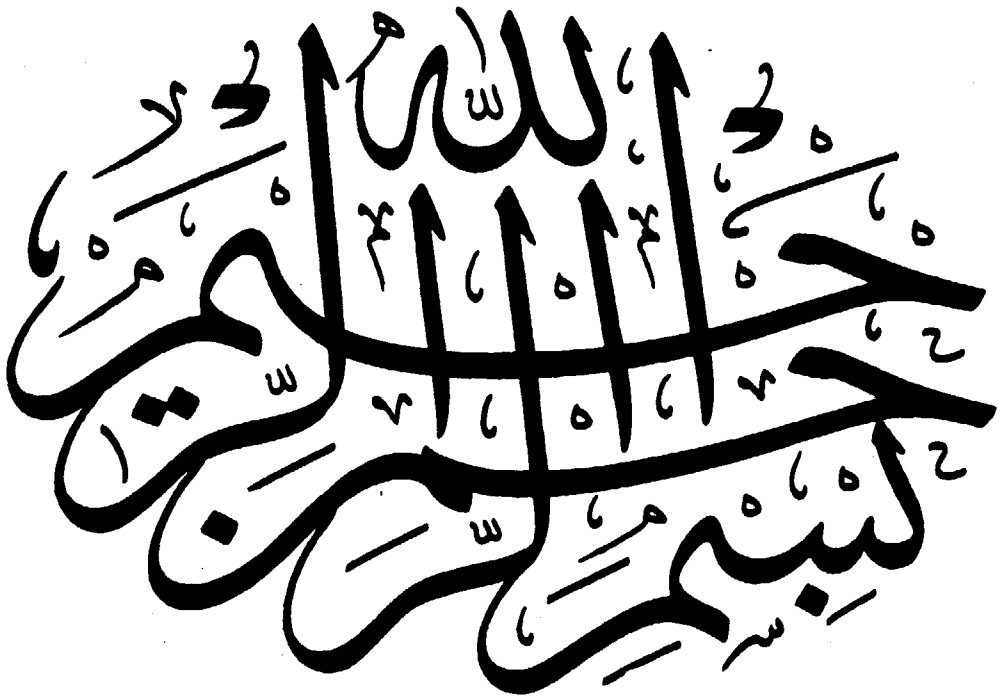
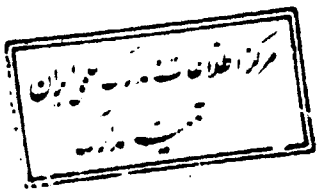
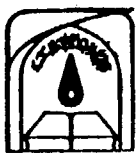


٢٤ ٤/٨

۱۳۷۸/۶/۱۰





دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک ـ تبدیل انرژی

تحلیل جریان ثانویه در Cascadeهای جریان محوری (توربین)

ایرج جعفری گاوزن

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا انصاری

زمستان ۱۳۷۷

3774/2

۲۶۴۱۸

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای ایرج جعفری گاوزن پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان تحلیل جریان ثانویه در cascadeهای جریان محوری (توربین) در تاریخ ۷۷/۱۱/۱۰ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک باگرایش تبدیل انرژی پیشنهاد می‌کنند. ۱۱ب

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر محمدرضا انصاری	
۲ـ استاد مشاور :	ـــــ	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر حیدری‌نژاد	
	آقای دکتر منوچهر راد	
۴ـ مدیر گروه : (یا نمایندهٔ گروه تخصصی)	آقای دکتر قدیری	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان‌نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

شماره:.....

تاریخ:.....

پیوست:.....

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به مرکز نشر دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ مهندسی صنایع-تبدیل انرژی است که در سال ۱۳۷۷ در دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر محمد صادقی و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های نشریات دانشگاه تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به مرکز نشر دانشگاه اهدا کند دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب امیر جعفری کاوری دانشجوی رشته مهندسی صنایع-تبدیل انرژی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

تقدیم به:

همسر و دو فرزندم نفیسه و فاطمه

یکی از موضوعات تحقیقاتی پیشرفته و پیچیده در توربوماشینها، تحلیل ریاضی و فیزیکی جریانهای ثانویه درون آنها می‌باشد. در توربینهای جریان محوری به سبب گرادیان فشار مطلوب در جهت جریان اصلی، خمیدگی زیاد پره، وجود گردابهایی با قدرت و امتدادهای مختلف و چندین عامل دیگر تحلیل جریان فوق خیلی مشکل است. اغلب مسائل جریان ثانویه از نظر فیزیکی قابل تحلیل می‌باشند ولی تحلیل ریاضی و دقیق آنها تا بحال انجام نشده است.

