بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: مکانیک

حل عددی و تجربی جریان جابجایی ترکیبی آرام درون کانال، با چشمه‌های حرارتی، درون حفره های روباز

دانشجو: ابوالفضل شریف‌زاده

استاد راهنما:

دکتر محمدمحسن شاه‌مردان

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اسفند ۸۹

دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی

شماره : ۹۰/۱۹/۱۹م
تاریخ : ۹۰/۱/۲۷
ویرایش :

بسمه تعالی

فرم شماره (۶)

3234

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر(عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی‌ارشد آقای **ابوالفضل شریف زاده** رشته **مکانیک** گرایش**تبدیل انرژی** تحت عنوان **"حل عددی جریان جابجایی ترکیبی آرام درون کانال با چشمه های حرارتی درون حفره هاي باز"** که در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۷/۴۵) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۸) ۲ـ بسیار خوب (۱۷/۹۹ ـ ۱۶)

۳ـ خوب (۱۵/۹۹ ـ ۱۴) ۴ـ قابل قبول (۱۳/۹۹ ـ ۱۲)

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنما	محمدمحسن شاه‌مردان	استادیار	
۲ـ استاد مشاور	------	------	
۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مجتبی قطعی	استادیار	
۴ـ استاد ممتحن	پوریا اکبرزاده	استادیار	
۵ ـ استاد ممتحن	علی جباری مقدم	استادیار	

تأیید رئیس دانشکده :

تقدیم به:

پدرم

که شانه‌های خسته‌اش تکیه‌گاه زندگیم بوده است.

مادرم

دریای بی‌کران فداکاری، که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر.

و همسرم

پناه خستگیم و امید بودنم.

تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. خدای را بسی شاکرم از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته، تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ بگیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش، تلاش نمایم و نیز تشکر و قدردانی از خواهر و برادرانم که تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آن‌هاست.

از زحمات بی‌دریغ و دلسوزانه استاد ارجمند و گرامی، جناب آقای دکتر شاه‌مردان که در مدت زمان تدوین این اثر، یاری‌رسان و پشتیبان من بودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از زحمات استاد ارجمند جناب آقای مهندس احمد نظری، که در انجام کار آزمایشگاهی راهنمایی‌های مفید و سازنده‌ای به من ارائه دادند تشکر و سپاسگزاری می‌کنم و نیز سپاس فراوان از آقایان مهندس مسعودی و مهندس کهکی، که در آماده‌سازی تجهیزات آزمایشگاه تونل باد، یاری‌رسان من بودند.

ابوالفضل شریف‌زاده

اسفند ۱۳۸۹

تعهد نامه

اینجانب ...ابوالفضل شیرین زاده... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته...مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی...
دانشکده ...مکانیک..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه...جابجایی اجباری آشفته...
...بررسی عددی جابجایی ترکیبی آشفته درون کانال با چشمه های حرارتی درون حفره های باز...
تحت راهنمائی...دکتر محسن شاه مردان.....متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ : ۸۹/۱۲/۲۳

امضاء دانشجو :

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان‌نامه، جریان سیال درون یک کانال افقی با حفره‌هایی در کف آن، در حالت دوبعدی بررسی شده است. طول ورودی کانال و عمق حفره ۱۸ سانتی متر و پهنای حفره (در حالت حفره یک قسمتی) و طول خروجی کانال ۳۶ سانتی‌متر می‌باشد. جریان درون کانال لایه‌ای و تراکم‌ناپذیر و دیواره‌های کانال و حفره‌ها عایق هستند. جریان درون کانال در سه حالت یک حفره‌ای، دوحفره‌ای و سه‌حفره‌ای شبیه‌سازی و توسط نرم‌افزار فلوئنت تحلیل شده است و نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. نتایج نشان می دهد که هر چه تعداد حفره‌ها بیشتر شود، میانگین دما درون حفره ها بیشتر شده و نرخ انتقال حرارت از منبع حرارتی کف حفره ها به جریان هوای درون کانال کمتر می‌شود. همچنین جریان درون کانال در اعداد رینولدز مختلف و نیز در نسبت‌دیدهای مختلف (حالت یک‌حفره ای) شبیه‌سازی و الگوهای جریان و دما به صورت نمودارهایی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: حفره- کانال افقی- حل عددی- جریان آرام- نتایج آزمایشگاهی

