

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۰۲۰۷۷

دانشگاه میرزا
مجتمع فنی مهندسی

دانشکده مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

بررسی عددی میدان جریان و انتقال حرارت در کانالهای U شکل خنک

کننده پره های توربین همراه با دندانه

اطلاعات کتابخانه
کتابخانه

استاد راهنما

دکتر احمد سوهان کار

استاد مشاور

دکتر علی اکبر دهقان

نگارش

روح... دیداری اردکانی

۲۴ / ۹ / ۱۳۸۷

بهمن ۱۳۸۶

۱۰۲۵۷۷

تقدیم بہ:

درفذاکار
پ

و

مادر مہربانم...

۱۳۸۷ / ۹ / ۲۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی

صور تجلسه دفاعیه پایان نامه دانشجوی
دوره کارشناسی ارشد

شناسه: ب/ک/۳

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای/خانم: روح... دیداری اردکانی
رشته/گرایش: مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

تحت عنوان: بررسی عددی میدان جریان و انتقال حرارت در کانالهای U شکل خنک کننده پره‌های توربین
همراه با دندانه

و تعداد واحد: ۶ در تاریخ ۱۴/۱۲/۱۳۸۶ با حضور اعضای هیأت داوران (به شرح ذیل) تشکیل گردید.
پس از ارزیابی توسط هیأت داوران، پایان نامه با نمره: به عدد ۱۸٫۷۵ به حروف هجده و هفتاد و پنج درصد
و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

عنوان	نام و نام خانوادگی	امضاء
استاد/استادان راهنما:	آقای دکتر احمد سوهان کار	
استاد/استادان مشاور:	آقای دکتر علی اکبر دهقان	
متخصص و صاحب نظر داخلی:	آقای دکتر شهرام طالبی	
متخصص و صاحب نظر خارجی:	آقای دکتر مهرداد تقی زاده منظری	

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)

نام و نام خانوادگی: آقای دکتر علی اکبر تدین

امضاء:

چکیده

بررسی عددی میدان جریان سیال و انتقال حرارت در یک کانال U شکل خنک کننده پره‌های توربین گاز به صورت سه بعدی (برای پره‌های ساکن و چرخان) شبیه سازی عددی شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. اولین هندسه مورد مطالعه (هندسه مرجع) دارای دندانه‌هایی با مقطع مربعی و زاویه ۴۵ درجه می‌باشد.

در فصل اول به معرفی توربین گاز و روابط ترمودینامیکی حاکم بر عملکرد آن پرداخته شده است. سپس انواع روش‌های خنک‌کاری پره‌های توربین گاز و اساسا علت نیاز به خنک‌کاری در آن‌ها پرداخته شده است. در فصل دوم، تاریخچه مطالعات تجربی و عددی انجام شده در زمینه خنک‌کاری داخلی پره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم صورت مسئله، هندسه کانال و انواع دندانه‌های مورد استفاده، شرایط مرزی و نحوه ایجاد شبکه روی میدان حل شرح داده شده است. سپس انواع مدل‌های تک معادله‌ای و دو معادله‌ای برای حل در اعداد رینولدز ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ به کار گرفته شده و در نهایت مناسب‌ترین مدل برای هر عدد رینولدز انتخاب شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که از بین مدل‌های یک و دو معادله‌ای مدل $k-\epsilon$ RNG در رینولدز ۵۰۰۰ و مدل $k-\omega$ SST در اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ نزدیک‌ترین پیش‌بینی را در مقایسه با نتایج تجربی، انجام می‌دهند.

در فصل چهارم به بررسی اثر تغییر ابعاد (ارتفاع و عرض دندانه) و تغییر زاویه دندانه بر میدان جریان و انتقال حرارت کانال پرداخته شده است. و در نهایت با منظور کردن هر دو پارامتر افت فشار و بهبود انتقال حرارت، هندسه بهینه معرفی شده است.

