



خنک کاری پرهی توربین گاز

۱- مقدمه

طی چندین دهه‌ی اخیر، توربین‌های گازی نقشی اساسی در تولید انرژی الکتریکی و همچنین تامین نیروی پیشران در بسیاری از کاربردها را برعهده داشتند. اگرچه مشخصات عملکردی این تجهیزات همچون توان تولیدی و بازدهی، با افزایش دمای جریان گاز داغ ورودی به توربین بهبود می‌یابد، بیشینه‌ی دمای کاری مجاز برای سازه‌ی پره همواره محدود کننده طراحی است. بررسی‌ها نشان داده است که تغییرات ۲۰ درجه‌ای در دمای بیشینه‌ی سطح پره می‌تواند تا ۵۰ درصد عمر کاری پره را کاهش دهد. بنابراین، روش‌های مختلفی در راستای محافظت یا بهبود مقاومت پره‌های ردیف داغ توربین در برابر جریان سیال عامل پیشنهاد شده است که از جمله‌ی مهم‌ترین آنها می‌توان به تکنیک‌های خنک کاری اشاره نمود. در این پروژه، شما به مطالعه عملکرد طرح خنک کاری در یک نمونه پرهی توربین گاز و بررسی پارامتریک اثر موقعیت و قطر مجراهای عبور سیال خنک کار خواهید پرداخت.

۲- تشریح مسئله

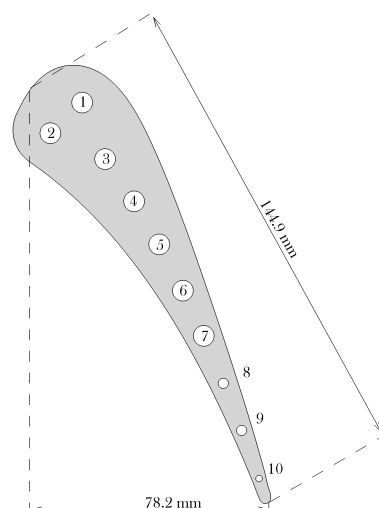
یکی از پژوهش‌های شاخص در زمینه‌ی خنک کاری پره‌های توربین گاز، **هیلتون و همکاران (۱۹۸۳)** در سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (ناسا)^۱ صورت گرفته است. آنها طراحی خنک کاری دو نمونه پرهی راهنمای توربین^۲ گاز را به صورت کامل و طبق روش‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و داده‌های مربوط به توزیع دمای پره، ضریب انتقال حرارت موضعی و فشار استاتیک حول پره را تحت شرایط کاری گوناگون گزارش نموده‌اند. بنابراین، مطالعات آنها به عنوان یک مسئله‌ی معیار در زمینه‌ی طراحی پره‌های توربین گاز و اعتبارسنجی روش‌های شبیه‌سازی عددی به شمار می‌رود. یکی از پره‌های مورد مطالعه، سی-تری-اکس^۳ نام دارد که دارای ۱۰ کانال دایروی مستقیم در جهت عرضی و به منظور خنک کاری پره با عبور جریان هوای خنک است. **شکل ۱** نمای کلی از پروفیل این پره و موقعیت قرارگیری کانال‌های خنک کاری را نمایش می‌دهد. در آزمایش‌های انجام شده بر چیدمان ردیف پره‌ها، فاصله‌ی دو پره از یکدیگر، ۱۱۷/۷ میلی‌متر و ارتفاع هر پره ۷۸/۲ اعمال شده است. تحت این شرایط طول واقعی (c) و محوری (x_c) وتر به ترتیب ۱۴۴/۹ و ۷۸/۲ میلی‌متر است. در مطالعات تجربی انجام شده بر این پره، عدد ماخ، عدد رینولدز و شدت آشفته‌گی جریان ورودی به عنوان پارامترهای شرایط کاری تعیین و اثر تغییرات آنها بر مشخصات عملکردی بررسی شده است. در این پروژه، شبیه‌سازی آزمایش شماره ۱۱۲ مدنظر است که عدد ماخ خروجی $M = 0.9$ ، عدد رینولدز (برحسب وتر پره و سرعت خروجی) $Re = 2 \times 10^9$ و شدت آشفته‌گی ورودی

¹National Aeronautics and Space Administration (NASA)