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه----------۲

فصل دوم

معادلات حاکم----------۹

فصل سوم

۳-۱-آشنایی کلی با نرم افزار فلوئنت و قابلیتهای آن----------۱۲
۳-۱-۱-قابلیتهای برنامه----------۱۲
۳-۱-۲- دید کلی نرم افزار----------۱۳
۳-۱-۳-اجرا کردن نرم افزار فلوئنت----------۱۴
محاسبه گر یک دقته و محاسبه گر دودقته----------۱۴
۳-۱-۴- انتخاب شیوه محاسباتی----------۱۵
۳-۲- دسته بندی انواع نواحی و تنظیم شرایط مرزی----------۱۶
۳-۲-۱- مروری بر تعریف شرایط مرزی----------۱۶
۳-۲-۲-جریان خروجی و ورودی----------۱۶
۳-۲-۳- شرایط مرزی ورودی سرعت ----------۱۸
تنظیم کردن سرعت و جهت----------۱۸
تنظیم کردن اندازه سرعت عمود بر مرز----------۱۸
۳-۲-۴- شرط مرزی دیوار----------۱۹
تعیین شرایط مرزی دمایی----------۱۹
شرایط گرمایی برای دیوارهای دوطرفه----------۲۰
۳-۳-تنظیم خواص فیزیکی----------۲۱

تعیین خواص وابسته به دما----------۲۲
۳-۳-۱-چگالی----------۲۲
تعیین چگالی برای رژیم های جریان متغیر----------۲۳
ورودی برای چگالی ثابت----------۲۳
۳-۳-۲- لزجت----------۲۴
ورودی ها برای لزجت ثابت----------۲۴
قانون لزجت ساترلند----------۲۴
۳-۳-۳-قابلیت هدایت گرمایی----------۲۵
تعریف کردن قابلیت انتقال گرمایی با بکار بردن تئوری جنبشی----------۲۵
قابلیت گرمایی ثابت----------۲۶
۳-۳-۴- ظرفیت گرمایی ویژه----------۲۶
ظرفیت گرمایی ویژه ثابت----------۲۶
تعیین ظرفیت گرمایی ویژه با بکار گیری تئوری جنبشی----------۲۷
۳-۴-مدلهای فیزیکی پایه----------۲۸
۳-۴-۱-معادله مومنتم و پیوستگی----------۲۸
معادله بقای جرم----------۲۸
معادلات بقای مومنتم----------۲۸
۳-۴-۲-انتقال حرارت----------۲۹
معادله انرژی----------۲۹
استفاده از ضریب زیر تخفیف برای معادله انرژی----------۳۰
۳-۴-۳-مدل کردن جریان‌های شامل حرکت شناوری و جابجایی آزاد----------۳۰
مدل بوزینسک----------۳۰

فصل چهارم

۴-۱-تونل باد سرعت پایین----------۳۳

۴-۱-۱- ویژگیهای تونل باد مدار باز----------۳۵

۴-۱-۲-ساختمان تونل باد----------۳۵

۴-۱-۳-تنظیم سرعت فن تونل باد----------۳۶

۴-۲-دستگاههای اندازه گیری در تونل باد----------۳۷

۴-۲-۱-مکانیزم انتقال دهنده----------۳۷

۴-۲-۲- اندازه گیری سرعت جریان هوا----------۳۸

۴-۲-۳-سنسور سیم داغ----------۳۸

۴-۲-۴-اندازه گیری دما----------۳۹

۴-۳-نرم افزار Rake Flow Ware----------۳۹

۴-۳-۱-مدیریت داده ها----------۳۹

۴-۳-۲-تنظیم سخت افزار جریان سنج سیم داغ----------۳۹

۴-۳-۳-کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ----------۴۰

۴-۴- ساختار مدل حفره با منبع حرارتی دما ثابت----------۴۰

فصل پنجم

۵-۱- شبیه سازی جریان داخل کانال با حفره های دوبعدی----------۴۳

۵-۲- مقایسه نتایج بدست آمده از نرم افزار با مشاهدات آزمایشگاهی----------۵۲

فصل ششم

۶-۱- الگوهای جریان و دما در رینولدزهای مختلف----------۶۵

۶-۲- شبیه سازی جریان در نسبت دید های مختلف حفره----------۷۴

فهرست اشکال

شکل۲-۱- طرح شماتیک کانال افقی دو بعدی با منبع حرارتی در کف آن----------۸

شکل ۲-۲- کانال با حفره دوبعدی الف) دوقسمتی ب) سه‌قسمتی----------۸

شکل ۴-۱-تونل باد مدار بسته----------
۳۴

شکل ۴-۲-تونل باد مدار باز دمنده----------۳۴

شکل ۴-۳- مکانیزم انتقال‌دهنده پراب که بر روی سقف اتاق آزمون قرار گرفته است----------۳۷

