

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

۸۷/۱/۰۷۰۶۸

۸۷/۱۲/۱۱



دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

بررسی انتقال حرارت پایدار

در یک آرایه از لوله گرمائی میکرو (Micro Heat-pipe)

توسط

علی زاهدی نژاد

استاد راهنما

دکتر علی اکبر گلشن

۱۳۸۷/۱۱/۰۱

استاد راهنما
دکتر علی اکبر گلشن

شهریور ماه ۱۳۸۷

۱۰۸۹۰۳

به نام خدا

بررسی انتقال حرارت پایدار
در یک آرایه از لوله گرمایی میکرو (Micro Heat-Pipe)

به وسیله ی:

علی زاهدی نژاد

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی
از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ی:

مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر علی اکبر گلنشان، استادیار بخش مهندسی مکانیک (رئیس کمیته)

دکتر خسرو جعفرپور، دانشیار بخش مهندسی مکانیک

دکتر امید ابوعلی، استادیار بخش مهندسی مکانیک

شهریور ماه ۱۳۸۷

سپاسگزاری

اکنون که به یاری خدا این پایان نامه به انجام رسیده، بر خود لازم می دانم از پشتیبانی، توجه، راهنمایی، زحمات و همکاری های ارزشمند استاد ارجمند، جناب آقای دکتر علی اکبر گلنشان، که همواره نهایت تلاش خود را در اتمام این پایان نامه نمودند، صمیمانه قدر دانی و سپاسگزاری نمایم. همچنین لازم می دانم، از ایشان بخاطر دقت در انتخاب موضوع، در اختیار قرار دادن کتابهای ارزشمند و ارائه راهنمایی های کلیدی که در پیشبرد مراحل دشوار پایان نامه بسیار ارزشمند واقع شده است، صمیمانه تشکر نمایم و برای ایشان توفیق الهی را از خداوند متعال خواهانم.

بر خود لازم می دانم از همکاری، دقت نظر و زحمات ارزشمند اساتید مشاور محترم، جناب آقای دکتر خسرو جعفرپور و جناب آقای دکتر امید ابوعلی، که در تمامی مراحل انجام پایان نامه، همواره با لطف و توجه ما را یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدر دانی نمایم. همچنین لازم می دانم، از ایشان بخاطر توجه و ارائه راهنمایی های مؤثر، صمیمانه تشکر نمایم و برای ایشان توفیق الهی را از خداوند متعال خواهانم.

بطور یقین مقالات و آدرسهای اینترنتی ارزشمندی که جناب آقای دکتر س.ب. سبحان از انستیتو پلی تکنیک رنسیلر (امریکا)، در اختیار من قرار دادند، باعث دلگرمی و امید به انجام این پایان نامه شد و توجه ایشان را عامل مهمی در به ثمر رسیدن تلاشهای انجام شده در این پایان نامه می دانم. همچنین لازم می دانم از اساتید محترم، جناب آقای دکتر محمد هادی اکبری، جناب آقای دکتر همایون امداد و جناب آقای دکتر شهرام جعفری که اطلاعات ارزشمندی را در زمینه های مختلف در اختیار من قرار دادند، تشکر و قدردانی نمایم. در انتها از زحمات بی وقفه پدر، مادر و برادرانم سعید و پرهام که در تمام مراحل زندگی همواره راهنمای من بوده اند، تشکر و قدر دانی خود را اعلام نموده و برای ایشان آرزوی موفقیت و سلامت دارم.

