

AN INVESTIGATION OF FLOW VISCOSITY EFFECT ON SOME PROPERTIES OF FLUID FLOW THROUGH TWO DIMENSIONAL CASCADE OF GAS TURBINE BLADING

Mahmmud Ebrahimi

Faculty of Mechanical Engineering, iust.
ebrahimi@iust.ac.ir

S.Daruosh. Hashemi

daruosh_hashemi@yahoo.com

Abstract: In this paper the effects of flow viscosity on the property of fluid flow through gas turbine blading in two dimensional modes and for a sample of blade was investigated. The fluid used in this research is air which is considered as ideal gas for steady state flow condition. This analysis is done by a computer program which is developed for this purpose. This program has two arithmetic stages, so that at first step the inviscid part is computed then obtained data is used to compute the Viscose part one. This analysis is done for two cases separately and comparison results are shown as tables and graphs. The discussed properties in this paper are: Mach number, Pressure and Temperature.

بررسی اثر لزجت سیال روی برخی از خواص جریان گذرنده از میان ردیف پره‌های توربین‌های گازی در حالت دو بعدی

محمود ابراهیمی و سید داریوش هاشمی

چکیده: در این مقاله تأثیر لزجت روی خواص جریان سیال عبور از میان پره‌های توربین گازی در حالت دو بعدی و برای یک نمونه پره منتخب مورد بررسی قرار گرفته است. سیال مورد نظر هوا می باشد که بصورت گاز کامل فرض شده و اثرات لایه مرزی ناشی از چسبندگی روی خواص جریان سیال مد نظر قرار گرفته است. این آنالیز با استفاده از نرم افزاری کامپیوتری که به همین منظور تهیه شده، انجام می پذیرد. این نرم افزار شامل دو مرحله محاسباتی غیرلزج و لزج می باشد که ابتدا محاسبات بخش غیرلزج انجام می گیرد و سپس نتایج حاصل از آن برای حالت لزج مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج مربوط به حالت‌های غیر لزج و لزج به صورت مجزا توسط خروجی کامپیوتر، استخراج شده و اثرات چسبندگی روی خواص مورد نظر بدو صورت جدول و نمودار ارائه شده است. خواص بررسی شده در این مقاله عبارتند از: عدد ماخ، فشار و دما.

واژه های کلیدی: لزجت، توربین گاز، لایه مرزی، برنامه کامپیوتری

تاریخ وصول: ۸۶/۹/۲۰

تاریخ تصویب: ۸۷/۶/۱۶

دکتر محمود ابراهیمی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران. ebrahimi@iust.ac.ir

سیدداریوش هاشمی، کارشناس ارشد هوا فضا، اصفهان، شاهین شهر، شرکت صنایع هواپیماسازی ایران

۱. مقدمه

ضخامت جابجایی در رژیمهای متفاوت لایه مرزی شامل لایه مرزی آرام، ناحیه انتقال (انتقال طبیعی و جدایش حبابی)، لایه مرزی مغشوش محاسبه و پروفیل مؤثر پره اصلاح می‌گردد. این اصلاح بدین صورت می‌باشد که سطح مقطع مؤثر عبور سیال با توجه به اندازه ضخامت جابجایی در سطوح مکش و فشار کوچکتر می‌شود. محاسبات مربوط به بخش غیرلزج با پروفیل جدید پره انجام می‌پذیرد و تا حصول دقت لازم این فرایند تکرار می‌شود. برنامه کامپیوتر برای دو حالت غیرلزج و لزج بصورت جداگانه اجرا شده و نتایج حاصله بصورت جدول مقادیر، منحنی توزیع و منحنی تغییرات در سه خط جریان متفاوت در سطوح مکش، فشار و معبر میانه پره ارائه گردیده است. برای انجام آنالیز مربوط به این کار تحقیقاتی نرم افزار خاصی تهیه شده [۵] که اولین بار توسط آقای دنتون [۱، ۲، ۳، ۴] ارائه شده است. این نرم افزار، توسط یک تیم تحقیقاتی در دانشگاه بیرمنگام مورد بررسی واقع شده است و پس از اصلاحات لازم مورد استفاده قرار گرفته است. خروجی این برنامه با نتایج عملی اندازه گیری شده در آزمایشگاه، برای یک سری پره های توربین مشخص با هم مقایسه و نتایج حاصل به صورت نموداری در شکل (۱) ارائه شده است. همانطوریکه در این شکل مشاهده می‌شود، صحت نتایج تئوری با مقادیر عملی مطابقت لازم را دارند. در کار تحقیقاتی حاضر، این نرم افزار با تغییرات مورد نیاز اصلاح شده و مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج حاصل با توضیحات ذیل ارائه شده است.

۲. توضیحات لازم

۲-۱. توضیح مختصر در مورد نرم افزار مورد استفاده

همانطوریکه اشاره شد این نرم افزار بر اساس روش پیشرفت زمانی عمل می‌نماید و خواص ترمودینامیکی هر نقطه را در یک زمان مشخص محاسبه نموده و مقدار هر خاصیت را برای زمان بعدی با استفاده از مقدار زمان قبلی و تغییرات آن در فاصله زمانی Δt محاسبه نموده و این عمل را تکرار می‌نماید تا آنکه اختلاف دو مقدار بدست آمده در فاصله زمانی Δt به حد معیار معرفی شده، برسد. پس از این مرحله عملیات تکرار متوقف می‌گردد. برنامه اصلی دارای ۵ خط می‌باشد ولی با احتساب ساب روتین ها بیش از ۱۰۰۰ خط با زبان برنامه نویسی فترن نوشته شده است. برنامه برای تجزیه و تحلیل سیال تک فاز، دو فاز، یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی و در هر معبری و هر پروفیلی از پره دارای قابلیت لازم می‌باشد. همچنین جریان های مادون صوت و مافوق صوت را می‌تواند تجزیه و تحلیل نماید. که هر یک از این حالات را توسط ساب روتین مربوطه انجام می‌دهد، فلوچارت مختصری از برنامه بخاطر محدودیت فضای مقاله در شکل (۱۵) ارائه شده است و توضیح بیشتر آن در این مقاله امکان پذیر نمی‌باشد. چنانچه نیاز به اطلاعات بیشتر باشد به مرجع [۶] مراجعه شود.

