خنک کننده پره مشاهده می شود.



شکل 5- نمایی از پره توربین و مسیرهای خنک کننده پره

مدل ریاضی

در این مقاله جریان سیال خنک کننده به صورت جریان دایمی، دو بعدی، غیر قابل تراکم، مغشوش و مادون صوت فرض می شود. دمای سطح ثابت می باشد و از نیروهای جسمی صرف نظر می شود. با فرض یک مقدار متوسط و یک مقدار نوسانی برای متغیرها از بقای جرم معادله پیوستگی بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

از بقای اندازه حرکت معادله عبارتست از:

دیگر حرکت جت لایه مرزی را شستشو می دهد که در اثر این عامل ضریب انتقال حرارت به شدت افزایش می یابد.

فاصله مانع از سطح صفحه بر مقدار ضریب انتقال حرارت موثر است. به نظر می رسد این تاثیر بواسطه تغییر شدید جت بر روی لایه مرزی می باشد. شکل ۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت برای مانعی به ابعاد 8×8 میلیمتر در داخل لایه مرزی در چهار فاصله مختلف از سطح صفحه را نشان می دهد. نمودار نشان می دهد که با افزایش فاصله مانع از سطح صفحه، که به نظر می رسد ناشی از کم شدن شدت جت باشد، مقدار

ضریب انتقال حرارت کاهش یافته است: یعنی $h_x = f\left(\frac{1}{h}\right)$

نتایج نشان می دهد متوسط ضریب انتقال حرارت در طول ۱ تا ۱/۷ متر روی صفحه تخت با قرار گرفتن مانعی به ابعاد 8×8 میلیمتر و به فاصله ۲ میلیمتر از سطح صفحه ۱۷/۴۸ درصد افزایش می یابد. در صورتیکه اگر همین مانع در فاصله ۴، ۸ و ۱۶ میلیمتری قرار گیرد به ترتیب ۱۵/۹۴ درصد، ۷/۵ درصد، ۲/۳ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت خواهیم داشت.

جهت بررسی طول مانع و اثر آن بر ضریب انتقال حرارت، مانعی در فاصله ۴ میلیمتری از سطح صفحه قرار داده شده و با تغییر طول مانع (a) به اعداد ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۴ میلیمتر (ارتفاع مانع ثابت و برابر ۸ میلیمتر نگه داشته می شود) نتایج ضریب انتقال حرارت را به دست می آوریم. نتایج به دست آمده در شکل ۷ جمع آوری شده است. این نتایج نشان می دهند که با افزایش طول مانع مقدار ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد:

$$\bar{h}_c \approx \frac{1}{a}$$

مقایسه ضریب انتقال حرارت صفحه بدون مانع با حالتی که مانع بر روی صفحه قرار گرفته است نشان می دهد که میزان تغییرات ارتفاع مانع به طول مانع در موقعیتی یکسان تاثیر بیشتری بر افزایش ضریب انتقال حرارت دارد، مثلاً در مانع های 8×12 و 8×16 میلیمتر متوسط ضریب انتقال حرارت به ترتیب ۲۰/۵ درصد و ۱۲/۱ درصد افزایش داشته است.

همچنین در شکل ۸ نمودار ضریب انتقال حرارت صفحه تحریک شده و صفحه تحریک نشده برای مانع مربعی مشاهده می شود.

عملکرد الگوریتم سیمپل^۱ مطالعه مرجع [8,9] به خواننده پیشنهاد می گردد. شبکه جابه جا شده برای محاسبه مولفه های سرعت و ضریب انتقال حرارت روی وجوه حجم کنترل بکار می رود. در ارتباط با شبکه جابه جا شده باید گفت که این نوع شبکه ابتدا توسط هارلو و ویچ درمتد MAG بکار رفته و سپس در سایر متدهای حل عددی توسعه یافته، این نوع شبکه اساس تعدادی از رویه های حل عددی از جمله رویه رایج سیمپل که توسط «پتنکار» و «اسپالدینگ» ارائه گردیده است.