²Guide Vane

³C3X

شماره کانال	قطر کانال (mm)	دبی جرمی (g/s)	T_{mid} (K)
۱	۶۳۰	۷/۷۹	۴۰۹/۱
۲	۶۳۰	۶/۵۸	۴۰۹/۴
۳	۶۳۰	۶/۳۴	۳۹۱/۵
۴	۶۳۰	۶/۶۶	۳۹۷/۲
۵	۶۳۰	۶/۵۰	۳۷۶/۹
۶	۶۳۰	۶/۷۲	۴۳۴/۹
۷	۶۳۰	۶/۳۳	۳۹۱/۵
۸	۳۱۰	۲/۲۶	۱۰۷/۶
۹	۳۱۰	۱/۳۸	۴۶۶/۴
۱۰	۱/۹۸	۰/۶۸	۵۱۶/۲



شکل ۱: پره توربین گاز سی-تری-اکس و موقعیت کانال‌های خنک‌کاری.

جدول ۱: مشخصات کانال‌های خنک‌کاری پره سی-تری-اکس شامل قطر، دبی و دمای مقطع میانی کانال.

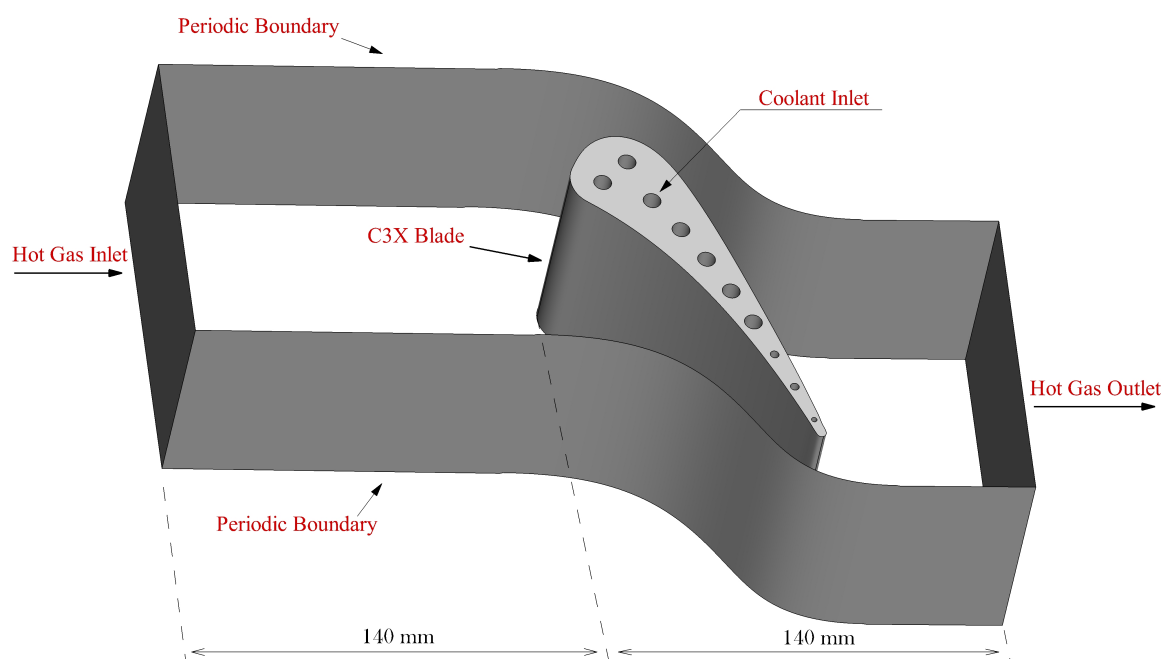
$I_{in} = 8.3\%$ برای آن گزارش شده است. همچنین، مقدار فشار سکون ورودی $p_{0,in}$ ، فشار استاتیک جریان خروجی p_{out} و دمای سکون $T_{0,in}$ در ورودی به ترتیب ۳/۲۱۷ بار، ۱/۸۷۸ بار و ۷۸۳ کلین است. مشخصات جریان خنک‌کاری هر یک از کانال‌ها نیز مطابق **جدول ۱** در نظر گرفته می‌شود. توجه نمایید که T_{mid} دمای هوای خنک‌کاری در مقطع میانی کانال است. آزمایش‌های مربوطه بر مبنای پره‌ای از جنس استیل زنگ‌نزن ای-آی-اس-آی ۳۱۰ اجرا شده است که مقادیر ثابت ۷۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۵۸۲/۲ کیلوژول بر کیلوگرم. کلین را به ترتیب برای چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه آن می‌توان فرض نمود.