چکیده

بررسی انتقال حرارت پایدار در یک آرایه از لوله گرمائی مایکرو (Micro Heat-Pipe)

به وسیله ی:

علی زاهدی نژاد

در این پایان نامه، با استفاده از روش عددی، انتقال حرارت در نواحی جامد یک "Micro heat-pipe" بررسی شده و نرخ انتقال حرارت شعاعی در دیوارهای "Micro heat-pipe"، با استفاده از اطلاعات تجربی موجود که مربوط به اندازه گیری دما در دیوارهای "Micro heat-pipe" هستند، بدست آمده است. انتقال حرارت و جریان سیال درون "Micro heat-pipe" ها توسط یک مدل عددی یک بعدی پیشگونی شده و مشخصات انتقال حرارتی سیال دوفازی، بدست آمده اند. مدل عددی یک بعدی به گونه ای است که شعاع انحنای در سطح مشترک هلالی مایع-بخار، توزیع سرعت محوری، توزیع فشار و شار گرمی ناشی از فرایندهای چگالش و تبخیر قابل محاسبه باشد. همچنین اثرات لزجت سیال، وابستگی خواص ترموفیزیکی سیال کاری با دما، اصول ترمودینامیکی تغییر فاز و اثرات تغییرات دانسیته در فاز بخار، در آن در نظر گرفته شده اند. بعلاوه با استفاده از روابط تجربی، اثر انتقال منتم در اصطکاک بین فازها در مدل عددی منظور شده است. فاز مایع تراکم ناپذیر فرض شده و در فاز بخار، ارتباط افت فشار، دانسیته، دما و فشار اشباع، با در نظر گرفتن معادله حالت و اصل بقا جرم، مدلسازی گردیده است. با استفاده از این مدل یک بعدی، توزیع سرعت محوری در فازهای مایع و بخار بصورت خطی بدست آمده است. بعلاوه منحنی های بدون بعد توزیع فشار در هر دو فاز مایع و بخار، مشابهت بسیار خوبی با نتایج مدل های عددی که تا کنون ارائه شده اند، داشته است. اصلاحات انجام شده نسبت به مدل های یک بعدی دیگر بصورتی است که حل معادله لاپلاس-پانگ که منجر به یک مسئله مرز آزاد می شود، با اصل بقا جرم سازگار باشد. همچنین نرخ انتقال جرم در فرایندهای تبخیر و چگالش، با در نظر گرفتن انتقال حرارت هدایت محوری، بصورت دقیقتری محاسبه شده است. بعلاوه، انتقال حرارت هدایت محوری در یک ناحیه باریک جامد در اطراف "Micro heat-pipe" مدلسازی شده است. اطلاعات تجربی می تواند بصورت شرایط مرزی در دیوار خارجی ناحیه باریک جامد بکار رود تا با مدل عددی یک بعدی کوپل شود. علاوه بر تصحیحات انجام شده، مدل عددی یک بعدی قادر است بطور دقیق موقعیت نواحی مختلف یک "Micro heat-pipe" (بخشهای تبخیر کننده، آدیاباتیک و چگالنده) را مشخص سازد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱-۱- معرفی "heat-pipe"
۳	۱-۱-۱- مزیتها و معایب "heat-pipe" در مقایسه با جامدهای رسانا
۳	۲-۱-۱- انتخاب سیال کاری برای یک "heat-pipe"
۴	۳-۱-۱- اثر متقابل بین پدیده های اصلی در یک "heat-pipe"
۴	۲-۱- معرفی "micro heat-pipe"
۵	۱-۲-۱- کاربرد "micro heat-pipe"
۷	۲-۲-۱- موقعیت "micro heat-pipe" در صنعت الکترونیک در جهان
۹	۳-۲-۱- اهمیت "micro heat-pipe" در خنکسازی قطعات الکترونیکی
۹	۴-۲-۱- سایر کاربردهای "micro heat-pipe"
۱۰	۵-۲-۱- محدودیتهای "micro heat-pipe"
۱۰	۱-۵-۲-۱- حد پیوستگی بخار
۱۱	۲-۵-۲-۱- حد جوشش
۱۲	۳-۵-۲-۱- حد موئینگی
۱۴	۴-۵-۲-۱- حد لزجت
۱۴	۵-۵-۲-۱- حد صوتی
۱۵	۶-۵-۲-۱- حد مقاومت اصطکاکی
۱۶	۳-۱- جایگاه "heat-pipe" در میان روشهای خنکسازی که در صنعت الکترونیک استفاده می شوند
۱۶	۱-۳-۱- طرحهای خنکسازی قطعات الکترونیکی
۱۶	۱-۱-۳-۱- خنکسازی یک طرفه
۱۶	۲-۱-۳-۱- خنکسازی دوطرفه
۱۶	۳-۱-۳-۱- خنکسازی درونی
۱۷	۲-۳-۱- روشهای خنکسازی قطعات الکترونیکی
۱۸	۳-۳-۱- ارزیابی روشهای خنکسازی قطعات الکترونیکی
۲۰	۴-۳-۱- ارزیابی سایر روشهای خنکسازی قطعات الکترونیکی
۲۱	۱-۴-۳-۱- تجهیزات تبرید
۲۱	۲-۴-۳-۱- خنکسازی "Thermionic"
۲۱	۳-۴-۳-۱- انتقال حرارت هدایت با استفاده از قطعات جامد کار گذاشته شده
۲۲	۴-۱- انواع آرایه های "micro heat-pipe"