بحران انرژی در دنیا محققین را بر آن داشته تا جهت صرفه جوئی در انرژی اقدامات چشم گیری به عمل آورند و در این راستا توجهات لازم و کوشش های جدی در مسیر بهینه سازی دستگاه های تولید و مصرف کننده انرژی میدول داشته اند. تحقیقات انجام گرفته در شصت سال اخیر باعث افزایش قابل ملاحظه ای در بازدهی توربین های گازی شده است.

حاصل این تحقیقات استفاده از روش های جدیدی است که براساس آنها می‌توان به کارائی بیشتر توربین های گازی دست یافت. افزایش درجه حرارت گاز ورودی به توربین و همچنین افزایش شدت جریان جرمی در شرایط کاری مساوی با استفاده از خنک کن های میانی و... از دیدگاه ترمودینامیکی تأثیر بسزایی در افزایش بازدهی توربین های گازی داشته است.

روش دیگری که می‌تواند از منظر ایرو دینامیکی باعث افزایش بازدهی توربین ها اعم از گازی یا بخاری گردد، بررسی اثرات چسبندگی سیال روی خواص سیال جریان یافته می‌باشد که کار تحقیقاتی حاضر در پی تبیین آن می‌باشد.

در این کار تحقیقاتی یک نمونه پره با پروفیل مشخص انتخاب شده است و مشخصات مورد نیاز آن توسط دستگاه اندازه گیری دقیق بدست آمده است. این مشخصات در جدول (۵) برای این پره تهیه و تنظیم شده است. هنگامیکه یک سیال واقعی (نظیر هوا) از میان ردیف پره های توربین در سرعت های عادی جریان پیدا می‌کند، تأثیر لزجت روی جریان بصورت یک لایه نازک در مجاور دیواره معبر جریان ظاهر می‌شود، این لایه را لایه مرزی نامیده اند. در خارج از این لایه جریان غیرلزج فرض می‌شود [۵]. لایه مرزی از یک ضخامت خیلی کوچک در نقطه سکون در لبه حمله پره شروع می‌شود و در طول سطوح فشاری و مکشی رشد می‌یابد، قسمت اولیه لایه مرزی همیشه بصورت لایه مرزی آرام می‌باشد. لایه مرزی آرام معمولاً دوام چندانی ندارد و اغلب از یک ناحیه انتقالی می‌گذرد و یک لایه مرزی مغشوش را بوجود می‌آورد،

در این تحقیق اثر لزجت سیال بصورت یک لایه نازک بنام لایه مرزی مد نظر قرار می‌گیرد این لایه مرزی در واقع ضخامت جابجایی است که پروفیل مؤثر پره طبق آن اصلاح می‌شود [۳-۴] و این بدین معناست که اندازه پره کمی بزرگتر از حالت بدون تأثیر لزجت سیال می‌باشد.

پس در هر بار محاسبه خواص جریان هندسه پره با توجه به لایه مرزی تصحیح می‌گردد. اساس تجزیه و تحلیل این مقاله توسط یک برنامه کامپیوتری صورت می‌گیرد که به منظور بررسی چسبندگی سیال روی خواص جریان تهیه شده است [۵].

این برنامه کامپیوتری از دو بخش غیر لزج و لزج تشکیل شده است، که معادلات مربوط به بخش غیرلزج آن از روش پیشرفت زمانی که توسط دنتون ارائه گردید، حل می‌شوند و در بخش لزج آن اندازه

در این جدول مقادیر X مربوط به گره‌ها در مجموعه ابتدایی جدول درج شده که تعداد آنها ۱۱۵ عدد می‌باشند. در ناحیه وسط این جدول لایه‌های مربوط به نقاط سطح مکش درج شده‌اند که عرض مربوط به لبه برخورد پره ۶۶/۹، A میلی‌متر و عرض لبه فرار آن ۴۴/۶ میلی‌متر می‌باشند.

ملاحظه می‌گردد که از ابتدای مبدأ مختصات در جهت محور X، تعداد ۲۳ مقدار که بطور مساوی تکرار شده‌اند مربوط به مبدأ فرضی تا لبه برخورد پره می‌باشند. لذا نقاط مربوط به سطح مکش پره A از شماره ۲۳ (۶۷/۶۷۶۹ میلی‌متر) شروع می‌شود و تا شماره ۶۸ (۴۶/۷۱۱۷ میلی‌متر) که مربوط به لبه فرار پره A می‌باشد، ادامه می‌یابد، و از آن به بعد مقادیر مربوط به پایین دست جریان خروجی از پره می‌باشند. در قسمت انتهایی جدول مقادیر لایه‌های مربوط به سطح فشار پره درج شده است، که مقادیر آن مشابه سطح مکش تنظیم شده‌اند. آخرین مقدار جدول مربوط به فاصله دو پره متوالی (pitch) می‌باشد که برای این پره برابر با ۱۶/۰۷۱۱ میلی‌متر درج شده است.