۳- فاز اول: شبیه‌سازی انتقال حرارت توأمان

در این مرحله، شبیه‌سازی توأمان^۵ میدان جریان و حرارت سیال و جامد پیگیری خواهد شد. بدین منظور، دامنه‌ی محاسباتی را مطابق **شکل ۲** در نظر بگیرید. دامنه از سه ناحیه‌ی اصلی شامل میدان جریان گاز داغ، بدنه پره و کانال‌های خنک‌کاری تشکیل شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود ناحیه‌ی محاسباتی میدان پیرامون یک پره‌ی دوبعدی است که به اندازه‌ی ۷۶/۲ میلی‌متر در راستای عرضی به صورت مسقیم امتداد یافته است. شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان نیز در فاصله‌ی ۱۴۰ میلی‌متری بالادست و پایین‌دست لبه حمله‌ی پره تعریف شده است. سایر شرایط مرزی نیز مطابق شکل خواهد بود. توجه نمایید که دیواره‌های شراود و هاب که در شکل نمایش داده نشده‌اند، به عنوان دیواره آدیاباتیک با شرط عدم لغزش در شبیه‌سازی دخیل می‌شوند. برای هر یک از کانال‌ها، توزیع سرعت در ورودی طبق پروفیل توانی $\frac{1}{v}$ و دبی جرمی تعیین می‌شود. محاسبه مقادیر خواص ترموفیزیکی هوا شامل ضریب رسانش حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و لزجت دینامیکی نیز باید به صورت وابسته به دما و بر مبنای نتایج آزمایشگاهی همچون داده‌های **روزنو و همکاران (۱۹۹۸)** صورت پذیرد. در این فاز و بر مبنای شبکه‌ی محاسباتی که از طریق صفحه درس (cw.sharif.edu) در اختیار شما قرار می‌گیرد:

^۴AISI 310

^۵Conjugate



شکل ۲: دامنه محاسباتی شامل پره، میدان جریان گاز داغ و کانال‌های خنک‌کاری.

۱. با استفاده از یک حلگر حجم محدود، فرایند حل معادلات پایستگی جرم، تکانه خطی و انرژی را برای شبیه‌سازی پایای انتقال حرارت توأمان که شامل جریان سیال تراکم‌پذیر است، طبق شرایط مرزی تشریح شده پیاده‌سازی نمایید. توجه داشته باشید که انتخاب تنظیمات حل، مدل آشفتگی و ... باید بر مبنای استدلال و ارجاع به مطالعات مشابه در این زمینه صورت گیرد.

۲. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی را با استفاده از داده‌های تجربی هیلتون و همکاران (۱۹۸۳) برای مشخصات عملکردی مختلف شامل توزیع فشار، دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی اجرا نمایید.

۳. کانتورهای عدد ماک، دما و فشار را در مقطع میانی ناحیه محاسباتی رسم و در مورد پدیده‌های فیزیکی مربوطه بحث نمایید.

۴- فاز دوم: مطالعه پارامتریک اثر قطر و موقعیت کانال بر توزیع دما

هدف این مرحله، بررسی اثر تغییرات قطر و موقعیت برخی از کانال‌های خنک‌کاری بر توزیع دمای پره است. با فرض آن که میدان جریان گاز داغ پیرامون پره تغییری نکرده و مطابق حل بدست آمده در فاز اول باشد:

۱. با استفاده از ماژول‌های تولید هندسه در انسیس ورک‌بنچ^۶، ناحیه‌ی مربوط به پره و کانال‌های خنک‌کاری را به صورت پارامتریک بازسازی نمایید. مختصات هندسی پروفیل دوبعدی پره در گزارش هیلتون و همکاران (۱۹۸۳) ارائه شده است؛ اگرچه برای تسهیل فرایند بازتولید هندسه توصیه می‌شود که پروفیل پره را با خروجی گرفتن مختصات آن از شبکه‌ای که در اختیار شما قرار گرفته، بدست آورید.

^۶ANSYS Workbench

۲. شبکه‌ی محاسباتی مناسب برای ناحیه‌ی مورد مطالعه را با استفاده از ماژول‌های تولید شبکه ANSYS Meshing یا ICEM CFD ایجاد نمایید. شبکه کانال‌های خنک‌کاری باید به صورت ساختاریافته و اصطلاحاً مش پروانه‌ای تولید گردد.