یک روش خط به خط، حاصل ترکیب روش مستقیم الگوریتم ماتریس سه قطری برای یک راستا و روش تکراری، به همراه ضرایب زیر تخفیف، روش حل سیستم گسسته سازی شده معادلات حاکم می باشد. در محاسبه ضرایب معادله انفصال از طرح پیوندی استفاده شده است. با توجه به نوع پدیده و عدد رینولدز جریان، معادلات جریان در شکل پایا و در دستگاه مختصات کارتزین دو بعدی، غیر قابل تراکم بررسی شده اند.

میدان حل با استفاده از شبکه بندی متعامد غیر یکنواخت با تعریف 600×200 گره تعریف شده است. اندازه شبکه در روی صفحه تخت و مانع که میدان جریان مورد بررسی دارای پیچیدگی ها و تغییرات بیشتری است، با اندازه های ریزتر در نظر گرفته شده است. ابعاد شبکه مناسب بر اساس مقایسه نتایج حاصل از اجرای کد عددی با نتایج موجود برای صفحه تخت تعیین شده است.

بررسی نتایج مربوط به مانع مربعی

بررسی ها نشان می دهد که عبور جریان از مانعی که داخل لایه مرزی قرار می گیرد (مانع نزدیک سطح)، موجب ایجاد گردابه بعد از مانع، جت در زیر مانع (نزدیک دیواره)، نقطه سکون در پیشانی (محل برخورد با مانع) و منطقه بازگشت در پشت مانع و در فاصله دورتر می گردد. این عوامل تاثیر قابل ملاحظه ای بر میزان انتقال حرارت دارند. وجود جت در زیر مانع باعث از بین رفتن روند رشد لایه مرزی شده و جریان با سرعت بیشتری در کنار دیواره به حرکت در می آید. به عبارت

¹ SIMPLE

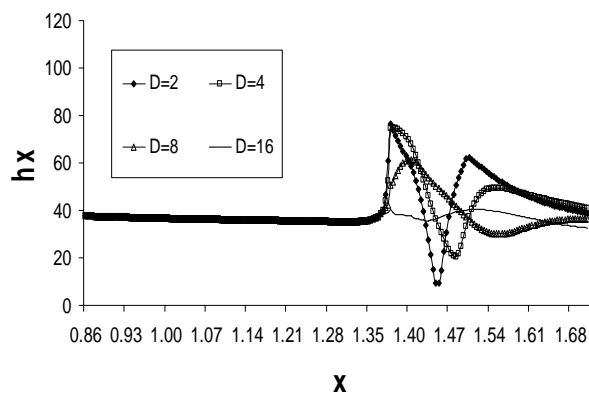
بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

در تمام نمودارهای مربوط به ضریب انتقال حرارت (h_x)، منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت قبل از رسیدن به مانع به سمت کاهش و پس از مانع بطور ناگهانی تغییر شدیدی در مقدار آن ملاحظه می شود.

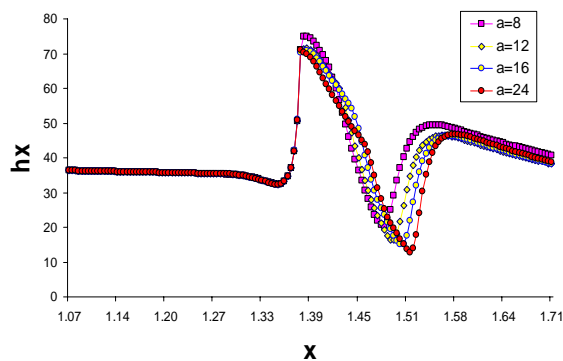
در شکل ۹ محدوده $a-b$ ، قبل از مانع و $b-c$ تا ابتدای مانع علامتگذاری شده اند.

پس از خارج شدن جریان از زیر مانع (شروع جریان جت) بدلیل سرعت زیاد جریان و کاهش فشار نسبی، پسگرده تشکیل می شود که این اثر نیز کاهش ضریب انتقال حرارت را به دنبال دارد، از طرفی گردابه ای در فاصله دورتر از مانع تشکیل می شود که جهت گردش آن عکس گردابه اول است (این گردابه پشت پله می باشد) و می توان چنین گفت که تحت تاثیر جریان فرود آمده از بالای مانع شکل گرفته باشد به دلیل اینکه دو گردابه مجاور دارای جریان چرخشی عکس هم می باشند جریان بین این دو گردابه دارای سرعت کوچکی است و از جابجایی ضعیفی برخوردار است. در این ناحیه اختلاف درجه حرارت با دیواره کاهش می یابد، که مسیر $c-d$ نیز تحول در فاصله بین این دو گردابه را نشان می دهد. ضریب انتقال حرارت در این فاصله به کمترین مقدار خود رسیده است.