۳. شرایط ورودی و خروجی

خواص مورد نیاز سیال ورودی و خروجی برای هر دو پره یکسان در نظر گرفته شده است و مقادیر ذیل به برنامه وارد شده‌اند:

$$P_{oin} = 1724 (kPa)$$

$$T_{oin} = 392 (K)$$

$$P_{in} = 161.3 (kPa)$$

$$\beta = 0.0 (deg)$$

$$P_{out} = 101.4 (kPa)$$

۴. بررسی برخی از خواص جریان

جدول ۱ مختصات محل گلوگاه، پدیده شاک و عدد ماخ یک را نشان می‌دهد. جداول دیگر و نمودارها و کانتورهای ارائه شده تبیین‌کننده اثرات چسبندگی روی خواص مورد نظر می‌باشند. در اینجا بصورت اجمالی و با استفاده از جداول، منحنی‌های توزیع و تغییرات خواص، تأثیر چسبندگی روی خواص سه گانه دما، فشار و عدد ماخ مورد بررسی قرار می‌گیرند. لذا جهت اطلاع از جزئیات مساله، معادلات حاکم و کارایی‌های برنامه کامپیوتری به مرجع [۵] مراجعه نمایید.

جدول ۱. مختصات ابتدا و انتهای گلوگاه، خط ماخ یک و خط

بیشترین عدد ماخ روی سطوح مکش و فشار

	در سطح مکش		در سطح فشار	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
THROAT	33.4	62.7	38.2	65.3
SHOCK	35.8	58.3	40.7	61.3
M=1	32.5	64.0	38.7*	64.4

۲-۲. توضیح مختصر در مورد معادلات مورد استفاده

معادلات دیفرانسیلی پیوستگی و مونتوم برای جریان سیال تک فاز دو بعدی پایدار قابل تراکم در جهت X به صورت ذیل می‌باشند:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (1)$$

این معادلات پس از تلفیق و بی بعد شدن با انتگرال گیری بر حسب y از $y = 0$ تا $y = h_1 > \delta$ به صورت ذیل در می‌آید:

$$\frac{d}{dx} \left[\rho_\epsilon u_\epsilon^2 \int_0^{h_2} \frac{\rho u}{\rho_\epsilon u_\epsilon^2} (u_\epsilon - u) dy \right] + \frac{du_\epsilon}{dx} \rho_\epsilon u_\epsilon \left[\int_0^{h_1} \frac{\rho_\epsilon u_\epsilon - \rho u}{\rho_\epsilon u_\epsilon} dy \right] = \tau_w \quad (2)$$

که در آن، اندیس ϵ مربوط به جریان خارج از لایه مرزی می‌باشد و τ_w تنش برشی در دیواره می‌باشد.

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3)$$

و با تعریف روابطی به صورت زیر معادله فوق به صورت ذیل در می‌آید:

$$(4)$$

$$\delta^* = \int_0^{h_1} \frac{\rho_\epsilon u_\epsilon - \rho u}{\rho_\epsilon u_\epsilon} dy$$

$$\theta = \int_0^{h_1} \frac{\rho u}{\rho_\epsilon u_\epsilon^2} (u_\epsilon - u) dy$$

$$\rho_\epsilon u_\epsilon^2 \frac{d\theta}{dx} + 2\rho_\epsilon u_\epsilon \theta \frac{du_\epsilon}{dx} + u_\epsilon^2 \theta \frac{d\rho_\epsilon}{dx} + \rho_\epsilon u_\epsilon \delta^* \frac{du_\epsilon}{dx} = \tau_w$$

و شکل بدون بعد آن به صورت ذیل خواهد بود:

$$\frac{d\theta}{dx} + \frac{2\theta}{u_\epsilon} \frac{du_\epsilon}{dx} + \frac{\theta}{\rho} \frac{d\rho_\epsilon}{dx} + \frac{\delta^*}{u_\epsilon} \frac{du_\epsilon}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho_\epsilon u_\epsilon^2} \quad (5)$$

برای اطلاعات بیشتر به مرجع [۱] مراجعه شود.

همانطوریکه اشاره شد مشخصات مورد نیاز مربوط به این پره در جدول (۵) درج شده است. مقادیر این جدول برحسب ضرورت شبکه بندی مربوط به المان‌های محدود که مطابق شکل (۱۴) برای پره مورد نظر رسم شده است، دارای یکصدوپانزده تقسیم در جهت محور X و سیزده تقسیم در جهت محور Yها بوده که در سه مجموعه تنظیم شده‌اند.

× در جریان لزج این نقطه بصورت (61.7, 40.5) می باشد.

۴-۳. تغییرات عدد ماخ

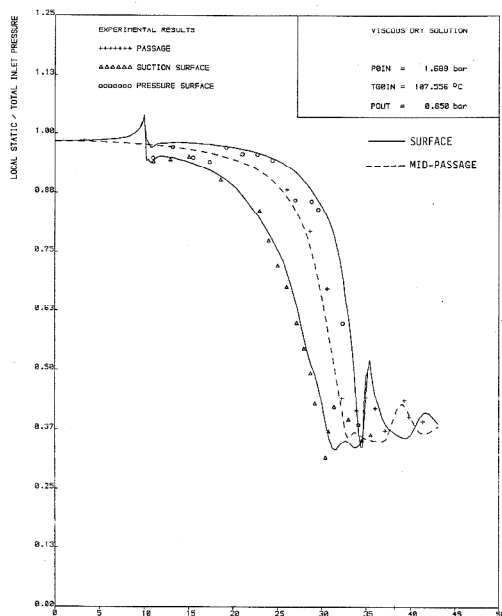
اشکال ۱۰الی ۱۳ تفاوت‌های موجود در عدد ماخ برای دو حالت لزج و غیرلزج را نشان می‌دهند که تغییرات عدد ماخ برای سه خط جریان متفاوت برای دو حالت لزج و غیرلزج در اشکال ۱۱ و ۱۳ نشان داده شده‌اند. تفاوت عدد ماخ در لبه حمله و بخصوص بعد از آن در سطح فشار برای دو حالت مذکور مشهود می‌باشند. این تفاوتها در بعد از لبه فرار سطح فشار مشهودتر ند. مقدار عدد ماخ در حالت غیرلزج برای سه خط جریان متفاوت در پایین دست جریان در لبه فرار سریعتر به یک دیگر نزدیک می‌شوند، در حالیکه برای حالت لزج مقدار آن در انتهای سطح فشار در پایین دست جریان لبه فرار تفاوت زیادی با دو خط جریان دیگر دارد. جدول ۴ حداکثر و حداقل مقدار عدد ماخ مربوط به سه خط جریان متفاوت برای دو حالت را نشان می‌دهد، در ضمن اشکال ۱۰ و ۱۲ منحنی توزیع عدد ماخ برای هر دو حالت می‌باشند که تفاوت‌های مذکور در منحنی‌های توزیع نیز مشاهده می‌شوند.