در فصل پنجم، از روش شبیه‌سازی ادی بزرگ برای حل عددی استفاده شده است. و این موضوع مورد مطالعه قرار گرفته است که با استفاده از این روش چه مقدار بر دقت حل عددی افزوده شده و نتایج آن با نتایج تجربی و هم حل عددی با مدل‌های دو معادله‌ای، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از این روش، سبب ایجاد کمترین خطای محاسبات عددی نسبت به نتایج تجربی می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
فهرست جداول.....	س.....
فهرست شکلها.....	ه.....
فهرست علائم اختصاری.....	ع.....
فصل اول: مقدمه ای بر روش های خنک کاری توربین های گاز.....	۱.....
۱-۱- مقدمه.....	۲.....
۲-۱- سیکل برایتون.....	۵.....
۳-۱- محدودیتهای استفاده از دماهای بالا.....	۶.....
۴-۱- خنک کاری پره ها.....	۷.....
۱-۴-۱- خنک کاری داخلی.....	۹.....
۱-۱-۴-۱- روش برخورد جت.....	۱۰.....
۲-۱-۴-۱- خنک کاری با استفاده از پره های سوزنی.....	۱۱.....
۳-۱-۴-۱- خنک کاری با استفاده از کانال های دنداندار.....	۱۲.....
۵-۱- پدیده های جریان سیال در کانال های خنک کننده پره های توربین.....	۱۵.....
۱-۵-۱- مکانیزم برش.....	۱۶.....
۲-۵-۱- جریان های ثانویه.....	۱۶.....
۳-۵-۱- افزایش و کاهش شتاب سیال.....	۱۷.....
۴-۵-۱- پدیده جدایش.....	۱۷.....
۵-۵-۱- اثرات بویانسی.....	۱۷.....
فصل دوم: مروری بر تاریخچه مطالعات انجام شده.....	۱۹.....
۱-۲- مقدمه.....	۲۰.....

- ۲-۳- مطالعات تجربی ۲۱
- ۲-۳-۱- تاثیر شکل هندسی دندانها بر الگوی جریان و انتقال حرارت ۲۲
- ۲-۳-۲- بررسی تاثیر سطح مقطع متغیر کانال خمیده بر انتقال حرارت ۲۸
- ۲-۳-۳- بررسی تاثیر دوران کانال خمیده بر انتقال حرارت آن ۳۱
- ۲-۳-۴- بررسی تاثیر آرایش دندانها بر جریان و انتقال حرارت ۳۸
- ۲-۴- مطالعات عددی ۴۸
- نتیجه گیری: ۶۱
- فصل سوم: شرح مساله و معادلات تحقیق حاضر ۶۲
- ۳-۱- مقدمه ۶۳
- ۳-۲- شرح هندسه‌های مورد مطالعه ۶۴
- ۳-۳- شبکه ۶۶
- ۳-۴- شرایط مرزی و خواص سیال ۶۷
- ۳-۵- روشهای حل عددی ۶۷
- ۳-۶- مختصری از تاریخچه توربولانس و معرفی مدل‌های توربولانسی ۶۸
- ۳-۶-۱- اسکیل‌های کولموگروف ۷۰
- فصل چهارم: بررسی نتایج (اثر تغییر ابعاد و زاویه دندانها بر عملکرد کانال) ۷۲
- ۴-۱- مقدمه ۷۳
- ۴-۲- انتخاب روش عددی مناسب برای حل مسئله ۷۴
- ۴-۳- مقایسه نتایج انواع مدل‌های توربولانسی برای هندسه اول و دوم تحت شرایط مرجع [۱۲] ۷۵
- ۴-۳-۱- تفسیر نمودارهای ناسلت موضعی با استفاده از بررسی فیزیک جریان ۸۵

- ۴-۴- بررسی تاثیر تغییر ارتفاع دندانها ۱۰۲
- ۴-۵- بررسی تاثیر تغییر عرض دندانها ۱۱۷
- ۴-۶- بررسی تاثیر تغییر زاویه دندانها در میدان جریان ۱۲۹
- ۴-۷- بررسی مستقل از شبکه بودن حل عددی ۱۴۵
- فصل پنجم: بررسی نتایج سه بعدی و غیردائم - شبیه سازی ادی های بزرگ ۱۴۷
- ۵-۱- مقدمه ۱۴۸
- ۵-۲- مقایسه نتایج تجربی و LES ۱۵۶
- ۵-۳- نمودارهای افت فشار و ضریب عملکرد حرارتی کانال ۱۶۲
- ۵-۴- نحوه رشد یک گردابه روی یک دندان ۱۶۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- تاثیر عوامل هندسی و شرایط مرزی بر ایجاد پدیده های مختلف درون میدان جریان ----- ۳۷
- جدول ۱-۲- انواع دندانهاى مطالعه شده توسط مرجع [4] ----- ۴۶
- جدول ۲-۲- حالت های مختلف بررسی شده توسط مرجع [16] ----- ۷۴
- جدول ۳-۲- نتایج مربوط به مرجع [19] (نتایج داخل پرانتز مربوط به محاسبه شبکه با تراکم بالاتر است). -- ۸۲
- جدول ۱-۳- مشخصات انواع هندسه‌های مورد مطالعه ----- ۸۷
- جدول ۱-۴- مقایسه خطای نسبی ناشی از به کار بردن مدل‌های عددی برای هندسه دوم، تحت شرایط [۱۲] ----- ۱۰۹
- جدول ۲-۴- مقایسه خطای موجود در مقادیر ناسلت موضعی ناشی از تفاوت تراکم شبکه ----- ۱۷۱
- جدول ۱-۵- مقایسه درصد خطای نسبی مدل‌های عددی نسبت به نتایج تجربی [12] برای ناسلت موضعی ----- ۱۸۹
- جدول ۲-۵- مقدار ورتیستی در مرکز گردابه (در ثانیه دوازدهم) ----- ۱۹۷