شکل ۴-۴-پراب با سنسور روکش دار و بدون روکش----------۳۸

شکل ۴-۵- مدل چوبی کانال دارای حفره----------۴۱

شکل ۴-۶- صفحه چدنی دما ثابت کف حفره----------۴۱

شکل ۵-۱- کانتور های دما درون حفره در حالت یک حفره ای(A.R=2,Re=20000)----------۴۵

شکل ۵-۲- نمودار توزیع مؤلفه عمودی سرعت در خط میانی حفره در ارتفاع 9 cm----------۴۵

شکل ۵-۳- کانتور های دما درون حفره ها در حالت دو حفره ای(A.R=1,Re=20000)----------۴۶

شکل ۵-۴- نمودار توزیع مؤلفه عمودی سرعت در خط میانی حفره ها در ارتفاع 9 cm----------۴۶

شکل ۵-۵- کانتور های دما درون حفره ها در حالت سه حفره ای(A.R=2/3,Re=20000)---------۴۷

شکل ۵-۶- نمودار توزیع مؤلفه عمودی سرعت در خط میانی حفره ها در ارتفاع 9 cm----------۴۷

شکل ۵-۷- نمایش تغییرات دما در دهانه خروجی کانال(A.R=2,Re=20000)----------۴۹

شکل ۵-۸- تغییرات دما در دهانه خروجی کانال در حالت یک حفره ای----------۴۹

شکل ۵-۹- تغییرات دما در دهانه خروجی کانال در حالت دو حفره ای----------۵۰

شکل ۵-۱۰- تغییرات دما در دهانه خروجی کانال در حالت سه حفره ای----------۵۰

شکل ۵-۱۱- خطوط جریان درون حفره در حالت یک حفره ای(A.R=2,Re=20000)----------۵۲

شکل ۵-۱۲- خطوط جریان درون حفره ها در حالت دو حفره ای(A.R=1,Re=20000)----------۵۲

شکل ۵-۱۳- خطوط جریان درون حفره ها در حالت سه حفره ای(A.R=2/3,Re=20000)--------۵۳

شکل۵-۱۴- توزیع دما در میانه حفره(h=9 cm) در حالت یک حفره ای(نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی) Re=20000----------۵۴

شکل۵-۱۵- توزیع دما در میانه حفره(h=9 cm) در حالت دو حفره ای(نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی Re=20000(----------۵۵

شکل۵-۱۶- توزیع دما در میانه حفره(h=9 cm) در حالت سه حفره ای(نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی Re=20000(----------۵۶

شکل ۵-۱۷- توزیع دما بر روی صفحه y=4 cm درون حفره در حالت یک حفره ای Re=20000----۵۸

شکل ۵-۱۸- توزیع دما بر روی صفحه y=4 cm درون حفره در حالت دو حفره ایRe=20000 ------۵۹

شکل ۵-۱۹- توزیع دما بر روی صفحه y=4 cm درون حفره در حالت سه حفره ای Re=20000-----۶۰

شکل ۵-۲۰- توزیع دما بر روی صفحه y=14 cm درون حفره در حالت یک حفره ایRe=20000 ---۶۱

شکل ۵-۲۱- توزیع دما بر روی صفحه y=14 cm درون حفره در حالت دو حفره ای Re=20000----۶۲

شکل ۵-۲۲- توزیع دما بر روی صفحه y=14 cm درون حفره در حالت سه حفره ای Re=20000----۶۳