جدول ۴. حداقل و حداکثر عدد ماخ در سه خط جریان

تفاوت برای دو حالت لزج و غیرلزج

	با در نظر گرفتن لزجت		بدون در نظر گرفتن لزجت	
	Min	Max	Min	Max
M_s	0.103*	1.232*	0.104*	1.228*
M_m	0.203	1.188	0.206	1.180
M_p	0.103	1.193	0.104	1.206

× این اعداد برای کل میدان محاسباتی نیز حداقل و حداکثر می باشند.



شکل ۱. مقایسه نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری و مقادیر عملی که از آزمایش بدست آمده اند.

۴-۱. تغییرات دما

تغییرات دما در دو حالت لزج و غیرلزج تفاوت‌هایی با هم دارند که از جمله تفاوت‌های فاحش آن در لبه فرار سطح فشار و پایین دست جریان می‌باشد (اشکال ۲ تا ۵). حداکثر و حداقل مقدار دما در سطوح مکش و فشار برای دو حالت خیلی بهم نزدیک می باشند. اشکال ۲ و ۴ منحنی توزیع دما را برای دو حالت مذکور نشان می‌دهند، تفاوت‌های یاد شده در بالا به خوبی در این منحنی‌های توزیع مشاهده می‌شوند. همانطور که گفته شد این تفاوتها بر اثر حضور لایه مرزی می‌باشند.

جدول ۲. حداقل و حداکثر دما در سه خط جریان متفاوت

برای دو حالت لزج و غیرلزج

	غیر لزج		لزج	
	Min	Max	Min	Max
$T_s(K)$	347.9*	391.6*	348.1*	391.6*
$T_m(K)$	350.6	390.6	351.1	390.3
$T_p(K)$	350.3	391.6*	349.5	391.6*

× این اعداد برای کل میدان محاسباتی نیز حداقل و حداکثر می‌باشند.

۴-۲. تغییرات فشار

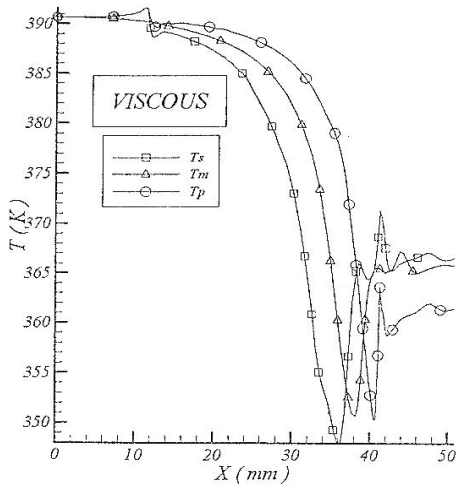
تغییرات فشار در دو حالت لزج و غیرلزج نیز تفاوت‌هایی دارند، از جمله در لبه حمله و در لبه فرار که در اشکال ۶الی ۹ دیده می‌شوند. حداکثر و حداقل مقدار فشار در سه خط جریان متفاوت برای دو حالت لزج و غیرلزج در جدول ۳ آمده است در اینجا نیز حداکثر و حداقل مقدار فشار نیز در سطوح مکش و فشار برای دو حالت خیلی بهم نزدیک می‌باشند. اشکال ۷ و ۸ منحنی توزیع فشار و اشکال ۷ و ۹ منحنی تغییرات در سه خط جریان متفاوت را برای دو حالت لزج و غیرلزج نشان می‌دهند. شکل توزیع فشار در لبه حمله و پائین دست آن دارای تفاوت‌های کمی می‌باشند که این تفاوتها در لبه فرار و بعد از آن بخصوص در سطح فشار پره محسوس تر می‌باشند. این تفاوتها ناشی از وجود لایه مرزی و اصلاح پروفیل مؤثر پره می‌باشد.

جدول ۳. حداقل و حداکثر فشار در سه خط جریان متفاوت

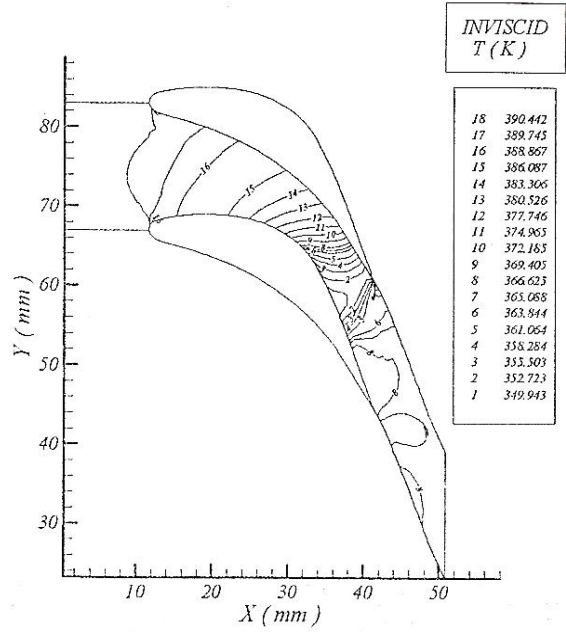
برای دو حالت لزج و غیرلزج

	غیر لزج		لزج	
	Min	Max	Min	Max
$P_s(Kpa)$	71.888*	179.613*	72.131*	180.447*
$P_m(Kpa)$	75.407	169.010	75.832	168.933
$P_p(Kpa)$	76.57	176.452	76.8222	179.527