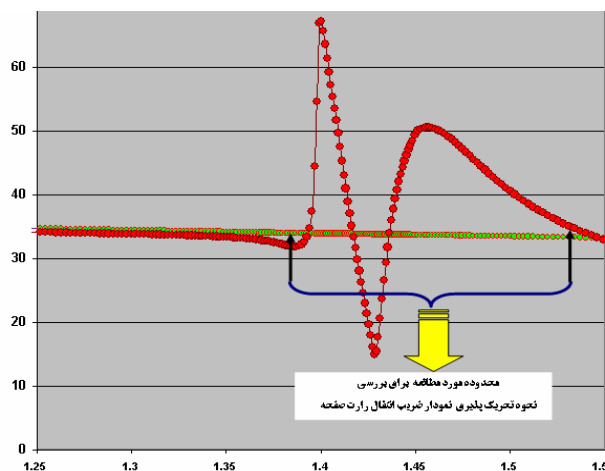
آخرین قسمت از تاثیر مانع بر ضریب انتقال حرارت بواسطه بوجود آمدن گردابه دوم که بزرگتر از اولی است می باشد. فعالیت این گردابه باعث افزایش نسبی ضریب انتقال حرارت شده است. این موضوع نیز در مسیر $d-e$ شکل ۹ مشخص می باشد. توجه شود که جریان قبل از نقطه a همان جریان روی صفحه تخت و ضریب انتقال حرارت (h_x)، همان مقدار مربوط به صفحه تخت بدون مانع است. جریان و ضریب انتقال حرارت پس از نقطه e نیز بازگشت به حالت جریان بر روی صفحه است. همچنین در شکل ۱۰ مناطق مورد بررسی در بالا و نمودار کانتور دما و خطوط جریان در اطراف مانع مربعی مشاهده می شود.



شکل ۶ - مقایسه ضرایب انتقال حرارت بر روی صفحه تخت در جریان آشفته ($Re_x = 10^6$) برای مانع مستطیلی با ابعاد $(8mm \times 8mm)$ در فواصل عمودی مختلف D از سطح صفحه



شکل ۷ - مقایسه ضرایب انتقال حرارت برای مانعی با ابعاد $(a mm \times 8 mm)$ در فاصله $D = 4 mm$