فهرست شکل‌ها

فصل اول

- شکل ۱-۱- بخش‌های مختلف یک توربین گاز [1] ----- ۳
- شکل ۱-۲- سیکل بسته توربین گاز ----- ۴
- شکل ۱-۳- سیکل باز توربین گاز ----- ۴
- شکل ۱-۴- انواع خنک‌کاری در پره توربین [1] ----- ۸
- شکل ۱-۵- خنک‌کاری به روش برخورد جت و آرایش جت‌ها در یک ایرفویل [1] ----- ۱۱
- شکل ۱-۶- نمایی از رژیم جریان تحت تاثیر دندان‌ها در یک کانال خنک‌کننده [1] ----- ۱۳
- شکل ۱-۷- نحوه ایجاد جریان‌های ثانویه تحت تاثیر دندان‌ها [1] ----- ۱۴
- شکل ۱-۸- نمایی از موقعیت یک کانال خنک‌کننده در پره و رفتار جریان داخل آن [2] ----- ۱۵

فصل دوم

- شکل ۲-۱- قراردادهای نام‌گذاری در یک کانال خنک‌کاری داخلی [2] ----- ۲۱
- شکل ۲-۲- کانال‌های مورد بررسی توسط مرجع [3] ----- ۲۳
- شکل ۲-۳- نمونه‌ای از نواحی برخورد ایجاد شده توسط جریان اصلی در یک مقطع از کانال بدون دندان‌ها [3] ----- ۲۴
- شکل ۲-۴- کانتور Nu/Nu_0 برگرفته از نتایج تجربی [5] نشان‌دهنده تطابق نواحی با انتقال حرارت بالا روی نقاط برخورد در همان مقطع از کانالی با همان مشخصات ----- ۲۴
- شکل ۲-۵- کانتورهای Nu/Nu_0 برای کانال دندان‌دار در همان مقطع شکل ۲-۳ ----- ۲۵
- شکل ۲-۷- توزیع انتقال حرارت، مولفه‌های سرعت و انرژی جنبشی توربولانسی، پشت یک دندان‌تنها [4] ----- ۲۷
- شکل ۲-۸- توزیع انتقال حرارت و ضریب اصطکاک محدوده یک سری از دندان‌ها [4] ----- ۲۷
- شکل ۲-۹- هندسه مورد استفاده در مرجع [6] ----- ۲۸

شکل ۲-۱۰- مقایسه انتقال حرارت بین کانال همگرا-واگرا و کانال مقطع ثابت برای حالت بدون دندانه [6]

۲۹ -----

شکل ۲-۱۱- مقایسه عملکرد حرارتی کانال همگرا-واگرای دارای دندانه با کانال مقطع ثابت دارای دندانه

[6] ----- ۳۰

شکل ۲-۱۲- مقایسه عملکرد حرارتی کانال همگرا-واگرا در دو حالت با و بدون دندانه [6] ----- ۳۱

شکل ۲-۱۳- رفتار جریان تحت تاثیر دندانه ها در نواحی دور از خم (A) بدون دوران (B) دارای دوران [8]

۳۲ -----

شکل ۲-۱۴- رفتار جریان تحت تاثیر دندانه ها در ناحیه خم: (A) بدون دوران (B) دارای دوران [8] -- ۳۳

