



طراحی بهینه‌ی پره‌های راهنمای ورودی (IGV) برای کمپرسورهای گریز از مرکز

احمد هاشمی^۱، محسن برومند^۲، علیرضا علی حسینی^۳

شرکت ماشین سازی منگان

چکیده

به حداقل برسد. زیاد بودن این فاصله، اغتشاش جریان در خروجی را کمتر کرده ولی از طرفی باعث بیشتر شدن اختلاف زاویه پره با زاویه جریان خروجی می‌شود و کم بودن این فاصله باعث اغتشاش بیشتر جریان در خروجی می‌شود. از این‌رو نیاز به بهینه کردن این فاصله است. یک طراح، افزون بر چالش‌هایی که در رابطه با طراحی آیرودینامیکی پره IGV و فاصله‌ی مناسب آن با پروانه^۸ دارد، باید به شیوه‌ی سوار شدن پره‌ها در مجرای ورودی و همچنین به شکل و پیکربندی مجرای ورودی توجه کند. ملاحظات دقیق در طراحی مجرای ورودی می‌تواند از دیدگاه آیرودینامیکی به همان اندازه‌ی طراحی پره‌ها اهمیت داشته باشد. مدل‌های قدیمی‌تر پره‌ی IGV شامل ردیف پره‌های حلقوی نصب شده از طریق سوراخ‌های پیرامون محیط مجرای ورودی کمپرسور می‌باشد. با وجود سادگی و ارزان بودن نسبی این پیکربندی برای سازنده، کارایی آیرودینامیکی آن اساساً پایین است. با قرار دادن پره‌ها درون یک مقطع تقریباً کروی در مجرا می‌توان بهبود اندکی در کارایی آیرودینامیکی داد. این پیکربندی دارای این برتری است که هنگام قرار گرفتن پره در زوایای نصب مختلف، لقی نوک^۹ پره به حداقل می‌رسد. شکل ۱ نمونه‌ای از این دو پیکربندی را نشان می‌دهد [5].

در رابطه با میدان جریان در پشت پره راهنمای ورودی یک کمپرسور گریز از مرکز، کاسنز^{۱۰} بررسی‌های تجربی انجام داده است [6]. هو و لاکشمینارایانا^{۱۱} با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی، جریان پایا و غیر پایا را در یک مرحله کمپرسور مدل‌سازی کرده‌اند و تاثیر دنباله‌های ایجاد شده در خروجی IGV را بر روی پروانه کمپرسور بررسی کرده‌اند [7]. میشانیل^{۱۲} تاثیر پره‌های راهنمای ورودی را بر روی میدان جریان و عملکرد کمپرسور گریز از مرکز با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی انجام داده است [8]. بوهل^{۱۳} و همکاران تاثیر پره پشت سرهم را بر روی میدان جریان درون IGV با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار داده است [9]. محسنی و همکاران با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، افت فشار و میدان جریان را بر روی چندین نوع پروفیل پره IGV بررسی کرده‌اند و تاثیر جریان خروجی از IGV را در ورودی پروانه کمپرسور تحلیل کرده‌اند [10].

در این مقاله تحلیل آیرودینامیکی یک نمونه‌ی بهینه شده از IGV برای کمپرسور گریز از مرکز در زوایای نصب مختلف با استفاده از نرم‌افزار آنسیس سی‌افایکس انجام گرفته و نتایج آن ارائه می‌شود.

در کمپرسورهای گریز از مرکز^۱ با استفاده از پره‌های راهنمای ورودی (IGV)^۲، می‌توان بدون تغییر سرعت دورانی کمپرسور مقدار دبی جرمی عبوری از آن را تغییر داد. رقابت در میان سازندگان این نوع کمپرسورها برای دستیابی به راندمان بالاتر در دامنه‌ای گسترده از پایداری جریان باعث شده است که طراحی و شیوه‌ی نصب پره‌های راهنمای ورودی از اهمیت بالایی برخوردار شود. برای به‌کارگیری IGV در گستره‌ای با راندمان مناسب لازم است جریان عبوری از میان پره‌های آن دارای پایداری آیرودینامیکی باشد. بدین منظور باید از پره‌هایی با پروفیل مناسب و از مجرای با شکل مناسب استفاده شود. برای دستیابی به عوامل فوق چندین نمونه IGV در شرکت ماشین‌سازی منگان طراحی شد و با مقایسه این نمونه‌ها در زوایای نصب^۳ مختلف، بهترین نمونه انتخاب گردید. در این مقاله، نتایج تحلیل‌های آیرودینامیکی به‌دست آمده از این نمونه با استفاده از نرم‌افزار آنسیس سی-افایکس^۴ ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کمپرسور گریز از مرکز - پره راهنمای ورودی (IGV) - تحلیل آیرودینامیکی - نرم‌افزار آنسیس سی‌افایکس