جریان میان دو پره متوالی توربین، کاملاً سه‌بعدی و توربولانت می‌باشد. در این پایان‌نامه تمام تلاش رفتن به سوی تحلیل ریاضی و فیزیکی مسئله بوده و در موارد لزوم جریان پتانسیلی سه بعدی فرض شده است.

در زمینه جریان ثانویه در میان ردیف پره توربینهای جریان محوری، تحلیل‌ها و آزمایشهای مختلفی در دانشگاههای مشهور جهان (M.I.T، کمبریج، لندن، گوتینگن و غیره) صورت گرفته که متأسفانه حدود ۹۰ درصد مقاله‌های علمی آنها در ایران موجود نیست آن تعدادی هم که موجودند، بسختی قابل فهم هستند. لازم به ذکر است که از مراجع انتهای کتاب استفاده فراوانی شده است.

از استاد دانشمند و محقّق جناب آقای دکتر قاسم حیدری‌نژاد (دکترای مهندسی مکانیک از دانشگاه M.I.T آمریکا) که آموختن توربلانس و لایه‌های مرزی را مدیون ایشان هستم، قدردانی و سپاسگزاری می‌نمایم. راهنمائی‌های بسیار مؤثر استاد محترم جناب آقای دکتر محمدرضا انصاری کمکهای بزرگی در تهیه پایان‌نامه بوده‌اند که کمال تشکر را از ایشان دارم.

ایرج جعفری گاوزن

۱۳۷۷/۱۰/۲۱

چکیده :
بادرنظرگرفتن جریان سیال درنزدیکی جداره‌هابصورت‌ویسکوزمی‌توان‌گفت که‌درنزدیکی جداره‌ها جریان ثانویه‌ای به‌طرف مکش ازطرف فشاردار یم، اما درقسمت‌های‌دیگراز طرف مکش بطرف‌فشار برقرارمی‌گردد. بامحاسبه‌مؤلفه‌ورتیسیتی موازی با جریان درخروجی مجرای سیال درتوربین وبسط آن بصورت سری فوریه ، معادله دیفرانسیل پواسون تابع‌جریان ثانویه رااززروش سری حل کردیم که‌دارای همگرائی شدید میباشد. مؤلفه سرعت محیطی‌جریان فوق از جداره تاوسط دهنه بصورت نمائی تغییر میکند . قدرت پوسته ورتکس لبه عقب برابر تغییرات سیرکولاسیون دورپره‌است . درروش تقریبی ازمقدار متوسط سرعت محیطی درمعادلات انتگرالی استفاده کردیم . باافزایش ضخامت لایه مرزی ، مقدار سرعت درامتداد شعاعی درناحیه مکش بالا می‌رود وهمچنین دریک محدوده مشخصی انرژی جنبشی جریان ثانویه‌برای گرادیان سرعت خطی زیاد میگردد (تلفات جریان فوق هم زیاد میگردد).
انرژی جنبشی این جریان متناسب باگردایان سرعت ورودی می باشد . باافزایش ارتفاع پره تلفات جریان ثانویه کاهش می‌یابد . ماگزیمم تغییرات زاویه خروجی جریان دردرون لایه مرزی جداره صورت می گیرد . باافزایش گام بین دوپره تلفات کاهش می یابد .انتقال جرم شدیداً بالائی درناحیه جریان سه بعدی طرف مکش صورت می گیرد. درطرف فشار مدل جریان ثانویه مثلثی جانسون ولی درطرف مکش مدل جریان ثانویه همراه با جریان برگشتی داریم .