شکل ۲-۱۵- کانتورهای عدد نوسلت برای یک کانال خمیده، دندانه دار و ساکن [8] ----- ۳۴

شکل ۲-۱۶- کانتورهای عدد نوسلت برای یک کانال خمیده دندانه دار و دارای دوران [8] ----- ۳۴

شکل ۲-۱۷- نمایی از هندسه کانال در مرجع [9] ----- ۳۵

شکل ۲-۱۸- توزیع سرعت در $x/d_h = -2.6$ ----- ۳۶

شکل ۲-۱۹- توزیع سرعت در ناحیه خم ----- ۳۶

شکل ۲-۲۰- توزیع سرعت در $x/d_h = 1.3$ ----- ۳۷

شکل ۲-۲۱- متوسط سطحی نسبت نوسلت ها در کانال بررسی شده توسط [9] ----- ۳۷

شکل ۲-۲۲- آرایش های مختلف مورد استفاده در مرجع [10] ----- ۳۹

شکل ۲-۲۳- تاثیر آرایش های مختلف دندانه ها بر عدد نوسلت متوسط [10] ----- ۴۰

شکل ۲-۲۴- مقایسه نتایج آزمایش برای دو حالت دارای حفره های فرار و بدون آن ها [10] ----- ۴۱

شکل ۲-۲۵- آرایش دندانه ها در مرجع [11] ----- ۴۱

شکل ۲-۲۶- توزیع NU/NU_0 روی محور مرکزی کانال در مرجع [11] ----- ۴۲

شکل ۲-۲۷- انتقال حرارت کانال دندانه دار (▼، ♦، و + مکان های متفاوت ترموکوپل روی سطح را نشان

می دهد.) ----- ۴۴

شکل ۲-۳۰- انتقال حرارت در مورد (F) دارای دندانه های متقاطع در شکل ۲-۲۸ مربوط به مرجع [12] ۴۶

- شکل ۲-۳۱- نمایی از کانال به کار رفته در آزمایشات مرجع [13] ----- ۴۷
- شکل ۲-۳۲- اثر دندان‌های جدا از دیواره بر رفتار جریان در کانال ----- ۴۸
- شکل ۲-۳۳- کانال به کار رفته در آزمایشات مرجع [14] ----- ۴۹
- شکل ۲-۳۴- (A) جریان‌های ثانویه (B) میدان دما، در کانال دندان‌دار ----- ۵۰
- شکل ۲-۳۵- هندسه و آرایش دندان‌ها مربوط به مرجع [15] ----- ۵۱
- شکل ۲-۳۶- شکل مربوط به مرجع [16] ----- ۵۲
- شکل ۲-۳۸- توزیع متوسط نوسلت مربوط به موارد C3 و C4 ----- ۵۵
- شکل ۲-۳۹- توسعه مولفه‌های سرعت در یک مقطع عمودی از کانال مستقیم (تجربی، DES و LES) ----- ۵۶
- شکل ۲-۴۰- مقایسه فاکتور اصطکاک محاسبه شده از روش DES در مرجع [17] با نتایج LES ----- ۵۷
- شکل ۲-۴۱- مقایسه نتایج DES و تجربی ----- ۵۷
- شکل ۲-۴۲- هندسه مرجع [18] ----- ۵۸
- شکل ۲-۴۳- مقایسه انتقال حرارت LES و تجربی شکل ۲-۴۴- مقایسه سرعت محوری و نوسانات
سرعت ----- ۵۹
- شکل ۲-۴۵- کانال مورد مطالعه توسط مرجع [19] ----- ۵۹
- شکل ۲-۴۶- آرایش دندان‌ها در محاسبات مربوط به شکل ۲-۴۵ ----- ۶۰
- فصل سوم
- شکل ۳-۱- مشخصات هندسه اول (ابعاد بر حسب متر) ----- ۶۴
- شکل ۳-۲- مشخصات هندسه دوم ----- ۶۴
- شکل ۳-۳- نمایی از میدان حل و شبکه به کار رفته در آن ----- ۶۶
- فصل چهارم
- شکل ۴-۱- تعریف پارامتر X/D و نمایش مقادیر آن در طول کانال ----- ۷۵
- شکل ۴-۲- الف مقایسه نتایج مدل اسپالارت - آلماراس و نتایج تجربی [۱۲] در هندسه دوم در حالت بدون
چرخش ----- ۷۶