مقدمه

به منظور کنترل دبی جریان، تغییر نقطه سرچ^۵ و بهبود کارایی کمپرسور در محدوده‌ی شرایط عملکردی، از پره‌های راهنمای ورودی استفاده می‌شود. [1-4]. نکاتی که در انتخاب یک IGV مناسب دارای اهمیت است عبارت‌اند از:

۱. داشتن کمترین افت فشار سکون در زوایای نصب مختلف
 ۲. به حداقل رساندن اغتشاشات جریان خروجی
 ۳. به حداقل رساندن اختلاف زاویه جریان خروجی با زاویه خروجی پره
- به منظور برآورده کردن مورد اول، طراحی پره‌ی IGV به گونه‌ای انجام می‌شود که در آن افت پروفیل، افت ثانویه، افت نشتی و افت برخورد را بتوان به کمترین مقدار رساند. از این‌رو از پره‌هایی با پروفیلی مناسب، ضریب صلبیت^۶ مناسب، نسبت منطری^۷ مناسب و مجرای با پروفیل مناسب استفاده می‌شود. به منظور برآورده کردن مورد دوم و سوم، فاصله دهانه خروجی IGV از لبه انتهایی پره باید به اندازه‌ای باشد که دنباله‌های ایجاد شده در پشت پره و اختلاف زاویه جریان خروجی با زاویه پره، در آن فاصله

⁸ Impeller

⁹ Tip clearance

¹⁰ Kassens

¹¹ Ho and Lakshminarayana

¹² Michael

¹³ Boehle

¹ Centrifugal Compressor

² Inlet Guide Vane (IGV)

³ Setting angle

⁴ ANSYS CFX

⁵ Surge

⁶ Solidity

⁷ Aspect Ratio

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، ahmad_1365417@yahoo.com

۲- دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، m.boroumand@gmail.com (نویسنده مخاطب)

۳- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، alireza.alihosseini@gmail.com

مشخصات کمپرسور گریز از مرکز مورد بررسی

کمپرسور مورد بررسی در این پژوهش از نوع کمپرسور گریز از مرکز با نسبت فشار ۱/۸۷ و دبی جریان حجمی ۹۲۱۱ متر مکعب بر ساعت می باشد. نمایی از کل سیستم کمپرسور گریز از مرکز طراحی شده در شرکت ماشین سازی منگان در شکل ۲ مشاهده می شود. این کمپرسور مراحل طراحی خود را سپری کرده است و هم اکنون در حال گذراندن مراحل ساخت می باشد. داده های این کمپرسور در جدول ۱ ارائه می گردد.

جدول ۱- داده های کمپرسور گریز از مرکز طراحی شده در شرکت

ماشین سازی منگان

Item	Design Point
Inlet volume flow rate (m3/hr)	9211
Adiabatic Head (J)	71465
Adiabatic Efficiency (%)	83
Gas Power (Kw)	240
Pressure ratio	1.87
Rotational Speed (RPM)	24951
Exit Total Temperature (K)	404

مشخصات پره راهنمای ورودی طراحی شده

شکل ۳ و ۴ نمایی از پره و مجرای IGV طراحی شده را نشان می دهند. در این پروژه از مجرای کروی به منظور کاهش فاصله نوک پره با جداره مجرا استفاده می شود. در شکل ۵ نمایی از نصب پره ها درون مجرا مشاهده می شود. مشخصات هندسی IGV در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی IGV

تعداد پره ها	۹
زاویه ی ورودی پره در زاویه ی نصب صفر درجه	۱۰°
زاویه ی خروجی پره در زاویه ی نصب صفر درجه	۰°
ضریب صلیبیت (C/S)	۱
نسبت قطر دهانه ورودی به خروجی مسیر (D _i /D _o)	۱/۲۵
نسبت وتر در نوک به وتر در پایه پره (C _{tip} /C _{hub})	۶/۴
نسبت وتر در نوک به ارتفاع پره (C _{tip} /H)	۰/۸
نسبت طول مسیر به ارتفاع پره (L/H)	۲/۸

تحلیل آیرودینامیکی پره راهنمای ورودی

به منظور بررسی افت فشار سکون، میدان جریان و اغتشاشات جریان در خروجی IGV، تحلیل آیرودینامیکی با استفاده از نرم افزار انسیس سی اف ایکس در زوایای نصب ۲۰-، درجه، ۰، درجه، ۲۰، درجه، ۴۰، درجه و ۶۰ درجه انجام گرفته است. شکل ۶ نمایی از شبکه بندی سه بعدی گذرگاه اطراف پره ها و درون مجرای IGV را نشان می دهد. تعداد المان های شبکه نشان داده شده در این شکل حدود ۳۵۰۰۰۰ المان است. هم در پیرامون پره و هم در نزدیکی دیواره های مجرا از شبکه بندی ریز تر لایه مرزی استفاده می گردد.