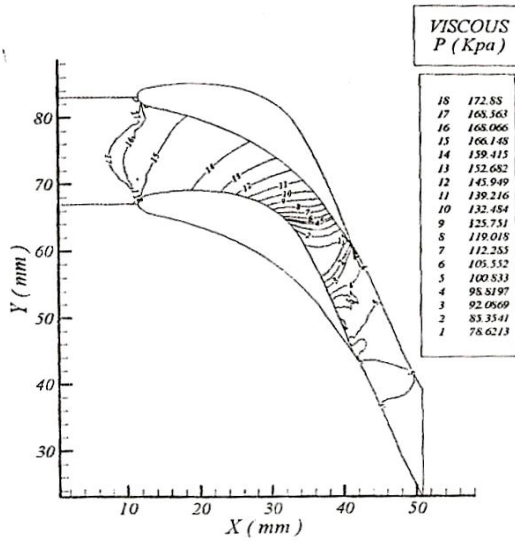
× این اعداد برای کل میدان محاسباتی نیز حداقل و حداکثر می‌باشند.



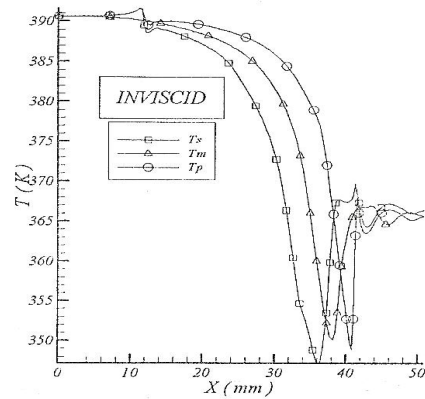
شکل ۵. تغییرات دما در سه خط جریان متفاوت در سطوح مکش، فشار و میانه پره برای جریان غیرلزج



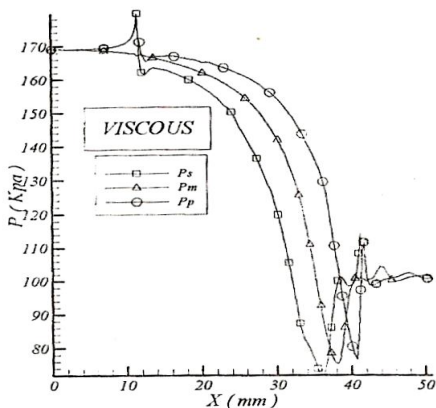
شکل ۲. منحنی توزیع دما برای جریان لزج



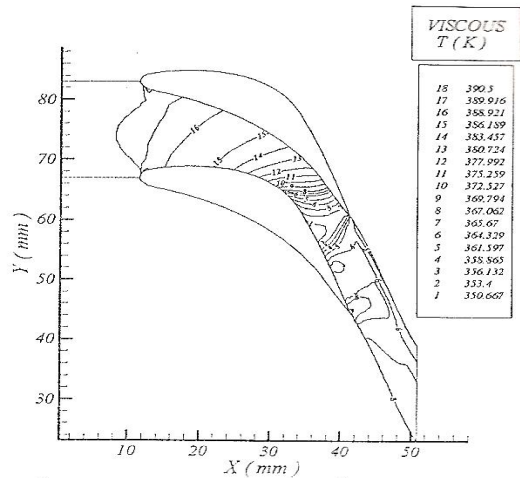
شکل ۶. منحنی توزیع فشار برای جریان لزج



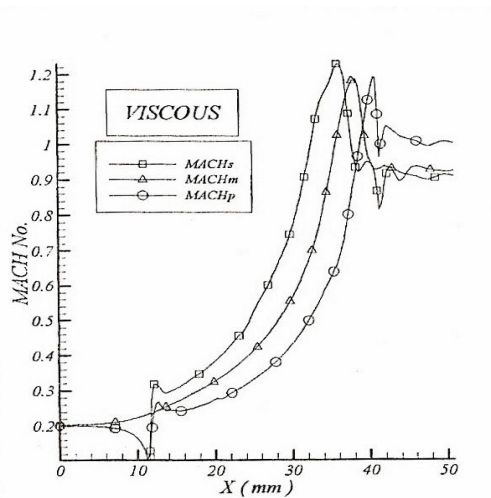
شکل ۳. تغییرات دما در سه خط جریان متفاوت در سطوح مکش، فشار و میانه پره برای جریان لزج



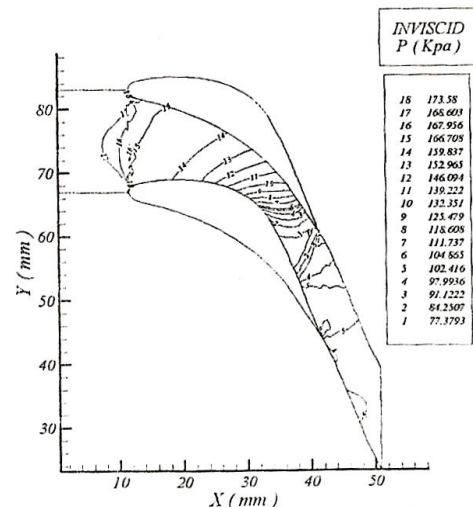
شکل ۷. تغییرات فشار در سه خط جریان متفاوت در سطوح مکش، فشار و میانه پره برای جریان لزج