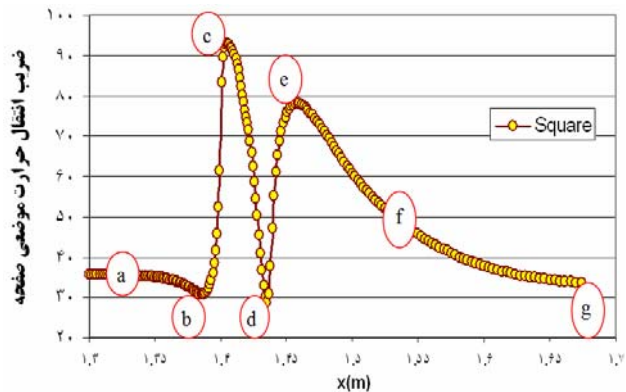


شکل ۸ - نمودار ضریب انتقال حرارت صفحه تحریک شده و صفحه

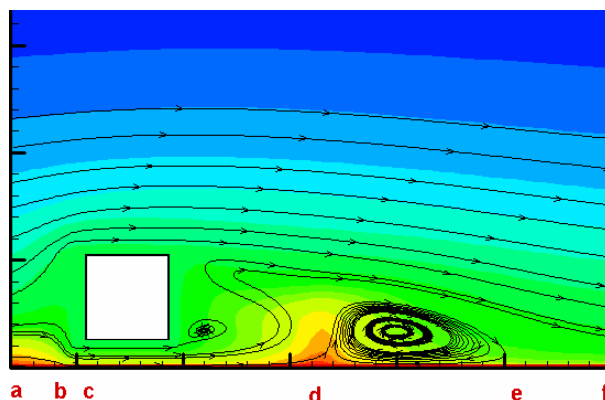
تحریک نشده برای مانع مربعی

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

عبور می کند و بواسطه فشار منفی نسبی جت ضعیفی تشکیل می شود و این فشار منفی در پشت پایین مانع، گردابه تشکیل می دهد که این اثر نیز کاهش ضریب انتقال حرارت را به دنبال دارد که مسیر d-e نشان دهنده این ادعا است. از طرفی به خاطر جریانی که از بالای مانع عبور کرده است گردابه ای در فاصله ای دورتر از مانع تشکیل می شود که جهت گردش آن عکس گردابه اول است (این گردابه شبیه گردابه پشت پله می باشد) به دلیل اینکه دو گردابه مجاور هم دارای جریان چرخشی عکس هم هستند سیال بین این دو جریان محبوس شده و درجه حرارت آن به بیشترین مقدار خود می رسد که مسیر e-f نیز فاصله بین این گردابه را نشان می دهد و دیده می شود که ضریب انتقال حرارت در این فاصله به کمترین مقدار خود رسیده است. در نهایت آخرین تاثیر مانع بر جریان ضریب انتقال حرارت بواسطه بوجود آمدن گردابه دوم که بزرگتر از اولی است، می باشد که این گردابه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده است این موضوع نیز در مسیر f-g شکل ۱۱ مشخص می باشد. بعد از منطقه گردابه نیز لایه های بالای گردابه مستقیماً در کنار سطح قرار می گیرند و از این رو گرادیان دما در کنار سطح دوباره به یک حد ماکزیمم می رسد و در ادامه نیز به تدریج سیال کنار دیواره گرم می شود و در نتیجه گرادیان دما و بر اثر آن ضریب انتقال حرارت سیر نزولی به خود می گیرد. در شکل ۱۲ خطوط جریان در اطراف مثلث با زاویه ۹۰ درجه نشان داده شده است و در شکل ۱۳ تاثیر مثلث با زوایای مختلف بر ضریب انتقال حرارت در ناحیه تحریک مشاهده می شود. در شکل ۱۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت صفحه برای مثلث با فواصل مختلف از صفحه نشان داده شده است و در شکل ۱۵ تغییرات ضریب انتقال حرارت از صفحه برای مثلث با ارتفاع های مختلف مشاهده می شود. در شکل ۱۶ تغییر قاعده مثلث بر ضریب انتقال حرارت نشان داده شده است.



شکل ۹ - نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت صفحه برای مانع مربعی در کنار دیواره در منطقه تحریک شده