شکل ۷ مرزهای تعریف شده در نرم افزار انسیس سی اف ایکس را نشان می دهد. شرایط مرزی اعمال شده عبارتند از:

- فشار سکون و دمای سکون در ورودی
- دبی جرمی در خروجی
- شرط مرزی متناوب در دیواره های کناری گذرگاه
- شرط مرزی دیواره برای پره و دیواره مجرا

نوع حل پایا در نظر گرفته می شود. میدان جریان درون IGV با استفاده از مدل سه بعدی و به روش حجم محدود با میانگین گیری معادلات ناویر استوکس انجام می گیرد. برای معادلات کوپل شده ی سرعت و فشار از روش

سیمپل-سی^{۱۴} استفاده می شود. تنش های رینولدز در معادلات انتقال با استفاده از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ حل می شوند.

نتایج

در شکل ۱۰ نمودار ضریب افت فشار سکون در مقابل زاویه نصب مشاهده می شود. افت فشار سکون در زاویه نصب ۱۰ درجه (زاویه برخورد صفر درجه) کمترین مقدار را به خود اختصاص می دهد. با افزایش زاویه نصب از ۴۰ درجه به بعد، افزایش افت فشار سکون شیب زیادتری به خود می گیرد زیرا افت برخورد بیشتر می گردد.

ضریب افت فشار سکون به صورت معادله زیر بیان می شود:

$$pressure\ loss\ coef. = \frac{P_{0in} - P_{0out}}{P_{0in} - P_{in}} \quad (1)$$

شکل ۱۱ نمودار میانگین زاویه جریان خروجی از IGV را در برابر زاویه نصب نشان می دهد. این نمودار اختلاف زاویه جریان خروجی با زاویه خروجی پره می باشد. کمترین اختلاف در این نمودار مربوط به زاویه نصب صفر درجه بوده که حدود ۱ درجه است و بیشترین این اختلاف مربوط به زاویه نصب ۶۰ درجه بوده که حدود ۱۲ درجه می باشد.

شکل های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب، نمودار تغییرات ضریب افت فشار سکون و زاویه جریان در طول یک گام و در فواصل مختلف از مرکز پره IGV را نشان می دهد. این فواصل در شکل ۸ تعریف شده و در ارتفاع ثابت (span=0.65) می باشد. نتایج بدست آمده برای این دو نمودار در زاویه نصب ۴۰ درجه می باشد. این دو نمودار نشان می دهند که با فاصله گرفتن از لبه ی انتهایی پره، اغتشاشات جریان کمتر می شود.

شکل های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب، نمودار تغییرات ضریب افت فشار سکون و زاویه جریان در طول یک گام و در ارتفاع های مختلف خروجی (تعریف شده در شکل ۹) و در زاویه نصب ۴۰ درجه را نشان می دهد. این دو نمودار نشان می دهد که با نزدیک شدن به سمت نوک پره، اغتشاشات جریان بیشتر شده و اختلاف زاویه جریان با زاویه پره بیشتر و افت فشار نیز بیشتر می شود.

شکل ۱۶ کانتور فشار سکون در طول IGV را نشان می دهد. با فاصله گرفتن از لبه انتهایی پره، تغییرات فشار سکون کمتر شده و اغتشاشات جریان کمتر می شود و در خروجی IGV این اغتشاشات به کمترین مقدار خود می رسد.

شکل ۱۷ کانتور فشار سکون در ارتفاع های مختلف پره را نشان می دهد. مشاهده می شود که تغییرات فشار سکون و اغتشاشات جریان در حوالی نوک پره بیشتر از بخش های دیگر می باشد و این به خاطر ایجاد جریان های نشستی در نوک و گردابه های ایجاد شده بر اثر آن می باشد.