کلمات کلیدی :
جریان ثانویه
cascadeهای جریان محوری
توربین

فهرست مطالب

فصل اول ۱

۱) تحلیل لایه های مرزی توربولانت سه بعدی ۱

(۱-۱) جدایی جریان در جریان سه بعدی ۲

(۱-۲) لایه های مرزی سه بعدی نا مقید ۳

(۱.۲.۱) تحلیل ریاضی ۹

(۱.۲.۲) سیستم مختصات و معادلات ۹

(۱-۳) لایه مرزی توربولانت سه بعدی مقید ۱۳

(۱-۴) تحلیل انتگرالی اندازه حرکت لایه های مرزی جداره‌های انتهایی مجرای جریان در توربین ۱۳ ۲۳

فصل دوم ۳۴

(۲) بررسی مکانیزم تولید جریان ثانویه در ردیف پره از دیدگاههای مختلف ۳۴

(۲-۱) انواع گردابها و چگونگی آنها در فضای بین دو پره ۴۰

(۲-۲) بررسی مکانیزم تولید جریان ثانویه با کمک معادلات حرکت جریان ۴۲

(۲-۳) روش اغتشاشات خطی برای تحلیل جریان ثانویه توربین ۴۶

فصل سوم ۵۳

(۳) معادله دیفرانسیل مربوط به جریانهای ثانویه در ردیف پره های توربین و انواع جریانهای ثانویه ۵۳

(۳-۱) بدست آوردن معادلات ۵۳

(۳-۲) ورتیسیتی ثانویه ۵۷

(۳-۳) مؤلفه های ورتیسیتی در پایین دست ردیف پره ۵۸
(۳-۴) محاسبهٔ مؤلفه های ورتیسیتی در ردیف پره ۵۹
(۳-۴-۱) محاسبهٔ ورتیسیتی موازی با جریان ۵۹
(۳-۵) محاسبهٔ ورتیسیتی موازی با خط جریان در حالت کلی ۶۳
(۳-۶) انواع جریان ثانویه در توربین جریان محوری ۶۷
فصل چهارم ۶۹
(۴) حل معادله جریان ثانویه درون ردیف پره ها ۶۹
(۴-۱) سیرکولاسیون و پوسته گرداب در پایین دست ردیف پره ها (لبه عقب) ۷۹
(۴-۲) تحلیل و بررسی انرژی جنبشی جریان ثانویه ۸۵
(۴-۳) اثر جریان ثانویه برروی زاویه خروجی سیال از ردیف پره ۹۰
فصل پنجم ۹۵
(۵) حل تقریبی معادله پواسون برای سرعتهای ثانویه ۹۵
فصل ششم ۱۰۲
(۶) اختلال در جهت موازی با دهنه ۱۰۲
(۶-۱) ضرائب اختلاط در توربین های جریان محوری ۱۰۴
(۶-۲) تفسیر و گزارش توزیعهای ردیاب ۱۱۱
فصل هفتم ۱۲۱
(۷) بررسی تلفات ناشی از جریان ثانویه درون ردیف پره و کمینه کردن آن ۱۲۱
(۷-۱) تلفات جریان ثانویه در توربین ۱۲۳

(۱-۱-۷) انتقال اندازه حرکت به طور مماسی (اثرات انتهایی) ۱۲۳

(۲-۷) حرکات شعاعی جریان ۱۲۷

(۱-۲-۷) سیرکولاسیون نشر شده ۱۲۷

(۳-۷) چرا تلفات جریان ثانویه به ارتفاع پره بستگی دارد؟ ۱۳۲

(۴-۷) حال اثرگام بین دو پره متوالی بر جریان ثانویه و تلفات این جریان چگونه است ؟ ۱۳۳