۳. با استفاده از قابلیت ضبط ژورنال در نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ، رویه‌ای برای اجرای کلیه‌ی فرایندهای اصلاح هندسه، تولید شبکه، تنظیم حلگر، حل و گزارش نتایج پیاده‌سازی نمایید. توجه داشته باشید که در این حالت لازم است تا با استفاده از یک اسکریپت خارجی که مثلاً به زبان متلب^۷ نوشته شده است، فرایند را کنترل نمایید. به بیان دیگر، اسکریپت اصلی باید اطلاعات موجود در فایل ژورنال را تغییر داده و سپس برای اجرا به انسیس ارسال کند. این تغییرات شامل مواردی مانند اطلاعات کانال خنک‌کاری (دبی، قطر و موقعیت)، شرایط مرزی، نحوه‌ی گزارش نتایج و ... است که طی مطالعه‌ی موردی تغییر می‌کند.

۴. با فرض این که ضمن تغییرات هندسی در طرح خنک‌کاری، میدان جریان پیرامون پره ثابت باقی بماند، ضریب انتقال حرارت جابجایی بدست آمده در فاز اول را به عنوان شرایط مرزی بر روی سطح پره‌ی جامد در نظر بگیرید. فرایند مطالعه شبکه را به صورت کیفی و کمی حداقل با ایجاد چهار سطح شبکه‌بندی مختلف اجرا نمایید. توجه داشته باشید که مطالعه‌ی کمی باید مشابه‌ی پروژه‌ی اول و مطابق با رویه‌ی ارائه شده در مطالعات [روچ \(۱۹۹۴\)](#)؛ [چلیک و همکاران \(۲۰۰۸\)](#) باشد.

۵. با در نظر گرفتن ۱۰ مقدار مختلف برای هر یک از پارامترهای قطر و مولفه‌های مختصات موقعیت محور کانال شماره ۳، الگوی تغییرات دمای بیشینه و گرادیان دمای بیشینه را استخراج و به صورت کیفی در مورد محل وقوع آنها بحث نمایید.

۶. به ازای تعدادی از مقادیر قطر و موقعیت کانال خنک‌کاری، کانتور دما در پره جامد را رسم و در مورد نتایج حاصل در فاز دوم بحث نمایید.

۵- الزامات پروژه

۱. پروژه در قالب گروه‌های دو نفری انجام خواهد شد.
۲. همان‌گونه که اشاره گردید، فاز دوم پروژه باید با ایجاد ساختار تعاملی میان نرم‌افزار انسیس و یک اسکریپت خارجی (مانند یک کد به زبان متلب) و کاملاً خودکار انجام شود.
۳. تمامی فرایندها پس پردازش نتایج (شامل مواردی همچون رسم نمودارها و کانتورها) باید در نرم‌افزار متلب انجام شود.
۴. اشکال خروجی باید واضح و دارای کیفیت مناسب باشند. از ارائه اسکرین‌شات در گزارش خودداری نموده و تا حد امکان از فرمت‌های برداری در ارائه نتایج گرافیکی استفاده نمایید. چنانچه آماده‌سازی گزارش با استفاده از ورد انجام می‌شود، فرمت svg و در صورت کار با سیستم حروف‌چین لاتک^۸، فرمت‌های eps و pdf. برای ذخیره‌سازی

^۷MATLAB

^۸TEX

نتایج در عمده‌ی موارد مناسب خواهند بود.

۵. گزارش پروژه باید در فرمت استاندارد شامل مواردی همچون چکیده، مقدمه، تشریح مسئله و ... باشد. در این گزارش، بایستی به تشریح کامل جزئیات فرایند شبیه‌سازی، خودکارسازی حل در مطالعه پارامتریک و بحث پیرامون نتایج حاصل پرداخته شود.

مراجع

- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., and Freitas, C. J. (2008), "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications," *Journal of Fluids Engineering*, 130.
- Hylton, L., Mihelc, M., Turner, E., Nealy, D., and York, R. (1983), "Analytical and experimental evaluation of the heat transfer distribution over the surfaces of turbine vanes," tech. rep., National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Roache, P. J. (1994), "Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies," *Journal of Fluids Engineering*, 116, 405–413.
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Cho, Y. I., et al. (1998), *Handbook of heat transfer*, vol. 3, McGraw-Hill New York.