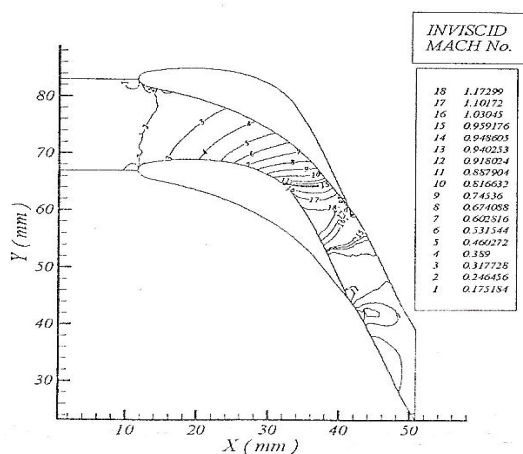
شکل ۴. منحنی توزیع دما برای جریان غیرلزج



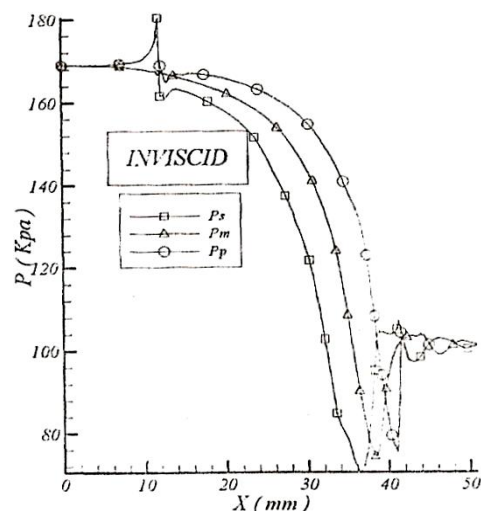
شکل ۱۱. تغییرات عدد ماخ در سه خط جریان متفاوت در سطوح مکش، فشار و میانه پره برای جریان لزج



شکل ۸. منحنی توزیع فشار برای جریان غیرلزج



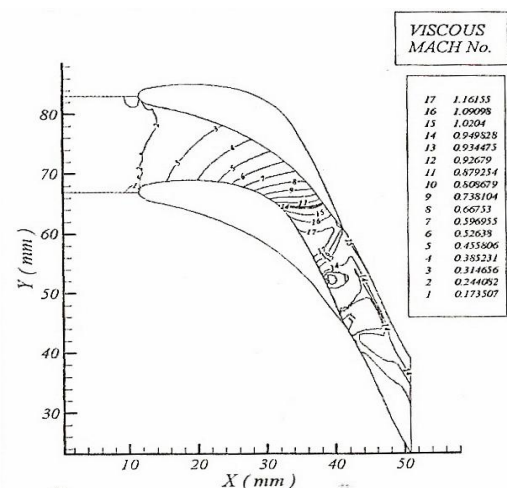
شکل ۱۲. منحنی توزیع عدد ماخ برای جریان غیرلزج



شکل ۹. تغییرات فشار در سه خط جریان متفاوت در سطوح مکش، فشار و میانه پره برای جریان غیرلزج

۴. نتیجه گیری

با توجه به جدول شماره (۲) و نمودارهای ۲، ۳، ۴ و ۵ بنظر می رسد که چسبندگی سیال روی تغییرات دما در معبر جریان مؤثر می باشد، بخصوص این تغییرات در خروجی از پره مشهود تر است. جدول شماره (۳) و شکل‌های ۶ الی ۹ بیانگر تغییرات فشار در معبر جریان بین دو پره مورد نظر می باشند. با توجه به این جدول و شکل‌ها تأثیر چسبندگی در لبه فرار کاملاً مشهود می باشد. با مراجعه به کانتور فشار در دو شکل ۶ و ۷ و نمودارهای شکل ۷ و ۹ این تفاوت آشکار تر می باشد. جدول شماره ۴ و اشکال چهار گانه ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تأثیر چسبندگی روی عدد ماخ را نشان می دهند. این تأثیر در خروجی از پره کاملاً واضح می باشد. با توجه به دو شکل ۱۱ و ۱۳ تغییرات عدد ماخ در سه خط جریان در خروجی از پره برای دو حالت لزج و غیر لزج کاملاً متفاوت بوده و این تفاوت در لبه حمله مشاهده نمی‌شود، زیرا در لبه حمله لایه مرزی شروع به شکل گیری نموده و هر قدر به انتهای پره نزدیک می‌شود ضخامت آن افزایش یافته و در نتیجه تأثیر چسبندگی در پائیندست جریان



شکل ۱۰. منحنی توزیع عدد ماخ برای جریان لزج

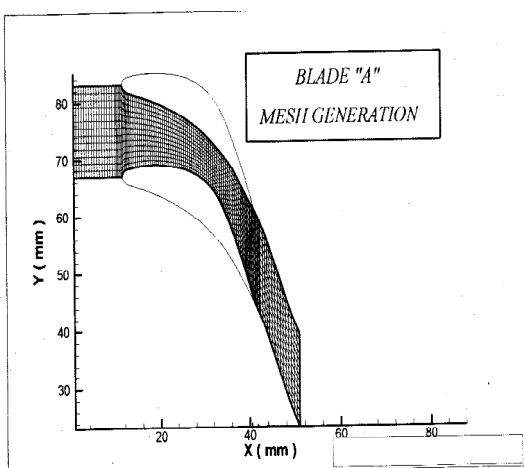
آرام ناحیه انتقال آغاز می‌شود که مقدار ضخامت جابجایی در این رژیم نیز نسبت به لایه مرزی مغشوش کمتر می‌باشد در انتهای پره لایه مرزی مغشوش اتفاق می‌افتد. اندازه ضخامت جابجایی در این ناحیه از لایه مرزی بیشتر از سایر موارد مذکور می‌باشد. البته این تأثیرات با تغییر شرایط ورودی و خروجی، تغییر می‌کنند. نتیجه اینکه در محاسبات و طراحی‌ها می‌بایست اثرات لایه مرزی را مدنظر قرار داد.