۲۲	۱-۴-۱- آرایه هائی که سطح مقطع مثلثی، مستطیلی و یا ذوزنقه ای دارند
۲۳	۲-۴-۱- آرایه های انحنای دار
۲۳	۳-۴-۱- آرایه هائی که از رشته های باریک تشکیل شده اند
۲۴	۴-۴-۱- آرایه های انعطاف پذیر
۲۵	۵-۴-۱- آرایه هائی که از لایه پلیمر تشکیل شده اند
۲۵	۶-۴-۱- آرایه هائی از "micro heat-pipe" که شیارهای شعاعی دارند
۲۶	۵-۱- فرایند حک کاری برای ایجاد آرایه های "micro heat-pipe"
۲۷	۱-۵-۱- سیلیکان و دی-اکسید سیلیکان به عنوان مواد اصلی در فرایند حک کاری
۲۷	۲-۵-۱- فرایند حک کاری مرطوب
۲۸	۳-۵-۱- فرایند حک کاری خشک
۲۹	۶-۱- معیارهای عملکرد "micro heat-pipe"
۳۰	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته و اهداف پژوهش حاضر
۳۱	۱-۲- شروع علم "heat-pipe"
۳۱	۲-۲- تاریخچه "MHP"
۳۳	۳-۲- بررسی های آزمایشی که در زمینه "MHP" انجام شده اند
۳۳	۱-۳-۲- آزمایش برای بررسی تأثیر رگه های ایجاد شده در سیلیکان، در حالتی که سیال کاری آب، اتانول یا متانول بوده است
۳۶	۲-۳-۲- آزمایش به منظور مقایسه عملکرد آرایه های "MHP" که از دوروش ماشینکاری و حک کاری لایه سیلیکان حاصل شده اند
۳۹	۳-۳-۲- آزمایش به منظور مشاهده حرکت سیال دو فازی و اندازه گیری دما در طول "MHP"
۴۲	۴-۲- بررسی های عددی که در زمینه "MHP" انجام شده اند
۴۲	۱-۴-۲- بررسی های عددی یک بعدی
۴۳	۱-۱-۴-۲- بررسی عددی یک بعدی که توسط "Longtin" در [۱۷] ارائه شده است
۴۳	۲-۱-۴-۲- بررسی عددی یک بعدی که در [۱۵] و [۱۸] توسط "Sobhan" ارائه شده است
۴۶	۳-۱-۴-۲- سایر بررسی های عددی یک بعدی که روی سطح مقطع های مختلف "MHP" انجام شده است
۵۰	۲-۴-۲- بررسی های عددی دو بعدی
۵۰	۱-۲-۴-۲- بررسی ضریب انتقال حرارت تبخیر در بخش تبخیر کننده
۵۲	۲-۲-۴-۲- بررسی های انجام شده در محاسبه دمای سطح مشترک T_i
۵۴	۳-۲-۴-۲- ضریب انتقال حرارت چگالش در بخش چگالنده
۵۴	۳-۴-۲- بررسی های عددی سه بعدی
۵۵	۵-۲- بررسی های تحلیلی که در زمینه "MHP" انجام شده اند