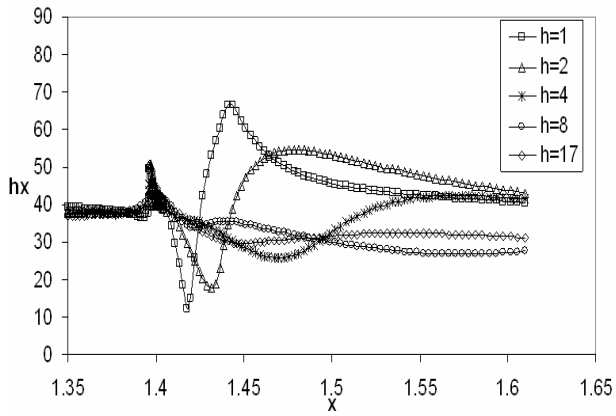


شکل ۱۰ - نمودار کانتور دما و خطوط جریان در اطراف مانع مربعی و صفحه

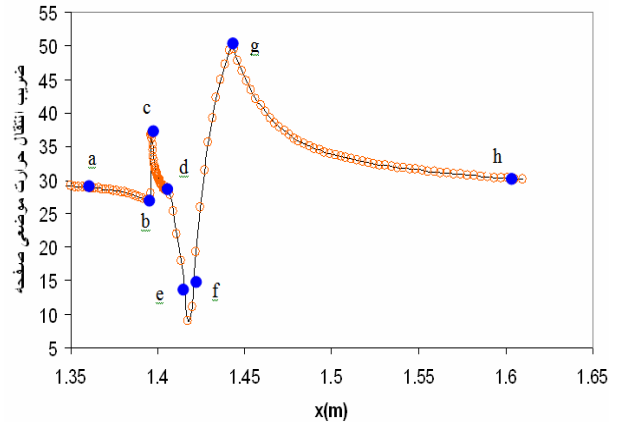
بررسی نتایج مربوط به مانع مثلثی

در شکل ۱۱ نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت بر روی صفحه همراه با مانع نمایش داده شده. مسیر a-b قبل از مانع و مسیر b-c در ابتدای مانع می باشد. در ادامه مسیر مقدار ضریب انتقال حرارت با شیب ثابتی کاهش پیدا می کند که این تغییر به واسطه طول مانع می باشد که هر چه این مقدار بیشتر باشد مسیری که منحنی h_x با شیب ثابت طی می کند نیز بیشتر است. مسیر c-d در شکل ۱۱ این مطلب را نشان می دهد. پس از گذشتن جریان از زیر مانع، جریان به مقدار کمی سرعت می گیرد که اگر در جلوی مانع نقطه سکونی وجود داشت، سرعت آن نیز بیشتر می شد، ولی در جلوی مانع نقطه سکون وجود نداشته و تنها جریان از زیر مانع به طور معمول

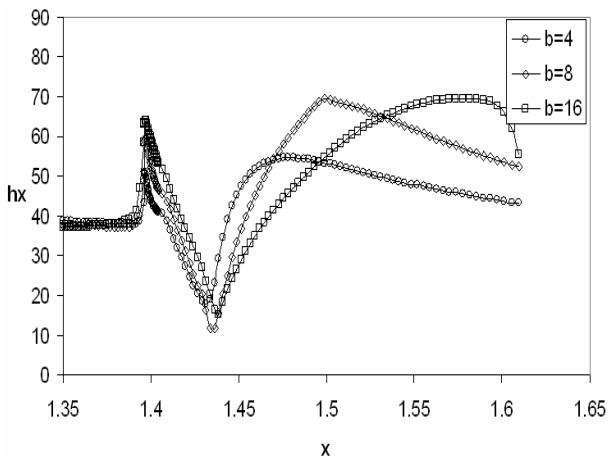
بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق



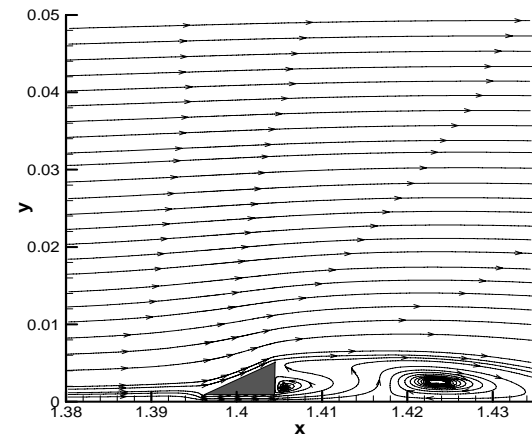
شکل ۱۰ - نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت صفحه برای مثلث با فواصل مختلف از صفحه



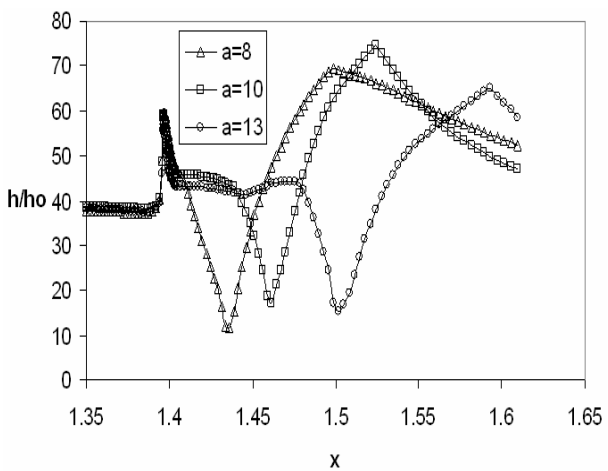
شکل ۱۱ - نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت در کنار صفحه برای مانع مثلثی