شکل ۱۸ کانتور تغییرات سرعت را درون گذرگاه ردیف پره نشان می دهد. مشاهده می شود که در نوک پره به علت ایجاد جریان نشستی از سطح فشاری به سطح مکشی، گردابه هایی ناشی از جریان نشستی نوک تشکیل می شود که در این پروژه با بهینه کردن پروفیل مجرا این جریان نشستی به کمترین مقدار خود رسید.

نتیجه گیری

همان گونه که از نمودارهای ارائه شده مشخص است، با استفاده از نتایج ارائه شده می توان محل قرار گرفتن پره های IGV از پروانه کمپرسور گریز از مرکز را تعیین کرد. فاصله مناسب پره های IGV از پروانه باعث می شود

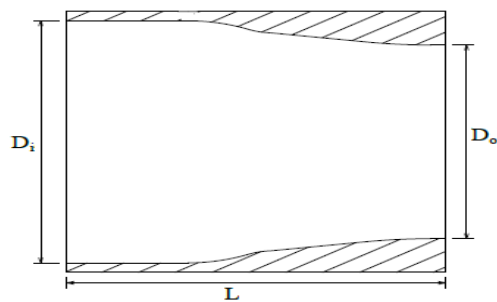


دومین همایش ملی توربین های گاز

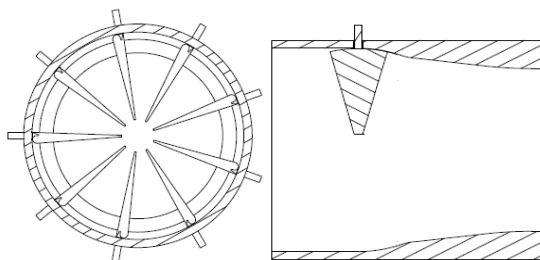
تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، خرداد ۱۳۹۲

گردابه های پشت این پره ها پیش از ورود به پروانه حذف شده و راندمان کمپرسور افت نکند. همچنین با استفاده از پروفیل بهینه برای پره طراحی شده افت فشار سکون و گردابه های تشکیل شده در پشت پره به حداقل رسید و با استفاده از پروفیل بهینه برای مجرای طراحی شده، جریان های ناشی از نشتی نوک و گردابه های ناشی از جریان های نشتی به حداقل رسید.

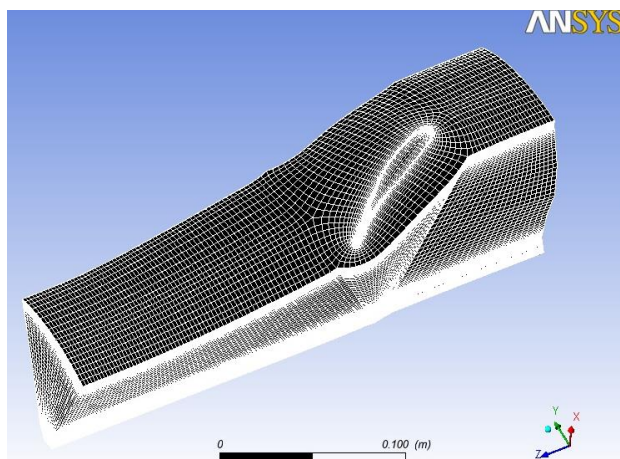
فهرست شکل ها



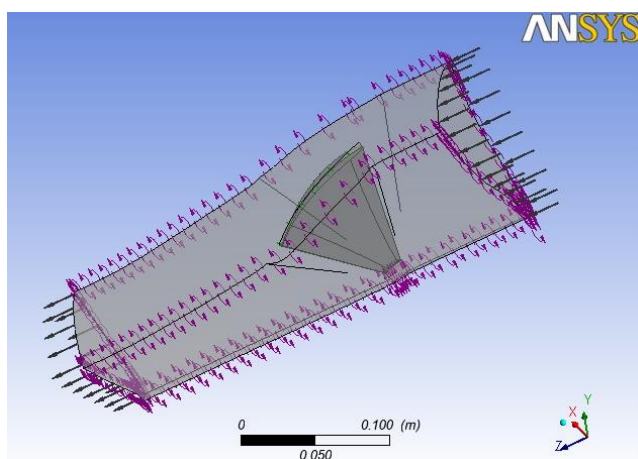
شکل ۴- شماتیکی از مجرای ورودی هوا



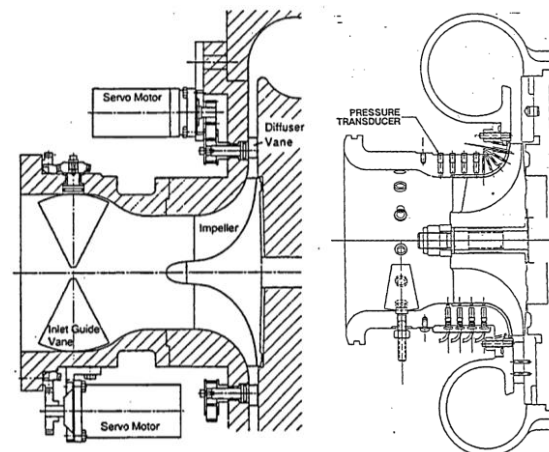
شکل ۵- نمایی از نصب پره های IGV درون مجرای ورودی