۵۵	۲-۵-۱- محاسبه نرخ تبخیر بر اساس تغییرات فشار و دما در سطح مشترک دو فاز
۵۷	۲-۵-۲- محاسبه نرخ تبخیر بر اساس دمای سطح مشترک
۵۸	۲-۵-۳- بررسی تحلیلی برای تعیین مقدار بهینه سیال درون "MHP"
۵۹	۲-۵-۴- بررسی تحلیلی به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت چگالش در بخش چگالنده "MHP"
۶۱	۲-۵-۵- بررسی های انجام شده در ارتباط با اصل ناپیوستگی فشار
۶۲	۲-۶- اهداف پژوهش حاضر

فصل سوم: معادلات حاکم

۶۳	
۶۴	۳-۱- اهمیت معادلات حاکم
۶۵	۳-۲- روش مرجع [۱۵] در معادلات حاکم
۶۷	۳-۳- روش حل معادلات حاکم در [۱۸]
۶۸	۳-۴- فرم تصحیح شده معادلات حاکم یک بعدی
۶۹	۳-۴-۱- معادلات مکمل
۶۹	۳-۴-۲- معادلات کمکی
۷۰	۳-۵- معادلات حاکم در روش عددی سه بعدی
۷۱	۳-۶- روش حل معادلات حاکم یک بعدی
۷۲	۳-۶-۱- مجزاسازی معادله ممنتم
۷۵	۳-۶-۱-۱- بررسی قواعد کلی در مجزاسازی معادله ممنتم
۷۶	۳-۶-۲- مقایسه حل عددی معادله ممنتم و حل تحلیلی آن
۷۶	۳-۶-۲-۱- مقایسه نتایج در حالتی که "Source term" برابر صفر باشد
۷۹	۳-۶-۲-۲- مقایسه نتایج در حالتی که "Source term" صفر نباشد و فواصل گره های شبکه تغییر کند
۸۰	۳-۶-۳-۱- مقایسه نتایج در حالتی که "Source term" یک تابع خطی از متغیر ϕ باشد
۸۰	۳-۶-۳- استفاده از الگوریتم "SIMPLE" به منظور کوپلینگ سرعت و فشار
۸۱	۳-۶-۳-۱- معادلات تصحیح سرعت و تصحیح فشار
۸۳	۳-۶-۳-۲- مجزاسازی معادله انرژی فازهای مایع و بخار
۸۷	۳-۶-۳-۳- ارزیابی نتایج حل معادله انرژی فاز مایع
۸۷	۳-۶-۳-۴- معادله انرژی "TFM"
۸۸	۳-۶-۳-۵- مجزاسازی معادله انرژی "TFM"
۸۹	۳-۶-۳-۶- مجزاسازی معادله انرژی یک بعدی ناحیه جامد
۹۱	۳-۶-۳-۷- الگوریتم حل معادلات حاکم

فصل چهارم: نتایج مدلسازی عددی

۹۸	
۹۹	۴-۱- نتایج بررسی عددی یک بعدی آرایه "MHP"