- شکل ۴-۲-ب مقایسه نتایج مدل اسپالارت - آلماراس و نتایج تجربی [۱۲] در هندسه دوم در حالت با چرخش ----- ۷۷
- شکل ۴-۳- مقایسه نتایج K-EPSILON و نتایج تجربی [12] در رینولدز ۵۰۰۰ برای دو حالت بدون چرخش و با چرخش ----- ۷۸
- شکل ۴-۴- مقایسه نتایج K-EPSILON و نتایج تجربی [12] در رینولدز ۱۰۰۰۰ در دو حالت بدون چرخش و با چرخش ----- ۷۹
- شکل ۴-۵- مقایسه نتایج K-EPSILON و نتایج تجربی [12] در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰ ----- ۸۰
- شکل ۴-۶- مقایسه نتایج K-W SST و نتایج تجربی [12] در رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۸۲
- شکل ۴-۷- مقایسه نتایج K-W SST و نتایج تجربی [12] در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ ----- ۸۳
- شکل ۴-۸- مقایسه نتایج K-W SST و نتایج تجربی [12] در رینولدز ۲۵۰۰۰ ----- ۸۴
- شکل ۴-۹- موقعیت مقاطع منتخب برای نمایش جریانهای ثانویه ----- ۸۸
- شکل ۴-۱۰- الگوی جریان ثانویه در مقاطع مشخص شده در شکل ۴-۹ برای کانال ساکن در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۸۹
- شکل ۴-۱۱- الگوی جریان ثانویه در مقاطع مشخص شده در شکل ۴-۹ برای کانال چرخان در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۰
- شکل ۴-۱۲- نمایش جهت نیروی کوریولیس وارد بر ذرات سیال در دو گذرگاه اول و دوم کانال چرخان ----- ۹۱
- شکل ۴-۱۳- توزیع فشار در مقاطع منتخب از کانال ساکن در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۳
- شکل ۴-۱۴- توزیع فشار در مقاطع منتخب از کانال چرخان در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۴
- شکل ۴-۱۵- توزیع دما در مقاطع منتخب از کانال ساکن در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۵
- شکل ۴-۱۶- توزیع دما در مقاطع منتخب از کانال چرخان در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۶
- شکل ۴-۱۷- توزیع سرعت در مقاطع منتخب کانال ساکن در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۷
- شکل ۴-۱۸- توزیع سرعت در مقاطع منتخب کانال چرخان در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۸
- شکل ۴-۱۹- توزیع انرژی جنبشی توربولانسی در مقاطع منتخب کانال ساکن در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۹۹

شکل ۴-۲۰- توزیع انرژی جنبشی توربولانسی در مقاطع منتخب کانال چرخان در رینولدز ۵۰۰۰ -- ۱۰۰

شکل ۴-۲۱- کانتورهای دما و سرعت در صفحه تقارن کانال در هندسه دوم و رینولدز ۱۰۰۰۰ --- ۱۰۱

شکل ۴-۲۲- کانتورهای فشار و انرژی جنبشی توربولانسی در صفحه تقارن کانال در هندسه دوم و

رینولدز ۱۰۰۰۰ ----- ۱۰۱

شکل ۴-۲۳- مقایسه نمودار عدد ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۵۰۰۰ (کانال

ساکن) ----- ۱۰۳

شکل ۴-۲۴- مقایسه عدد ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۵۰۰۰ (دیواره حمله-

کانال چرخان) ----- ۱۰۳

شکل ۴-۲۵- مقایسه عدد ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۵۰۰۰ (دیواره فرار -

کانال چرخان) ----- ۱۰۴

شکل ۴-۲۶- مقایسه نمودار عدد ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۱۰۰۰۰ (کانال

ساکن) ----- ۱۰۴

شکل ۴-۲۷- مقایسه عدد ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۱۰۰۰۰ (دیواره حمله-

کانال چرخان) ----- ۱۰۵

شکل ۴-۲۸- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۱۰۰۰۰ (دیواره فرار- کانال

چرخان) ----- ۱۰۵

شکل ۴-۲۹- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۲۵۰۰۰ (کانال ساکن) ۱۰۶

شکل ۴-۳۰- مقایسه عدد ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۲۵۰۰۰ (دیواره حمله

- کانال چرخان) ----- ۱۰۶

شکل ۴-۳۱- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه‌های دوم الی ششم در رینولدز ۲۵۰۰۰ (دیواره فرار -