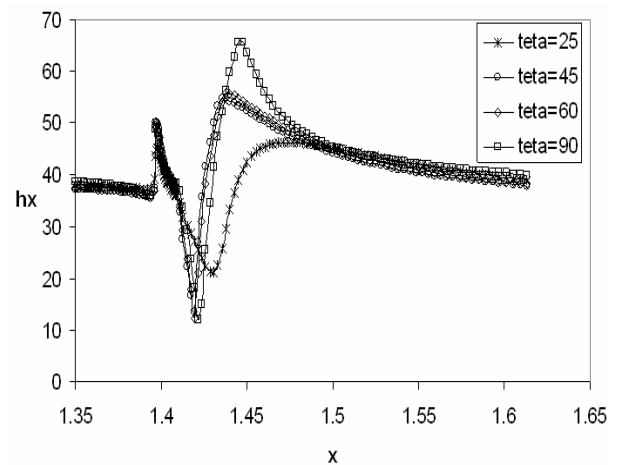
شکل ۱۲ - نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت از صفحه برای مثلث با ارتفاع های مختلف



شکل ۱۳ - خطوط جریان در اطراف مثلث با زاویه ۹۰ درجه

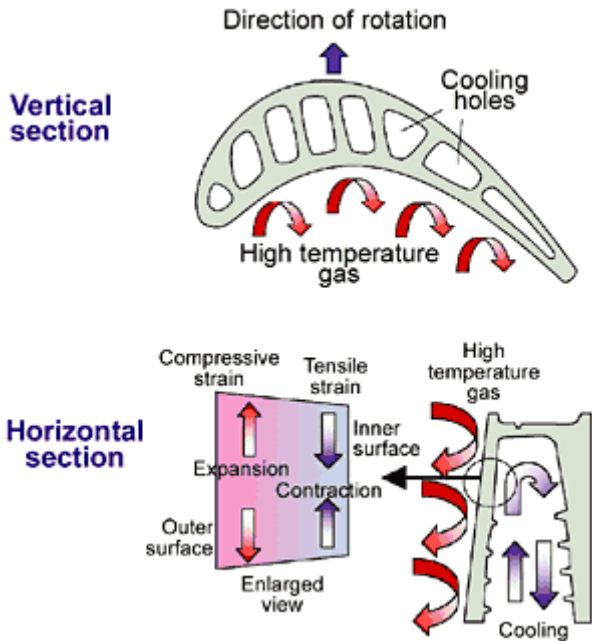


شکل ۱۴ - نمودار تغییر قاعده مثلث بر ضریب انتقال حرارت



شکل ۱۵ - نمودار تاثیر مثلث با زوایای مختلف بر ضریب انتقال حرارت در ناحیه تحریک

جمع بندی



در مورد تاثیر مانع مثلثی می توان ادعا کرد که افزایش ارتفاع مانع و زاویه مانع از صفر تا نود درجه و نیز افزایش رینولدز جریان باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می شود و نیز افزایش فاصله مانع از صفحه و طول مانع باعث کاهش ضریب انتقال حرارت از سطح می شود .

در مورد تاثیر مانع مربعی می توان گفت که افزایش فاصله مانع و طول مانع، موجب کاهش ضریب انتقال حرارت و افزایش ارتفاع مانع، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می شود یا به عبارتی

$$h_x \approx f\left(\frac{b^{n_1}}{a^{n_2} h^{n_3}}\right) \quad (8)$$

اعداد n_1, n_2, n_3 اعداد مثبت فرض می شوند.