۹۹	۱-۱-۴- مقایسه نتایج مدلسازی عددی یک بعدی "MHP"، با نتایج آزمایشی که در بخش (۲-۳-۱) شرح داده شده است
۱۰۴	۲-۱-۴- مقایسه نتایج، با نتایج روش عددی یک بعدی که در [۱۵] و [۱۸] ارائه شده است
۱۱۲	۳-۱-۴- نتایجی که تشکیل شدن ناحیه آدیاباتیک را در "MHP"، نشان داده اند
۱۱۷	۴-۱-۴- بررسی تأثیر رسانائی گرمائی جامد در توزیع دما و انتقال حرارت در آرایه "MHP"
۱۱۸	۵-۱-۴- بررسی اثر تغییر پارامترهای فیزیکی وابسته به دما در انتقال حرارت و جریان سیال درون "MHP"
۱۲۴	۶-۱-۴- بررسی تأثیر گرمای نهان تبخیر، h_{fg} ، در انتقال حرارت و جریان سیال درون "MHP"
۱۲۶	۲-۴- بررسی اثر تقویت رسانائی حرارتی جسم جامد، در توزیع دما در آن
۱۳۰	۳-۴- بررسی عددی سه بعدی انتقال حرارت در یک آرایه "MHP" و مقایسه نتایج با آزمایشی که در بخش (۲-۳-۲) شرح داده شده است
۱۳۰	۱-۳-۴- مشخصات هندسی و مواد بکار رفته در آرایه "MHP"
۱۳۲	۲-۳-۴- شرایط مرزی
۱۳۳	۳-۳-۴- اطلاعاتی که در آزمایش بدست آمده اند
۱۳۴	۴-۳-۴- هندسه مدل و خصوصیات شبکه
۱۳۵	۵-۳-۴- خصوصیات انتقال حرارتی مواد جامد
۱۳۵	۶-۳-۴- بررسی آرایه در حالتی که درون "MHP" ها سیال کاری قرار نداشته باشد
۱۳۶	۷-۳-۴- انطباق اطلاعات عددی بر نتایج آزمایشی برای تعیین پارامترهای مجهول
۱۳۹	۸-۳-۴- بررسی توزیع دما در مناطق مختلف آرایه "MHP" با در نظر گرفتن سیال کاری درون آن
۱۴۳	۹-۳-۴- محاسبه انتقال حرارت تابش از سطح شیشه
۱۴۴	۱۰-۴-۴- مدلسازی عددی یک بعدی جریان و انتقال حرارت درون "MHP" ها
۱۴۸	۱۱-۴-۴- موانع و مشکلات در مدلسازی عددی سه بعدی جریان درون "MHP" ها
۱۵۰	۴-۴- نتیجه گیری
۱۵۲	۵-۴- پیشنهادات
۱۵۳	پیوستها
۱۵۴	پیوست (۱): معرفی و اثبات روشهای عددی که مورد استفاده قرار گرفته اند
۱۶۱	پیوست (۲): اصول ترمودینامیکی تغییر فاز
۱۶۶	پیوست (۳): محاسبه ضرایب هندسی سطح، بر اساس اتحنای سطح مشترک مایع-بخار
۱۷۳	پیوست (۴): اثبات معادلات حاکم
۲۰۴	پیوست (۵): مدل عددی "TFM"
۲۱۰	پیوست (۶): مدلسازی عددی فرایند متعادل شدن فشار بخار اشباع، در محفظه محصور "MHP"
۲۱۶	پیوست (۷): محاسبه سرعت سیال، در سطح مشترک فازهای مایع و بخار
۲۲۰	پیوست (۸): تأثیر کیفیت شبکه در نتایج حل عددی یک بعدی

۲۲۶	پیوست (۹): محاسبه ضریب انتقال حرارت شعاعی
۲۲۸	پیوست (۱۰): ضریب انتقال حرارت جابجائی بین فازها
۲۳۰	پیوست (۱۱): روشهای محاسبه ترمهای اصطکاکی، در معادلات ممنت
۲۴۰	پیوست (۱۲): روشهای بکار رفته در کنترل همگرایی حل
۲۴۶	پیوست (۱۳): انتقال اطلاعات بین نرم افزارهای FLUENT و MATLAB