چرخان) ----- ۱۰۷

شکل ۴-۳۲- مقایسه قدرت گردابه در مقاطع منتخب از هندسه‌های دوم، سوم و ششم برای $Re = 10000$

----- ۱۰۹

- شکل ۴-۳۳- مقایسه قدرت گردابه در مقاطع منتخب از هندسه‌های دوم، سوم و ششم برای $RE=25000$
- ۱۰۹-----
- شکل ۴-۳۴- مقایسه متوسط ناسلتها بین هندسه دوم الی ششم در حالت بدون چرخش ----- ۱۱۰
- شکل ۴-۳۵- مقایسه متوسط عدد ناسلت متوسط بین هندسه دوم الی ششم در کانال چرخان ---- ۱۱۱
- شکل ۴-۳۶- مقایسه افت فشار بین هندسه دوم الی ششم در حالت بدون چرخش ----- ۱۱۲
- شکل ۴-۳۷- مقایسه افت فشار بین هندسه دوم الی ششم در کانال چرخان ----- ۱۱۳
- شکل ۴-۳۸- مقایسه ضریب عملکرد کانال بین هندسه‌های دوم الی ششم در حالت‌های ساکن و چرخان
- ۱۱۵-----
- شکل ۴-۳۹- تغییرات دمای بالک در اثر تغییر ارتفاع دندانها در کانال ساکن ($RE=10000$) ----- ۱۱۶
- شکل ۴-۴۰- تغییرات دمای بالک در اثر تغییر ارتفاع دندانها در کانال چرخان ($RE=10000$) ----- ۱۱۷
- شکل ۴-۴۱- مقایسه عدد ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در کانال ساکن و عدد رینولدز
- ۵۰۰۰----- ۱۱۸
- شکل ۴-۴۲- مقایسه عدد ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در دیوار حمله کانال چرخان و
- عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۱۱۸
- شکل ۴-۴۳- مقایسه عدد ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در دیوار فرار کانال چرخان و
- عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۱۱۹
- شکل ۴-۴۴- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در کانال ساکن و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰
- ۱۱۹
- شکل ۴-۴۵- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در دیوار حمله کانال چرخان و عدد
- رینولدز ۱۰۰۰۰ ----- ۱۲۰
- شکل ۴-۴۶- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در دیوار فرار کانال چرخان و عدد
- رینولدز ۱۰۰۰۰ ----- ۱۲۰

شکل ۴-۴۷- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در کانال ساکن و عدد رینولدز

۲۵۰۰۰ ----- ۱۲۱

شکل ۴-۴۸- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در دیوار حمله کانال چرخان و عدد

رینولدز ۲۵۰۰۰ ----- ۱۲۱

شکل ۴-۴۹- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، هفتم، ...، دهم در دیوار فرار کانال چرخان و عدد

رینولدز ۲۵۰۰۰ ----- ۱۲۲

شکل ۴-۵۰- مقایسه افت فشار در هندسه‌های دوم، هفتم، ...، دهم در کانال ساکن ----- ۱۲۳

شکل ۴-۵۱- مقایسه افت فشار در هندسه‌های دوم، هفتم، ...، دهم در کانال چرخان ----- ۱۲۳

شکل ۴-۵۲- معرفی نواحی برگشتی و بازپیوستن [۱] ----- ۱۲۴

شکل ۴-۵۳- هندسه هفتم، کانال بدون چرخش در $RE = 5000$ ----- ۱۲۵

شکل ۴-۵۴- هندسه دوم، کانال بدون چرخش در $RE = 5000$ ----- ۱۲۵

شکل ۴-۵۵- هندسه دهم، کانال بدون چرخش در $RE = 5000$ ----- ۱۲۵

شکل ۴-۵۶- تغییرات عدد ناسلت متوسط در اثر تغییر عرض دندانه‌ها (کانال ساکن) ----- ۱۲۶

شکل ۴-۵۷- تغییرات عدد ناسلت متوسط در اثر تغییر عرض دندانه‌ها (کانال چرخان) ----- ۱۲۶

شکل ۴-۵۹- مقایسه عملکرد حرارتی کانال بین هندسه‌های دوم، هفتم، ...، دهم ----- ۱۲۸

شکل ۴-۶۰- راستای حرکت جریان های ثانویه تحت تاثیر زاویه دندانه ها [1] ----- ۱۲۹

شکل ۴-۶۱- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز ۵۰۰۰ (کانال

ساکن) ----- ۱۳۰

شکل ۴-۶۲- مقایسه ناسلت موضعی هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز ۵۰۰۰ (دیواره