نتایج مربوط به مانع مربعی نشان می دهد که متوسط ضریب انتقال حرارت با قرار گرفتن مانعی به ابعاد 8×8 میلیمتر و به فاصله ۲ میلیمتر از سطح صفحه $17/48$ درصد افزایش می یابد. در صورتیکه اگر همین مانع در فاصله ۴، ۸ و ۱۶ میلیمتری قرار گیرد به ترتیب $15/94$ درصد، $7/5$ درصد، $2/3$ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت خواهیم داشت. در نهایت می توان گفت با قرار دادن موانع در فواصل مشخص از دیواره پره توربین و در مسیر سیال خنک کاری، ضریب انتقال حرارت موضعی تا ۶ برابر افزایش می یابد. همچنین انتقال حرارت در ناحیه تحریک در مناسب ترین حالت افزایش ۲۰ درصدی را نشان می دهد. نحوه استفاده از نتایج مقاله برای تحلیل خنک کاری یک پره، به ابعاد پره و مشخصات جریان بستگی دارد. برای توربین ها با توان های مختلف ابعاد و اندازه های پره متفاوت می باشد، از اینرو نحوه انتخاب یک مانع مناسب برای انجام تحریک، در مرحله نخست بستگی به نوع توربین و ابعاد پره های آن دارد. علاوه بر آن عواملی همچون عدد رینولدز جریان، ضخامت لایه مرزی در محل قرارگیری مانع، در انتخاب نوع مانع نقش زیادی دارند. در شکل ۱۷ نمائی بزرگ از سیستم خنک کاری پره توربین نشان داده شده است.

شکل ۱۷- نمائی از سیستم خنک کاری در پره توربین

برای انتخاب بهترین مانع با بیشترین اثر تحریکی در افزایش ضریب انتقال حرارت می توان از روش های بهینه سازی همچون الگوریتم ژنتیک استفاده نمود. به طور کلی با توجه به طول پره و ناحیه تحریک هر مانع، می توان موانعی را در فواصل مشخصی از هم قرار داد تا فرایند خنک کاری در تمام طول پره توربین به بهترین نحو، صورت گیرد.

فهرست علائم

C_μ	عدد ثابت
div	عملگر دیورژانس
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
k	انرژی جنبشی اغتشاش
P	فشار
T	درجه حرارت
u	مؤلفه سرعت در جهت X
v	مؤلفه سرعت در جهت Y
x	مختصات در راستای افق
y	مختصات در راستای قائم
y^+	عدد رینولدز بی بعد

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

[1]- Bejan,A."Convection heat transfer",wiley-Interscience publication , Copyrighty(1996)	G	تولید اغتشاش
[2]-Schlichting ,H,"Boundary-Layer Theory",	g	شتاب گرانش
فهرست علائم یونانی		
[3]- Versteeg , Henk kaarle . “ An Introductions to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method “ Loughborough, 1997 .	ρ	دانسیته
	μ	لزجت
	ν	لزجت سینماتیکی
	τ	تنش برشی
[8]- پتنکار، س، ترجمه دکتر مقیمان، محمد، "محاسبات عددی-کامپیوتری انتقال حرارت و حرکت سیالات"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، شماره ۳۳، ۱۳۷۷	ε	اتلاف انرژی جنبشی اغتشاش
بالا نویسیها و زیر نویسیها		
[9]- ورستیگ، مالالاسکرا، ترجمه دکتر شجاعی فرد، محمد حسن، نورپور هشترودی، علیرضا، "مقدمه ای بر دینامیک سیالات محاسباتی <i>cf</i> "،	'	مقدار نوسانی کمیتها
	-	مقدار متوسط کمیتها
	+	کمیتهای بی بعد
	w	دیوار
	t	مغشوش

مراجع

[1]- Bard Venas and Lars R. Sætran. "Space-time correlations in separated flow behind a surface mounted obstacle" MFF- Report 1996, 1996(A), Norwegian University of Science and Technology.

[2]- Durst F. and Becker S. "Boundary layer transition induced by a roughness element" Internal report "Universitat Erlangen, Germany, INEEL LDRD Program, FY 1996

[3]- Anke Worner, Ulrich Rist, and Siegfried Wagner. "Humps/Steps Influence on Stability Characteristics of Two-Dimensional Laminar Boundar Layer" AAA Journal, Vol. 1, No 1, February 1996.

[4]- Sohankar Ahmad, Norberg C.,Davidson L. "Numerical Simulation of Flow Past a Square Cylinder" 1st ASME/JSME joint Fluids Engineering Conference, July 1996, San Francisco, California, USA