شکل ۶-۱- الگوی جریان درون حفره(Re=125)----------۶۶

شکل ۶-۲- الگوی جریان درون حفره(Re=500)----------۶۷

شکل ۶-۳- الگوی جریان درون حفره(Re=1000)----------۶۷

شکل ۶-۴- الگوی جریان درون حفره(Re=13500)----------۶۸

شکل ۶-۵- الگوی جریان درون حفره(Re=20000)----------۶۸

شکل ۶-۶- الگوی جریان درون حفره(Re=30000)----------۶۹

شکل ۶-۷- الگوی دما درون حفره(Re=125)----------۷۰

شکل ۶-۸- الگوی دما درون حفره(Re=500)----------۷۰
شکل۶-۹- الگوی دما درون حفره(Re=1000)----------۷۱
شکل ۶-۱۰- الگوی دما درون حفره(Re=13500)----------۷۱
شکل ۶-۱۱- الگوی دما درون حفره(Re=20000)----------۷۲
شکل ۶-۱۲-نمودار تغییرات عدد ناسلت میانگین در کف حفره (Re<1200)----------۷۳
شکل ۶-۱۳-نمودار تغییرات عدد ناسلت میانگین در کف حفره (10000<Re>50000)----------۷۳
شکل ۶-۱۴- خطوط جریان درون حفره $(\mathrm{A.R}=1)$----------۷۵
شکل ۶-۱۵- خطوط جریان درون حفره$(\mathrm{A.R}=1.5)$----------۷۶
شکل ۶-۱۶- خطوط جریان درون حفره$(A.R=2)$----------۷۶
شکل ۶-۱۷- خطوط جریان درون حفره $(\mathrm{A.R}=2.5)$----------۷۷
شکل ۶-۱۸- خطوط جریان درون حفره$(\mathrm{A.R}=3)$----------۷۷
شکل ۶-۱۹- خطوط جریان در نسبت دید ۱ ----------۷۸
شکل ۶-۲۰- خطوط جریان در نسبت دید ۱/ ۵----------۷۸
شکل ۶-۲۱- خطوط جریان در نسبت دید ۲ ----------۷۹
شکل ۶-۲۲- خطوط جریان در نسبت دید ۲/ ۵ ----------۷۹
شکل ۶-۲۳- خطوط جریان در نسبت دید ۳----------۸۰

فهرست جداول

جدول ۵-۱- پارامترهای انتقال حرارت در خروجی کانال در سه حالت تعداد حفره ها----------۵۱

جدول ۵-۲- میانگین دما و عدد ناسلت میانگین درون حفره ها----------۶۴

جدول ۶-۱- تغییرات آهنگ انتقال حرارت به جریان داخل کانال در رینولدزهای مختلف----------۷۲

جدول ۶-۲- تغییرات آهنگ انتقال حرارت ورودی به جریان و عدد ناسلت میانگین با تغییر نسبت دید حفره----------۸۱

فهرست علائم

نسبت دید	بی‌بعد	A.R
ظرفیت حرارتی	kj/kmol.k	c_p
انرژی داخلی	kj/kg	E
شتاب گرانش	m/s^2	g
عدد گراشف	بی بعد	Gr
آنتالپی	kj/kg	h
ارتفاع حفره	m	H
قابلیت هدایت حرارتی	w/m.k	k
پهنای حفره	m	L
طول خروجی کانال	m	L_e
جرم	kg	m
وزن مولکولی	kg/kmol	M
مؤلفه عمودی سطح	بی‌بعد	N
عدد ناسلت	بی‌بعد	Nu
فشار	pa	p
فشار بی‌بعد	بی‌بعد	P
فشار اصلاح شده	pa	$\bar{p}$
عدد پرانتل	بی‌بعد	Pr

آهنگ انتقال حرارت	w	q
ثابت گازها	kj/kmol.k	R
عدد رینولدز	بی‌بعد	Re
سطح بی‌بعد	بی‌بعد	s
دما	k	T
دمای سیال سرد ورودی	K	T_c
دمای سطح داغ کف حفره	k	T_H
سرعت ورودی	m/s	u_i
مؤلفه افقی بی‌بعد سرعت	بی‌بعد	U
مؤلفه عمودی بی‌بعد سرعت	بی‌بعد	V
مؤلفه عمودی سرعت	m/s	v
مؤلفه افقی بی‌بعد مختصات	بی‌بعد	X
مؤلفه عمودی بی‌بعد مختصات	بی‌بعد	Y

حروف یونانی

پخشندگی گرمایی	m^2/s	α
ضریب انبساط گرمایی حجمی	1/k	β
لزجت	kg/m.s	μ
لزجت سینماتیکی	m^2/s	ϑ
دمای بی‌بعد	بی‌بعد	θ
چگالی	kg/m^3	ρ

تنش برشی لایه مرزی	N/m^2	τ

زیرنویس ها

سیال سرد	c
خروجی	e
سیال گرم	H
سیال ورودی	i
بیشینه	max
کمینه	min
فشار ثابت	p
مرجع	ref

فصل اول

مقدمه

مقدمه

جریان روی حفره‌ها به خاطر ارتباط آن با کاربردهای مهندسی از جذابیت زیادی برخوردار است. این کاربردها عبارتند از: حفره‌های رسیورهای خورشیدی، محفظه‌های احتراق، جریان‌های روی نوک پره‌های توربین، جریان از میان کانال‌های شیاردار[۱و۲و۳] و سرد کردن اجزای الکترونیکی [۴]. بیشتر مطالعات انجام شده، فقط شامل جابجایی طبیعی یا جابجایی اجباری می‌شوند. ترکیب جابجایی اجباری و آزاد (جابجایی ترکیبی) از حفره‌های روباز، اگر چه غالباً در کاربردهای مهندسی با آن مواجه می‌شویم، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