(۵-۷) اثر وتر ایرفول مقطع پره ،**C**، بر جریان ثانویه ۱۳۴

(۶-۷) اثر **S** و **C** باهم ۱۳۴

(۷-۷) اثر لایه مرزی بالادست جداره ۱۳۶

(۸-۷) چگونه تلفات جریان ثانویه راکمینه کنیم ؟ ۱۳۹

(۹-۷) اثر دوران سطوح بر نولی بر روی قدرت و رتیسیتی ثانویه ۱۴۱

فصل هشتم ۱۴۳

(۹) اثرات جریان ثانویه بر روی زوایای خروجی سیال از یک ردیف پره توربین ۱۴۷

(۱-۹) رابطه برای زاویه دوران سطح بر نولی ۱۵۶

فصل دهم ۱۶۰

تحلیل کیفی جریان ثانویه واثرات آن در درون ردیف پره های توربین ۱۸۰

(۲-۱۰) بررسی دبی جرمی در درون مجرا ۱۸۰

« بحث ها ونتایج » ۱۸۶

تحقیقات پیشرفته‌تر آینده راجع به جریان ثانویه ۱۹۳

فهرست علائم

A = ثابتِ مدل جانسون یا یک پارامتر

B = ثابت وابسته به انحراف جریان

C = وتر مقطع پره، اندازه بردار سرعت در لایه مرزی

K,C = ثابت‌های قانون دیواره

$e = \tan \gamma_\omega$ = یک پارامتر

G = تابعی از $\left(\frac{z}{\delta}\right)$

g = تابعی از $\left(\frac{z}{\delta}\right)$

h = نصف دهنه پره، یا آنتالپی

L,L = نصف ارتفاع پره، مقیاس طول اختلاط، طول اختلاط

$\overset{0}{m}$ = دبی جرمی جریان محوری در توربین

o = قطر روزنه گلوگاه بین دو پره

P = فشار استاتیک یا فشار

q = سرعت سیال

q_d = سرعت توسعه یافته سیال

q_x = مؤلفه محوری سرعت سیال

R_e = عدد رینولدز = $\frac{V_{ax} L_s}{\in}$

S = فضای بین پره‌های متوالی در جهت محیطی یا مماسی

$S' = SCOS\alpha_2$ = فضای عمود بر سطوح پره‌ها یا پهنای مجرای پره‌ها در خروجی

s,n = مختصات خط جریان و نرمال بر آن

S,n,b = مختصات ذاتی مطلق

s^*, n^*, b^* = مختصات ذاتی نسبی

T = دمای سیال

U = سرعت خطی پره

v,u,V,W = مؤلفه‌های سرعت جریان در امتدادهای s، y و z

u_t = سرعت اصطکاک

x,y,z = مختصات دکارتی

U = اندازه سرعت جریان اصلی

V = سرعت مطلق سیال

V_1 یا $V_\circ$ = سرعت ورودی جریان اصلی یا سرعت جریان در بالا دست پره

α = زاویه جریان مطلق نسبت به محور توربین = $\cos^{-1}(\frac{q_x}{q})$

β = زاویه جریان نسبی نسبت به محور توربین = $\tan^{-1}(\frac{v}{u})$

z^+ = نقطه‌ایکه رأس مدل مثلثی جانسون را مشخص می‌کند.

δ = ضخامت لایه مرزی

$\in$ = ضریب پخش یا ویسکوزیته گردابه‌ای

$\phi = \tan^{-1}(\frac{dV}{dZ}/\frac{du}{dz}) = \gamma = \beta_0 - \phi$

ϕ = میزان محو شدن انرژی جنبشی توربلانت

ψ = تابع جریان برای جریان ثانویه

ω = ورتیسیتی یا چرخش موضعی

ρ = چگالی سیال

ν = ویسکوزیته سینماتیکی سیال

μ = ویسکوزیته سیال

τ = تنش برشی، τ_{ox} = تنش برشی در جداره در امتداد x و τ_{oy} = در امتداد y و τ_{zx} و τ_{zy} = مجموع تنشهای ویسکوز و رینولدز

T^* = انرژی جنبشی جریان ثانویه

η = راندمان

ξ,η = مختصات (مخالف و عمود برجهت تنش برشی جداره)

C_D = ضریب درگ

C_L = ضریب لیفت یا بالابری

L = لیفت پره

Γ = سیوکولاسیون

2δ = پهنای Wake یا دو برابر ضخامت لایه مرزی ورودی

C_{pt} = ضریب فشار کل = $\frac{P_{t0}-P_t}{\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2}$

۱ و ۲ = به ترتیب ورودی و خروجی مجرا

«تاریخچه جریانهای ثانویه و تلفات آن در توربین‌های جریان محوری»