بیشتر بروز و نمود می‌نماید. با اینکه لایه مرزی دارای ضخامت بسیار ناچیزی می‌باشد ولی تفاوت‌هایی بین دو حالت لزج و غیرلزج مشاهده می‌شود، که این تفاوتها در لبه فرار و بعد از آن برای تغییرات فشار، دما و عدد ماخ مشهودتر می‌باشند. دلیل اینکه در هر سه خاصیت بررسی شده اهم تفاوتها در لبه فرار پره و بعد از آن می‌باشد این است که در لبه حمله بدلیل وجود لایه مرزی آرام مقدار ضخامت جابجایی بیش از حد کم می‌باشد، بعد از لایه مرزی

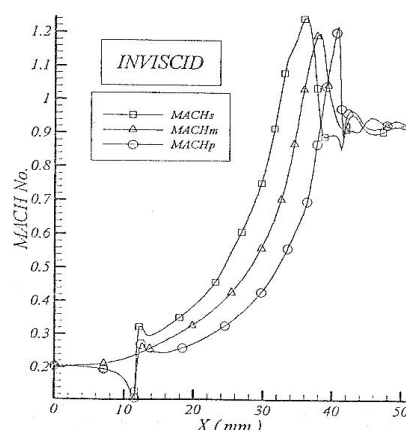
جدول ۵. مشخصات پره منتخب

BLADE "A"											
00.0000	00.5900	01.1800	01.7700	02.3600	02.9500	03.5400	04.1300	04.7200	05.3100	05.9000	
06.4900	07.0800	07.6700	08.2600	08.8500	09.4400	10.0300	10.6200	11.2100	11.8000	12.3900	
11.5050	11.8000	12.0950	12.3900	12.6850	12.9800	13.2750	13.5700	13.8650	14.1600	14.4550	
15.5465	16.0185	16.4905	16.9625	17.4345	17.9065	18.3785	18.8505	19.3225	19.7945	20.2665	
20.7385	21.2105	21.6825	22.1545	22.6265	23.0985	23.5705	24.0425	24.5145	24.9865	25.4585	
25.9305	26.4025	26.8745	27.3465	27.8185	28.2905	28.7625	29.2345	29.7065	30.1785	30.6505	
31.1225	31.5945	32.0665	32.5385	33.0105	33.4825	33.9545	34.4265	34.8985	35.3705	35.8425	
36.3145	36.7865	37.2585	37.7305	38.2025	38.6745	39.1465	39.6185	40.0905	40.5625	41.0345	
40.0610	40.2970	40.5330	40.7690	41.0050	41.2410	41.4770	41.7130	41.9490	42.1850	42.4210	
42.8930	43.3650	43.8370	44.3090	44.7810	45.2530	45.7250	46.1970	46.6690	47.1410	47.6130	
49.0290	49.6190	50.2090	50.7990	51.3890	51.9790	52.5690	53.1590	53.7490	54.3390	54.9290	
66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	
66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	
66.9238	67.6769	67.9532	68.1331	68.2553	68.3292	68.3887	68.4608	68.5522	68.6279	68.6938	
68.7552	68.8083	68.8537	68.8911	68.9208	68.9429	68.9573	68.9641	68.9634	68.9552	68.9394	
68.9161	68.8851	68.8464	68.8002	68.7462	68.6843	68.6145	68.5365	68.4503	68.3532	68.2356	
68.1032	67.9549	67.7904	67.6085	67.4082	67.1882	66.9470	66.6824	66.3986	66.0928	65.7581	
65.3902	64.9837	64.5308	64.0205	63.4365	62.7446	61.9531	61.1138	60.2261	59.2905	58.3074	
57.2770	56.2001	55.1183	54.0511	52.9280	52.1987	51.4501	50.7061	50.0026	49.3676	48.7210	
48.0638	47.4016	46.7117	46.0133	45.2835	44.6833	44.3000	43.8977	43.4845	43.0544	42.6057	
41.6095	40.5603	39.4753	38.3685	36.9481	35.4968	34.0144	32.4897	30.9354	29.4261	28.0236	
26.7236	25.4931	24.3003	23.1116	21.8801	20.6056	19.3381	18.0786	16.8271	15.5836	14.3471	
66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	
66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	66.9238	
66.9238	66.4169	66.1038	65.8705	65.6885	65.5953	65.5161	65.4157	65.2831	65.1624	65.0467	
64.9363	64.8147	64.6876	64.5550	64.4173	64.2742	64.1256	63.9715	63.8115	63.6456	63.4739	
63.2959	63.1116	62.9209	62.7235	62.5195	62.3097	62.0929	61.8688	61.6374	61.3980	61.1507	
60.8949	60.6307	60.3575	60.0751	59.7831	59.4805	59.1669	58.8418	58.5049	58.1552	57.7925	
57.4156	57.0236	56.6170	56.1950	55.7567	55.3010	54.8264	54.3311	53.8187	53.2822	52.7113	
52.1006	51.4434	50.7310	50.0043	49.2776	48.5234	48.3692	47.9150	47.5063	47.1429	46.7795	
46.4161	46.0528	45.6894	45.3261	44.9627	44.6833	44.3000	43.8977	43.4845	43.0544	42.6057	
41.6095	40.5603	39.4753	38.3685	36.9481	35.4968	34.0144	32.4897	30.9354	29.4261	28.0236	
26.7236	25.4931	24.3003	23.1116	21.8801	20.6056	19.3381	18.0786	16.8271	15.5836	14.3471	