به منظور نشان دادن ساختار جریان روی حفره، برخی محققان نتایج تجربی برای جریان آرام روی حفره‌های باز ارائه داده اند. این نتایج نشان می‌دهد که تعداد و شکل حباب‌های داخل حفره، تحت تأثیر شکل و نسبت دید حفره می‌باشند[۵]. حفره‌های کم‌عمق در تعداد زیادی از کاربردها، مخصوصاً در موانع باد در کلکتورهای خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این گونه مسائل فرض می‌شود که حفره با شار حرارتی ثابت از کف گرم می‌شود. جریان بر روی این گونه حفره‌ها به صورت آزمایشگاهی و عددی در حالتهای جریان لایه ای و درهم مورد مطالعه قرار گرفته است و برای موارد توربولنت تاثیر پارامترهایی نظیر نسبت دید حفره، میزان درهمی جریان پیش‌رونده و عدد رینولدز بر الگوهای جریان و دما بررسی شده است. [۱و۶]

کار تجربی در یک تونل باد با سطح مقطع مربع انجام شده است. هوا به مقطع مورد آزمایش وارد می‌شود که این هوا از یک فن سانتریفوژ فراهم می‌گردد که از طریق یک صفحه لانه‌زنبوری وارد می‌شود. دیواره پایینی حفره از یک صفحه آلومینیومی ساخته شده است که به‌صورت الکتریکی به‌وسیله یک نوار از نیکل کروم گرم می‌شود. هیتر الکتریکی در پشت صفحه آلومینیومی ثابت شده است و در یک قاب چوبی قرار گرفته است. شکاف بین صفحه و قاب از تمام جهات با یک لایه از پشم شیشه عایق شده است تا اتلافات حرارتی از حفره به بیرون به حداقل برسد. برای اندازه‌گیری دما تعداد زیادی ترموکوپل مسی در سطح

صفحه آلومینیومی نصب شده اند و این ترموکوپل‌ها با فواصل برابر زیر سطح صفحه در عمق ۰/۵ میلی‌متر جاسازی شده اند.

در قسمت آزمایشگاهی، ضریب فشار و عدد ناسلت در امتداد کف حفره اندازه‌گیری شده اند. در شبیه‌سازی عددی، معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی حل شده‌اند و مدل استاندارد k-ε برای محاسبه نوسانات درهمی استفاده شده است. هم در قسمت آزمایشگاهی و هم در قسمت عددی، اثر تغییر نسبت دید حفره و تغییر عدد رینولدز، مورد مطالعه قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که برای نسبت دید[۱]های کمتر از ۷ گردابه‌های ممتد شکل می‌گیرد. هنگامی که نسبت دید افزایش می‌یابد، جریان با کف حفره برخورد می‌کند و این برخورد باعث می‌شود دو گردابه بوجود آید. یکی در قسمت بالا دست جریان داخل حفره و دیگری در قسمت پایین دست جریان. عدد ناسلت محلی در امتداد کف حفره به طور عمده به‌وسیله ساختار جریان داخل حفره تحت تأثیر قرار می‌گیرد و عدد ناسلت میانگین با افزایش نسبت دید (تا بالای ۱۰) و افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد[۱].

عده‌ای از محققان[۷]جابجایی ترکیبی درون حفره را با حالت‌های مختلف محل قرارگیری منبع حرارتی در آن بررسی کرده‌اند. فرض شده است که یک منبع حرارتی در یکی از دیواره‌های حفره قرار گرفته باشد و سه حالت مختلف گرمایشی برای آن فرض می‌شود که مربوط به محل قرار گرفتن منبع حرارتی در سه دیواره مختلف حفره (چپ، راست و پایین) می‌باشد. این تحلیل برای بازه ای از اعداد ریچاردسون و نسبت دیدهای حفره انجام شده است. نتایج نشان داده است که اختلاف قابل توجهی بین این سه مد مختلف گرمایشی وجود دارد.

وقتی منبع حرارتی در دیواره سمت راست قرار دارد، در مقایسه با دو مد دیگر بیشترین نرخ انتقال حرارت را دارد. علاوه بر این وقتی که منبع حرارتی در کف حفره قرار گرفته باشد، میدان جریان درون حفره با نسبت دید ۲ برای عدد ریچاردسون ۱۰ ، یک رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان

[۱] Aspect ratio