فهرست منابع

فهرست جدول ها

شماره عنوان	صفحه
۱-۲ مشخصات آرایه های "MHP".	۳۳
۱-۳ مراحل حل معادلات حاکم در [۱۸].	۶۷
۲-۳ تعریف متغیرهایی که در معادله ممنتم بکار رفته اند.	۷۲
۳-۳ تعریف متغیرهایی که در معادله ممنتم بکار رفته اند.	۸۴
۴-۳ مراحل حل معادلات حاکم.	۹۵
۱-۴ خواص ترموفیزیکی اتانول در محدوده دمایی $50^{\circ}C$ تا $150^{\circ}C$.	۱۰۰
۲-۴ ابعاد آرایه "MHP" که در [۱۵] و [۱۸] ارائه شده اند.	۱۰۴
۳-۴ خواص ترموفیزیکی آب در فشار اتمسفر.	۱۱۹
۴-۴ حرارت عبور کرده از مقطع عمودی $x = 2.5 \text{ mm}$ ، از جسم جامد مسطح و جسم جامد درون آن. علامت منفی، بیانگر راستای منفی x برای انتقال حرارت (خالص) از سطوح است.	۱۲۹
۵-۴ ابعاد دامنه محاسباتی.	۱۳۱
۶-۴ نام مرزها و شرایط مرزی گرمایی آنها.	۱۳۳
۷-۴ خصوصیات مواد جامد، که در ساختار آرایه مورد استفاده قرار گرفته اند.	۱۳۵
پ-۸-۱ ارتباط متغیرها در شبکه تطبیق یافته و شبکه اولیه.	۲۲۴
پ-۱۱-۱ شرایط مرزی برای جریان دو بعدی که در شکل (پ-۱-۱) نشان داده شده است.	۲۳۳
پ-۱۱-۲ شرایط مرزی برای جریان دو بعدی که در شکل (پ-۱-۱) نشان داده شده است.	۲۳۴
پ-۱۱-۳ شرایط مرزی برای سرعت سطح آزاد مایع.	۲۳۵

فهرست شکل ها

صفحه	شماره عنوان	
۲	۱-۱	طرح عمومی یک "heat-pipe" [۱].
۴	۲-۱	اثر متقابل بین پدیده های اصلی در "micro heat-pipe" [۲].
۵	۳-۱	طرح کلی "micro heat-pipe" با سطح مقطع مثلثی. ناحیه تماس مایع-جامد با w و ناحیه تماس مایع-بخار با h نشان داده شده [۱].
۶	۴-۱	نواحی مختلف مایعی که روی دیوار جامد "micro heat-pipe" توسعه یافته است. در این شکل، بخشی از یک مقطع عرضی "micro heat-pipe" نشان داده شده است [۴].
۷	۵-۱	جریان "Thermocapillary" [۴].
۸	۶-۱	بیشترین و کمترین شار گرمایی که در سالهای مختلف از تراشه های "high performance" برداشته شده است [۵].
۱۰	۷-۱	استفاده از "micro heat-pipe" در سیستم بازیافت گرما در فضاپیماي "Transhab" [۶].
۱۱	۸-۱	طرح جریان در بخشهای تبخیر کننده (a)، آدیاباتیک (b) و چگالنده (c) یک "micro heat-pipe" که گرما از لبه سمت چپ به آن منتقل شده است [۸].
۱۷	۹-۱	طرحها مختلفی که در خنکسازی قطعات الکترونیکی بکار می روند. خنکسازی درونی (شکل سمت راست)، خنکسازی دو طرفه (شکل وسط) و خنکسازی یک طرفه (شکل سمت چپ) [۹].
۱۷	۱۰-۱	محدوده شار گرما در روشهای رایج انتقال حرارت [۹].
۱۹	۱۱-۱	موقعیت و نسب سیستم خنکسازی در یک "Gamer PC" که با یک "CPU" و تراشه های "dual GPU" کار می کند. در شکل سمت چپ تجهیزاتی که در سیستم گردش مایع بکار رفته، نشان داده شده است [۱۱].
۲۰	۱۲-۱	خنکسازی یک وسیله الکتریکی با استفاده از یک "heat-pipe" [۹].
۲۱	۱۳-۱	اجزاء وسیله "Thermionic" [۹].
۲۲	۱۴-۱	کار گذاشتن قطعات نازک جامد، بین لایه های قطعات الکترونیکی تولید کننده گرما [۹].
۲۳	۱۵-۱	نمونه ای از آرایه "micro heat-pipe" با سطح مقطع مستطیلی. این آرایه در داخل یک لوله گرمایی ایجاد شده است [۹].
۲۳	۱۶-۱	آرایه های انحنادار [۹].
۲۴	۱۷-۱	ساختار آرایه انعطاف پذیری که از رشته های باریک تشکیل شده است. جزئیات این آرایه "micro heat-pipe" در تصویر سمت چپ نشان داده شده است [۱۲].
۲۵	۱۸-۱	دو طرح مختلف از "micro heat-pipe" هائی که از یک لایه پلیمر تشکیل شده اند. شیارهای مستطیلی در شکل سمت راست و شیارهای مثلثی در شکل سمت چپ نمایش داده شده اند [۱۲].
۲۶	۱۹-۱	ساختار لایه های تشکیل دهنده یک آرایه شعاعی "micro heat-pipe".
۲۶	۲۰-۱	عملکرد ایده آل "micro heat-pipe" هائی که شیار شعاعی دارند [۹].