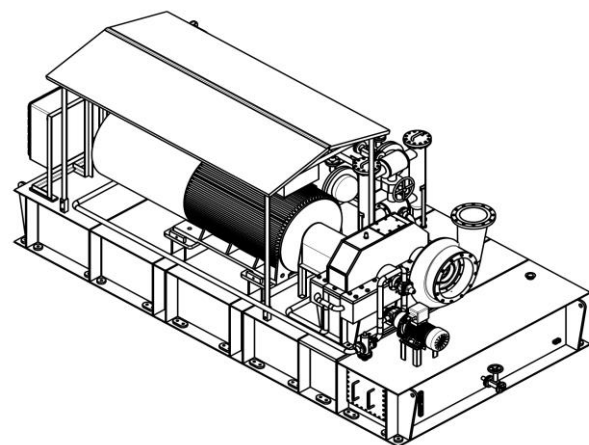
شکل ۶- نمایی از شبکه بندی اطراف پره ها و درون مجرای IGV



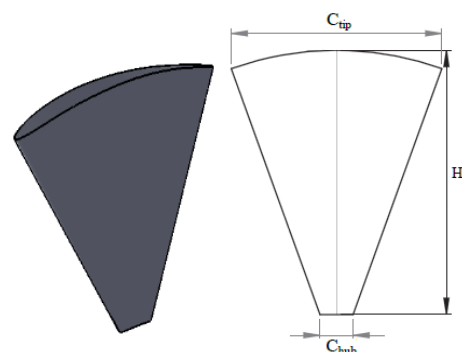
شکل ۷- نمایی از شرایط مرزی اعمال شده بر روی IGV در نرم افزار سی اف ایکس



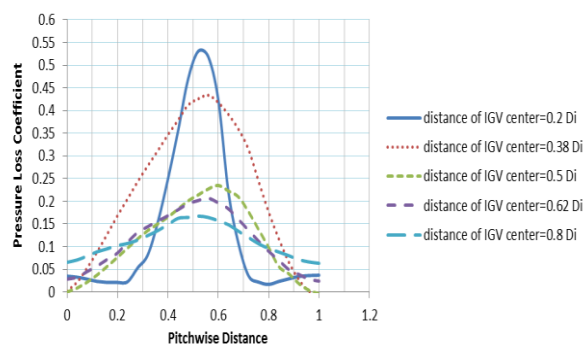
شکل ۸- نمایی از دو نوع پیکربندی پره ی IGV درون مجرای ورودی: پیکربندی ساده (سمت راست) و پیکربندی مجرای کروی (سمت چپ) [۵]



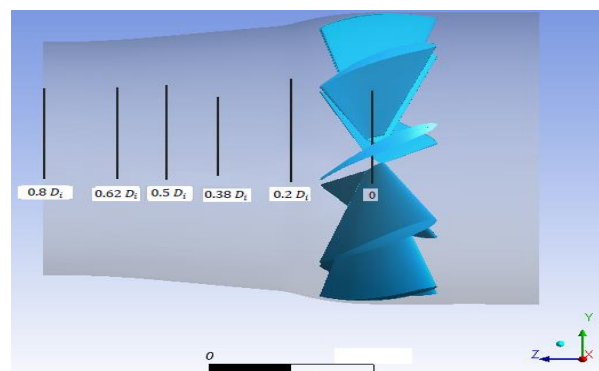
شکل ۹- نمایی از مجموعه ی کمپرسور گریز از مرکز طراحی شده در شرکت ماشین سازی منگان



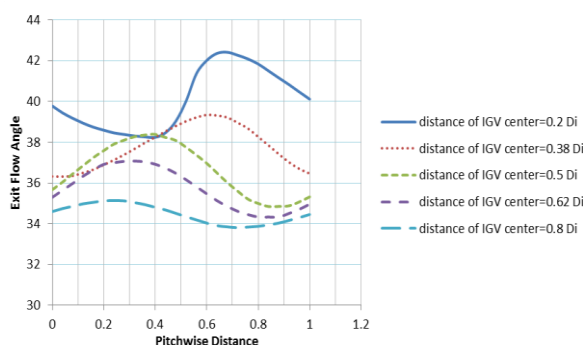
شکل ۱۰- شماتیکی از پره راهنمای ورودی هوا