تاکنون نحوه ایجاد جریان حلقوی در ردیف پره‌های توربین به صورت تحلیلی و آزمایش بررسی گردیده ولی تلفات این جریان فقط بصورت آزمایشی بررسی شده است. کلیه آزمایشات انجام شده نتایج تقریبی را که در بعضی از موارد هم‌خوانی خوبی ندارند، ارائه می‌دهند. چون لایه‌های مرزی ورودی پس از مدتی از سطح جداره‌ها جدا شده و باگردابهای دیگر ترکیب و جریان پیچیده‌ای را تولید می‌کنند. پس بررسی آن و تلفات نظیر خیلی مشکل و حتی گاهی غیرممکن است. خلاصه اینکه گرچه الگوهای جریان ثانویه را می‌توان با روش‌های تحلیلی به طور موفقیت‌آمیز بررسی و پیشگوئی کرد ولی بررسی تلفات این جریان فقط با روش تحلیلی امکان‌پذیر نیست.

در سال ۱۹۴۶ دو محقق به نام Cohen و Carter جریان سه‌بعدی درون یک ردیف پره را به صورت مقدماتی بررسی و تحلیل کردند و نتیجه گرفتند که جریان ثانویه درون ردیف پره سبب القاء سرعت که شبیه سرعت القائی بال‌های هواپیما می‌باشد، خواهند شدو اندازه تلفات جریان ثانویه با فاصله مرکزگرداب تا جداره‌های انتهایی نظیرشان متناسب خواهند بود (ولی تابحال به صورت تحلیلی یا آزمایش اثبات نشده است).

در سال ۱۹۴۹ Kraft تست‌های برروی نازلهای با وتر و ارتفاع متغیر انجام داد و توانست فقط تلفات کل را اندازه بگیرد نه تلفات لایه مرزی بالا دست را. در سال ۱۹۵۱ Ainley و Mathienson روش Carter و Cohen را دنبال کردند و نتیجه گرفتند که ضریب تلفات جریان ثانویه مستقل از نسبت سیما نیست، بلکه برای نسبت سیماهای خیلی کم این ضریب بیشتر است. با آزمایش ثابت کردند که پره‌های با نسبت سیمای کم راندمان کمتر از پره‌های با نسبت سیمای زیاد دارند.

در سال ۱۹۵۵ Smith به طور آزمایشی جریان ثانویه در یک توربین را بررسی کرد و گفت که انرژی جریان ثانویه با اختلاط از بین می‌رود.

در سال ۱۹۵۵ Herzig و Hansen در آزمایشگاه نیروهای جلوبرنده و پرواز لوئیس با

یک سری آزمایشات جالب و زیاد به بررسی فیزیکی جریان در نزدیکی جداره‌های انتهایی ردیف پره پرداختند و نتیجه گرفتند که لایه مرزی بالا دست جداره در عرض مجرا به طرف سطح محدب آن جاروب می‌شود.

در سال ۱۹۵۷ Turner لایه‌های مرزی جداره انتهایی توربین بخار را ضخیم کرده و بار دیگر آن برداشت و نتایج شبیه بالا در حد تقریب استخراج کرد.

در سال ۱۹۷۳ Horlock آزمایشهای مختلفی برای تحلیل و بررسی جریان ثانویه انجام داد و برای تلفات این جریان یک رابطه تجربی پیدا کرد که مجهولات زیادی داشت و از نظر کمّی چیزی نمی‌داد.

در سال ۱۹۸۰ Langston به بررسی کیفی جریانهای ثانویه در ردیف پره‌های توربین پرداخت. او با آزمایشهای گوناگون سرعت‌های ثانویه و تغییر زاویه خروجی را به طور کیفی نه کمی ارزیابی کرد ولی نتوانست رابطه‌های ریاضی مربوط را پیدا کند.

در سال ۱۹۹۲ Chen و Godstein با آزمایش مجهزی به بررسی پدیده انتقال در طرف مکش مجرای جریان در توربین پرداختند و پی به انواع گردابها در توربین بردند.

در سال ۱۹۹۴ Lewis در آزمایشگاه وایت دانشگاه به بررسی پدیده انتقال در جهت موازی با دهنه در توربین‌های جریان محوری با استفاده از یک سیال ردیاب پرداخت و نتیجه گرفت که دو مکانیزم پخش توربولانت و جریان ثانویه در هر طبقه توربین صورت می‌گیرند و هر چه به طرف پایین دست می‌رویم پخش توربولانت قوی‌تر می‌شود.