حمله-کانال چرخان) ----- ۱۳۰

شکل ۴-۶۳- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم (دیوار فرار-کانال

چرخان) ----- ۱۳۱

- شکل ۴-۶۴- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز (۱۰۰۰۰) کانال ساکن) ----- ۱۳۱
- شکل ۴-۶۵- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز (۱۰۰۰۰) دیوار حمله) ----- ۱۳۲
- شکل ۴-۶۶- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز (۱۰۰۰۰) دیوار فرار) ----- ۱۳۲
- شکل ۴-۶۷- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز ۲۵۰۰۰ (غیر چرخان) ----- ۱۳۳
- شکل ۴-۶۸- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز ۲۵۰۰۰ (دیوار حمله) ----- ۱۳۳
- شکل ۴-۶۹- مقایسه ناسلت موضعی بین هندسه دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم رینولدز ۲۵۰۰۰ (دیوار فرار) ----- ۱۳۴
- شکل ۴-۷۰- ضریب عملکرد کانال تحت زوایای متفاوت دندانه (هندسه‌های دوم، یازدهم، دوازدهم، سیزدهم) ----- ۱۳۵
- شکل ۴-۷۱- کانتور فشار روی صفحات مجاور دیواره دندانه‌دار در کانال ساکن و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندانه با زاویه صفر درجه) ----- ۱۳۶
- شکل ۴-۷۲- کانتور فشار روی صفحات الف- مجاور دیواره حمله ب- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندانه با زاویه صفر درجه) ----- ۱۳۶
- شکل ۴-۷۳- کانتور فشار روی صفحات الف- مجاور دیواره در کانال ساکن ب- مجاور دیواره حمله ج- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندانه با زاویه ۳۰ درجه) ----- ۱۳۸
- شکل ۴-۷۴- کانتور فشار روی صفحات الف- مجاور دیواره در کانال ساکن ب- مجاور دیواره حمله ج- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندانه با زاویه ۴۵ درجه) ----- ۱۳۸

- شکل ۴-۷۵- کانتور فشار روی صفحات الف- مجاور دیواره در کانال ساکن ب- مجاور دیواره حمله ج-
- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندان با زاویه ۶۰ درجه) ----- ۱۳۹
- شکل ۴-۷۶- کانتور دما روی صفحات الف- مجاور دیواره در کانال ساکن ب- مجاور دیواره حمله ج-
- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندان با زاویه صفر درجه) ----- ۱۳۹
- شکل ۴-۷۷- کانتور دما روی صفحات الف- مجاور دیواره در کانال ساکن ب- مجاور دیواره حمله ج-
- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندان با زاویه ۳۰ درجه) ----- ۱۴۰
- شکل ۴-۷۸- کانتور دما روی صفحات الف- مجاور دیواره در کانال ساکن ب- مجاور دیواره حمله ج-
- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندان با زاویه ۴۵ درجه) ----- ۱۴۰
- شکل ۴-۷۹- کانتور دما روی صفحات الف- مجاور دیواره در کانال ساکن ب- مجاور دیواره حمله ج-
- مجاور دیواره فرار در کانال چرخان و عدد رینولدز ۵۰۰۰ (دندان با زاویه ۶۰ درجه) ----- ۱۴۱
- ۴-۸۰- تغییرات دمای بالک در اثر تغییر زاویه دندان در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۱۴۲
- ۴-۸۱- تاثیر تغییر زاویه دندانها بر پارامتر سیرکولاسیون در عدد رینولدز ۵۰۰۰ ----- ۱۴۴
- شکل ۴-۸۲- بررسی استقلال از شبکه در حل هندسه ششم در رینولدز ۱۰۰۰۰ (کانال ساکن) --- ۱۴۶
- شکل ۴-۸۳- بررسی استقلال از شبکه در حل هندسه ششم در رینولدز ۱۰۰۰۰ (کانال چرخان) -- ۱۴۶
- فصل پنجم
- شکل ۵-۱- رنج‌های مختلف ادیها در جریان لایه‌ای مخلوط شونده [20] ----- ۱۴۹
- شکل ۵-۲- نمایش مانده‌های منتج از LES (کانال ساکن در رینولدز ۱۰۰۰۰) ----- ۱۵۱
- شکل ۵-۳- نمودار تغییرات سرعت با زمان برای یک نقطه انتخابی واقع در ناحیه ورودی خم --- ۱۵۲
- شکل ۵-۴- تغییرات موضعی فشار برای نقطه انتخابی در ناحیه ورودی خم (نمای نزدیک از ناحیه مشخص شده در شکل بعد) ----- ۱۵۳
- شکل ۵-۵- نمای نزدیک از ناحیه مشخص شده در شکل قبل ----- ۱۵۳
- شکل ۵-۶- رفتار پریودیک جریان ثانویه در یک مقطع منتخب از کانال در طول زمان ----- ۱۵۴
- شکل ۵-۷- رفتار غیردائم و پریودیک فشار در یک مقطع منتخب از کانال در طول زمان ----- ۱۵۵