شماره عنوان	صفحه
۲۱-۱	مراحل اصلی تکنولوژی حک کاری. (a) مرحله تابش اشعه X، (b) ایجاد طرح مورد نظر در لایه "Photoresist"، (c) ایجاد طرح در لایه پوشاننده، (d) حک کاری "isotropic"، (e) و (f) حک کاری "anisotropic" [۱۳].
۲۸	
۲۲-۱	حک کاری پلاسما در سطح زاویه دار. (a) شیار اکسید شده، نسبت به بردار عمود بر صفحه $\langle 001 \rangle$ در زاویه 54.7° درجه قرار دارد. (b) بعد از حک کاری دی-اکسید سیلیکان، تنها بخشهایی از دی-اکسید سیلیکان که در راستای بمباران یونی قرار گرفته اند، حک کاری شده اند. در تصویر سمت راست، صفحات بلور سیلیکان مشخص شده اند [۱۳].
۲۹	
۱-۲	سطح مقطع مثلثی "MHP" در طرح اول [۱۳].
۳۴	
۲-۲	تأثیر حضور و عدم حضور سیال کاری در "MHP"، بر توزیع دمای محوری "substrate". نواحی که با رنگ روشن مشخص شده اند، بیانگر محدوده حضور "MHP" می باشند. شار گرمای ورودی برابر 2 W است و راستای محوری با z نشان داده شده است [۱۳].
۳۴	
۳-۲	سطح مقطع مثلثی کانالها در طرح سه لایه ای. سطح مقطع رگه ها بصورت مثلثهای کوچکی است که در پائین ترین لایه قرار می گیرند [۱۳].
۳۵	
۴-۲	سطح مقطع مستطیلی ماشینکاری شده (تصویر سمت راست) و سطح مقطع مثلثی که از فرایند حک کاری بدست آمده است (تصویر سمت چپ) [۱۵].
۳۷	
۵-۲	نمایش دو نمای مختلف از تجهیزات آزمایشی [۱۵].
۳۷	
۶-۲	رسم نتایج آزمایشی که دمای محوری لایه سیلیکان را در حالت دائمی نشان می دهند. سیال کاری متانول بوده است. دمای چاه حرارتی 15°C درجه سانتیگراد بوده است و توان ورودی 4 W در نظر گرفته شده است [۱۵].
۳۸	
۷-۲	رسم نتایج آزمایشی که رسانائی گرمائی مؤثر لایه سیلیکان را در حالت دائمی برای شار گرمای ورودی نشان می دهند. سیال کاری متانول بوده است. دمای چاه حرارتی 15°C درجه سانتیگراد بوده است [۱۵].
۳۸	
۸-۲	سطح مقطع مثلثی "MHP" که با استفاده از یک لایه نازک نیتريد پوشانده شده است [۸].
۳۹	
۹-۲	طرح آرایه "MHP" و تصویر واقعی آن. به منظور نصب تجهیزات اندازه گیری، عرض لایه شیشه نسبت به عرض لایه سیلیکان بیشتر است [۱۶] و [۸].
۴۰	
۱۰-۲	سطح مقطع طرح اصلاح شده برای آرایه "MHP" [۱۶].
۴۱	
۱۱-۲	تغییرات دما نسبت به گرمای ورودی. منبع تولید حرارت در لبه ابتدائی "MHP" ها قرار گرفته است و دمای محیط (بر حسب کلوین) با T_0 نشان داده شده [۱۶].
۴۲	
۱۲-۲	شرایط مرزی حرارتی، برای آرایه "MHP" (تصویر سمت راست) و نمایش بخشی از سطح مقطع آرایه (تصویر سمت چپ). سطح مقطع "MHP" ها به شکل مثلث متساوی الاضلاع است [۱۵].
۴۴	
۱۳-۲	سرعت فازهای مایع (تصویر سمت راست) و بخار (تصویر سمت چپ)، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج مربوط به شار گرمای ورودی 2.5 W/cm^2 و ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند [۱۸].
۴۵	