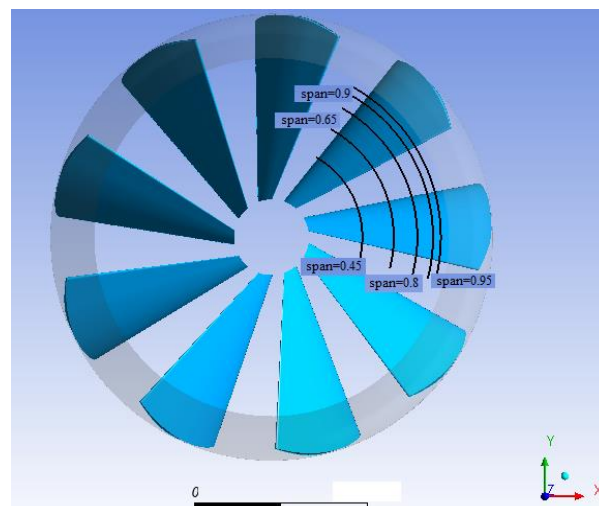
شکل ۱۲- تغییرات ضریب افت فشار سکون در طول یک گام و در زاویه نصب ۴۰ درجه و در فواصل مخلف از مرکز پره در $\text{span}=0.65$



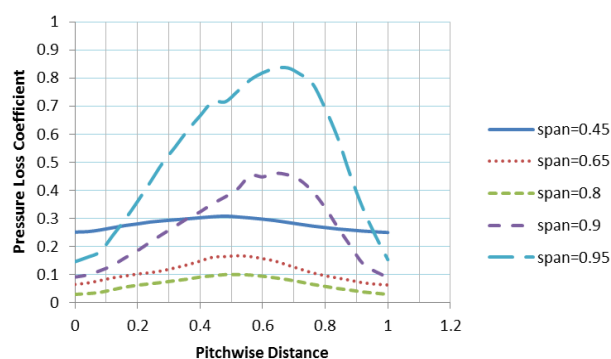
شکل ۸- شماتیکی از فواصل مختلف از مرکز پره



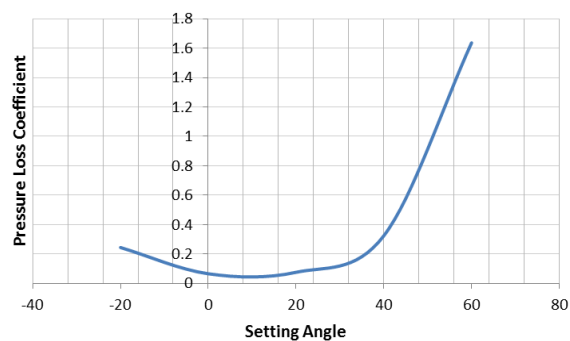
شکل ۱۳- زاویه جریان در طول یک گام و در فواصل مختلف از مرکز پره در زاویه نصب ۴۰ درجه و در فواصل مختلف از مرکز پره در $\text{span}=0.65$



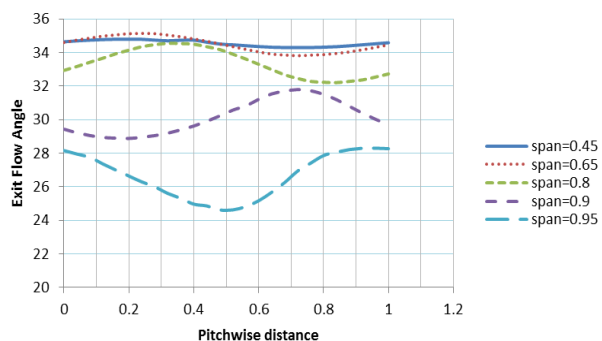
شکل ۹- شماتیکی از ارتفاعهای مختلف تعریف شده در خروجی