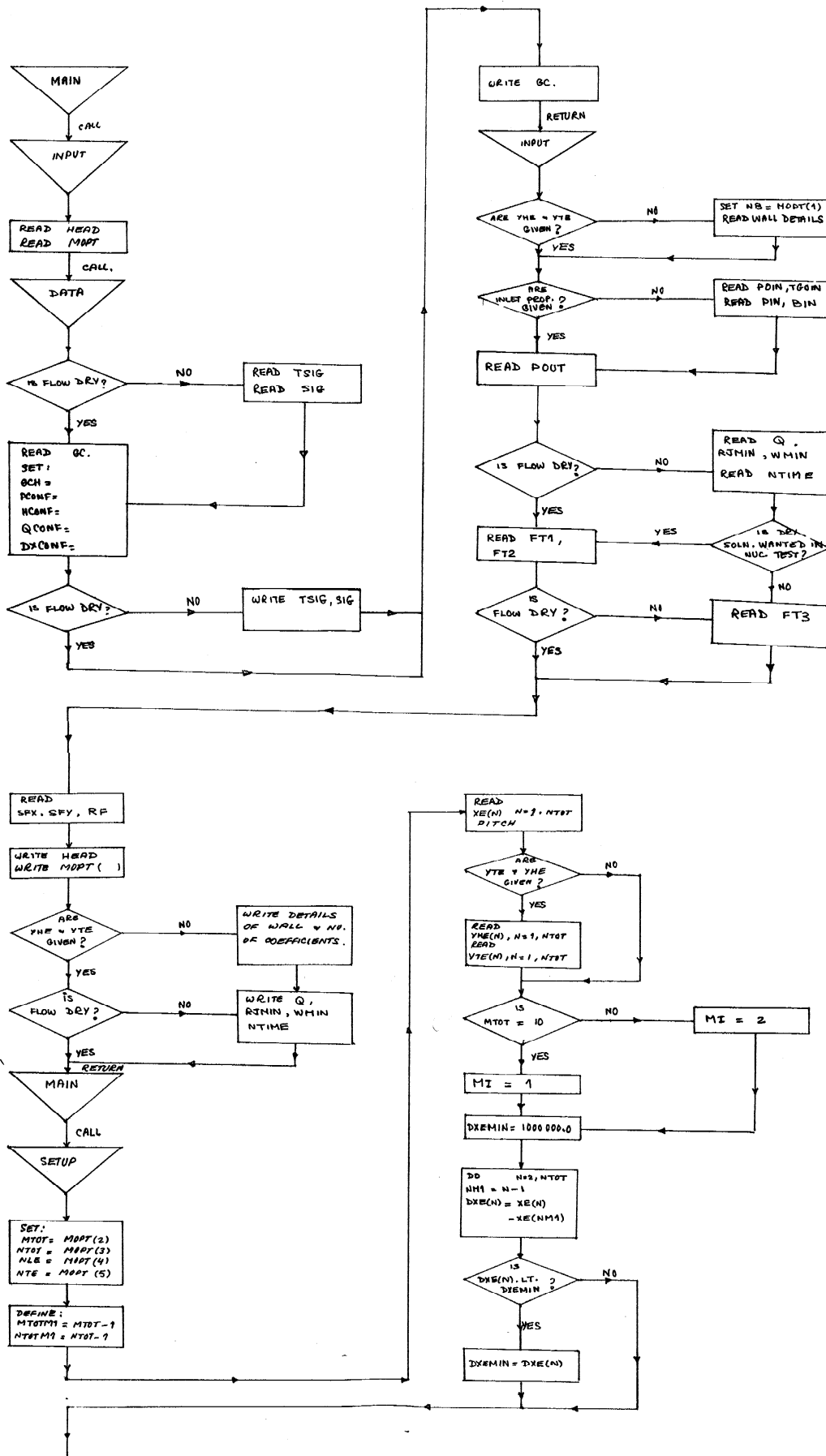
PITCH = 16.0711



شکل ۱۴. شبکه بندی برای پره A



شکل ۱۳. تغییرات عدد ماخ در سه خط جریان متفاوت در سطوح مکش، فشار و میانه پره برای جریان غیرلزج



شکل ۱۵. فلوجارت برنامه کامپیوتری

مراجع

- [1] Denton, J.D., Singh, U.K., "Time Marching Methods for Turbo Machinery Flow Calculation," V.K.I Lecture Series, Application of numerical methods to flow calculations in turbo – machines, April 23-27, 1979.
- [2] Mc Donald, P.W., "The Computation of Transonic Flow Through Two Dimensional Gas Turbine Cascades," A.S.M.E., 1971, pp. 71-79.
- [3] Bradshaw, P., Ferriss, D.H. and Atwell, N.P., "Calculation of Boundary Layer Development Using the Turbulent Energy Equation," J. of Fluid mech., Vol. 28, part 3, May 1967, pp. 593-616.
- [4] Patankar, S.V., Spalding, D.B., "A Finite Difference Procedure for Solving the Equations of Two Dimensional Boundary Layer," International J. of heat and mass transfer, Vol. 10, Oct. 1967, pp.1389-1412.
- [5] Hashemi, S.D. "Effect of Turbine Blades Profile on the Flow Properties Passing Through Gas Turbine Blade Rows," M.SC., Thesis, Department Of Mechanical Engineering, Iran University Of Science and Technology, Sep. 1999.
- [6] Abbas.k.k. "An Investigation of Nucleating Flows of Steam in a Cascade of Turbine Blading Theoretical Treatment." PhD Thesis, Mech. Eng. Depart. University Of Birmingham

فهرست علائم

خط جریان در وسط فضای بین دو پره	m
خط جریان در سطح فشار	p
خط جریان در سطح مکش	s
لبه حمله	L.E.
عدد ماخ	M
فشار استاتیک	P
فشار سکون	P _o
دمای سکون	T _o
لبه فرار	T.E.
طول نقطه مفروض	X
عرض نقطه مفروض	Y
زاویه نصب پره	β

علائم زیر نویس

خرویدی	in
وروجی	Out
معبور وسط	M
معبور سطح فشار	p
معبور سطح مکش	S