- شکل ۵-۸- رفتار غیردائم و پریودیک دما در یک مقطع منتخب از کانال در طول زمان ----- ۱۵۵
- شکل ۵-۹- مقایسه نتایج LES با نتایج تجربی [12] و نتایج مدل K-EPSILON در کانال ساکن، هندسه دوم
----- (RE=5000) ۱۵۶
- شکل ۵-۱۰- مقایسه نتایج LES با نتایج تجربی [12] در کانال چرخان، هندسه دوم (RE=5000) -- ۱۵۷
- شکل ۵-۱۱- مقایسه نتایج LES با نتایج مدل K-EPSILON در کانال چرخان، هندسه دوم (RE=5000) ۱۵۷
- شکل ۵-۱۲- مقایسه نتایج LES با نتایج تجربی [12] و نتایج مدل K-W SST در کانال ساکن، هندسه دوم
----- (RE=10000) ۱۵۸
- شکل ۵-۱۳- مقایسه نتایج LES با نتایج تجربی [12] در کانال چرخان، هندسه دوم (RE=10000) - ۱۵۸
- شکل ۵-۱۴- مقایسه نتایج LES با نتایج مدل K-W SST در کانال چرخان، هندسه دوم (RE=10000) ۱۵۹
- شکل ۵-۱۵- مقایسه نتایج LES با نتایج تجربی [12] و مدل K-W SST در کانال ساکن، هندسه دوم
----- (RE=25000) ۱۵۹
- شکل ۵-۱۶- مقایسه نتایج LES با نتایج تجربی [12] در کانال چرخان، هندسه دوم (RE=25000) -- ۱۶۰
- شکل ۵-۱۷- مقایسه نتایج LES با نتایج مدل K-W SST در کانال چرخان، هندسه دوم (RE=25000) ۱۶۰
- شکل ۵-۱۸- افت فشار در کانال ساکن و چرخان هندسه دوم و مقایسه با افت فشار محاسبه شده توسط
مدل دو معادله‌ای ----- ۱۶۲
- شکل ۵-۱۹- ضریب عملکرد حرارتی در کانال ساکن و چرخان هندسه دوم و مقایسه نتایج LES با مدل دو
معادله‌ای ----- ۱۶۳
- شکل ۵-۲۰- صفحات کمکی شماره ۱ الی ۳ (راستای جریان عمود بر صفحات ۱ الی ۳ است.) ---- ۱۶۴
- شکل ۵-۲۱- خطوط جریان در صفحه شماره ۱ در کانال ساکن (RE=10000, T= 12 SEC) ----- ۱۶۴
- شکل ۵-۲۲- خطوط جریان در صفحه شماره 2 در کانال ساکن (RE=10000, T= 12 SEC) ----- ۱۶۵
- شکل ۵-۲۳- خطوط جریان در صفحه شماره 3 در کانال ساکن (RE=10000, T= 12 SEC) ----- ۱۶۵
- شکل ۵-۲۴- خطوط جریان در صفحه شماره ۱ در کانال چرخان (RE=10000, T= 12 SEC) ----- ۱۶۶
- شکل ۵-۲۵- خطوط جریان در صفحه شماره ۲ در کانال چرخان (RE=10000, T= 12 SEC) ----- ۱۶۶

شکل ۵-۲۶- خطوط جریان در صفحه شماره ۳ در کانال چرخان (RE=10000, T= 12 SEC) ----- ۱۶۷