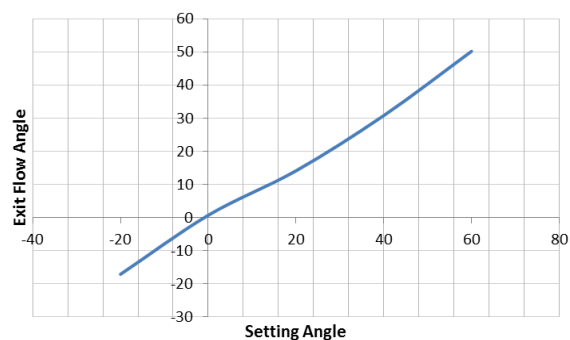
شکل ۱۴- ضریب افت فشار سکون در طول یک گام و در ارتفاع مختلف در خروجی IGV در زاویه نصب ۴۰ درجه



شکل ۱۰- ضریب افت فشار سکون در برابر زاویه نصب



شکل ۱۵- زاویه جریان خروجی در طول یک گام و در ارتفاع مختلف در خروجی IGV در زاویه نصب ۴۰ درجه

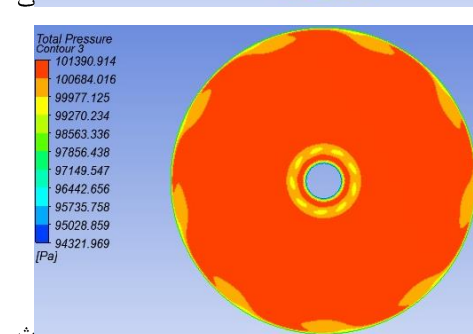
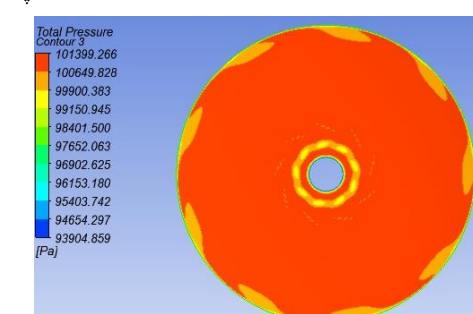
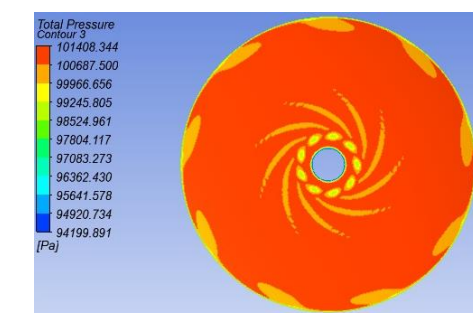
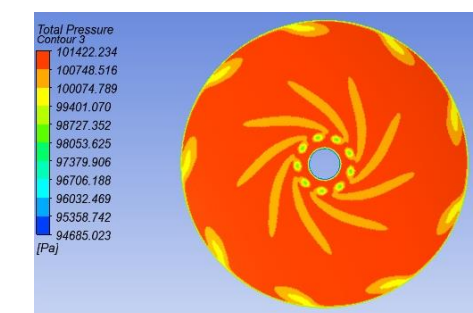
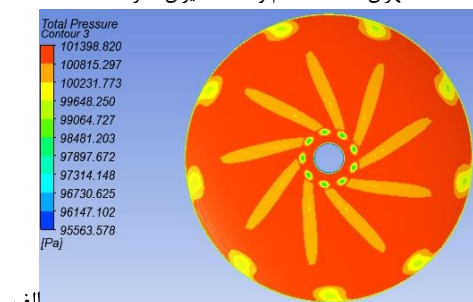
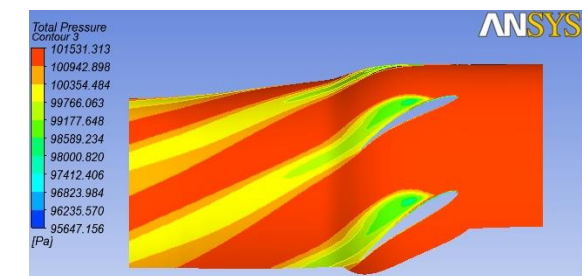
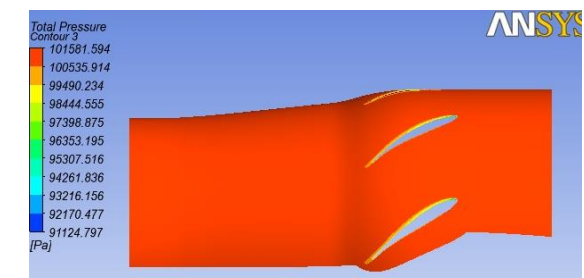
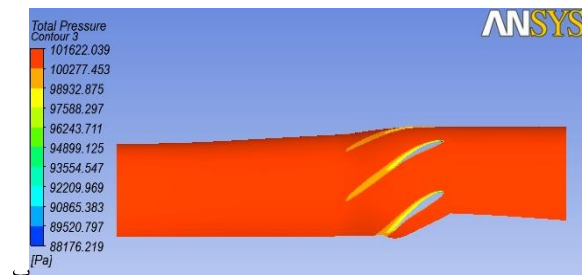
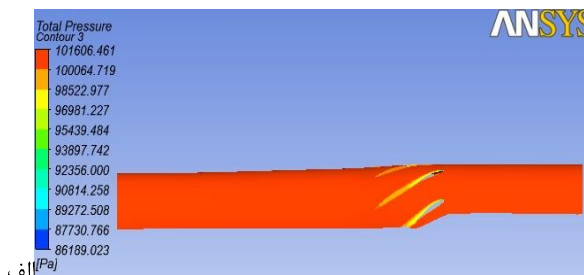


شکل ۱۱- میانگین زاویه جریان خروجی از IGV در برابر زاویه نصب



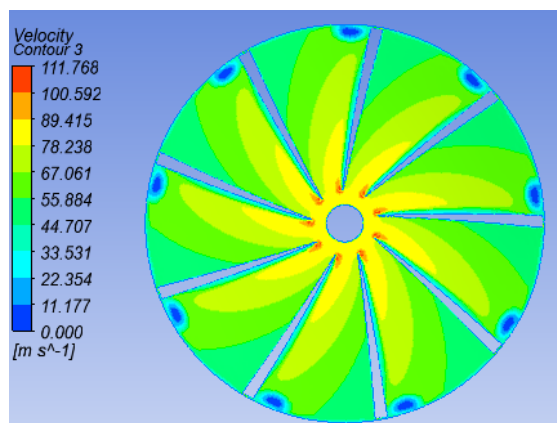
دومین همایش ملی توربین های گاز

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، خرداد ۱۳۹۲



شکل ۱۷- کانتور فشار سکون در ارتفاع مختلف پره IGV

الف) $\text{span} = 0.2$ (ب) $\text{span} = 0.5$ (پ) $\text{span} = 0.75$ (ت) $\text{span} = 0.95$



شکل ۱۸- کانتور سرعت جریان درون گذرگاه پره IGV

شکل ۱۶- کانتور فشار سکون در طول مجرای IGV

الف) فاصله از مرکز IGV = $0.2Di$ (ب) فاصله از مرکز IGV = $0.38Di$

پ) فاصله از مرکز IGV = $0.5Di$ (ت) فاصله از مرکز IGV = $0.62Di$

ث) فاصله از مرکز IGV = $0.8Di$

- [1] Bensor, W.A., "Compressor Operation with One or More Blade Rows Stalled", pp. 341-364, NASA SP-36, 1965.
- [2] Budinger, R. E., Kaufman, H. R., "Investigation of the Performance of a Turbojet Engine with Variable-Position Compressor Inlet Guide Vanes", NACA RM-E54L23a, 1955.
- [3] Dobson, W. F., Wallner, L. E., "Acceleration Characteristics of a Turbojet Engine with Variable-Position Inlet Guide Vanes", NACA RM-E54I30, 1955.
- [4] Wallner, L. E., Lubick, R. J., "Steady State and Surge Characteristics of a Compressor Equipped with Variable Inlet Guide Vanes Operating in a Turbojet Engine", NACA RM-E54I28, 1955.
- [5] Coppinger, M., "Aerodynamic Performance of an Industrial Centrifugal Compressor Variable Inlet Guide Vane System", A Doctoral Thesis, Loughborough University, 1999.
- [6] Kassens, I. and Rautenberg, M., "Flow measurements behind the inlet guide vane of a centrifugal compressor", ASME Paper No. 98-GT-86, 1998.
- [7] Ho, Y. H. and Lakshminarayana, B., "Computation of Three-Dimensional Steady and Unsteady Flow through a Compressor Stage," ASME Paper 96-GT-70, 1996.
- [8] Michael M. Cui., "EFFECT OF SUCTION ELBOW AND INLET GUIDE VANES ON FLOW FIELD IN A CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE" ASME TURBO EXPO, Amsterdam, Netherland, 2002.
- [9] M. Boehle., M. Cagna, L. Itter., "COMPRESSIBLE FLOW IN INLET GUIDE VANES WITH MECHANICAL FLAPS", ASME TURBO EXPO, Vienna, Austria, 2004.
- [10] Mohseni, A., et al., "Novel IGV Designs for Centrifugal Compressors and Their Interaction with the Impeller". *Journal of Turbomachinery* , 2012.