شماره عنوان	صفحه
۱۴-۲	سرعت بدون بعد شده فازهای مایع (تصویر سمت راست) و بخار (تصویر سمت چپ)، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج مربوط به شار گرمای ورودی $2/5 \text{ W/cm}^2$ و ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 \text{ W/m}^2\text{-K}$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند. [۱۵]
۱۵-۲	توزیع دمای محوری (تصویر سمت راست) و توزیع فشار (تصویر سمت چپ) در فازهای مایع و بخار، در حالت دائمی، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج مربوط به شار گرمای ورودی $2/5 \text{ W/cm}^2$ و ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 \text{ W/m}^2\text{-K}$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند [۱۸].
۱۶-۲	توزیع دمای محوری (تصویر سمت راست) و توزیع شعاع انحنای سطح مشترک هلالی فازهای مایع و بخار (تصویر سمت چپ)، در حالت دائمی، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج مربوط به شار گرمای ورودی $2/5 \text{ W/cm}^2$ (برای تصویر سمت چپ) و ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 \text{ W/m}^2\text{K}$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند [۱۵].
۱۷-۲	تغییرات رسانائی گرمائی مؤثر (بدون بعد) "MHP" با شار گرمای ورودی (تصویر سمت راست) و ضریب انتقال حرارت جابجائی، در بخش چگالنده "MHP" (تصویر سمت چپ). این نتایج مربوط به ضریب انتقال حرارت جابجائی $160 \text{ W/m}^2\text{-K}$ در بخش چگالنده "MHP" (برای تصویر سمت راست) و شار گرمای ورودی $4/5 \text{ W/cm}^2$ (برای تصویر سمت چپ) می باشند [۱۵].
۱۸-۲	توزیع فشار مایع و بخار در یک "MHP" با سطح مقطع چهار ضلعی. در حالت دائمی اختلاف فشار بین فازها در ابتدای تبخیر کننده "MHP" در حدود 500 Pa است [۱۹].
۱۹-۲	تغییرات مساحت سطح مقطع جریانهای مایع و بخار (تصویر سمت راست) و توزیع فشار آنها (تصویر سمت چپ)، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج، برای حالت دائمی هستند و مربوط به یک "MHP" است که سطح مقطع دوزنقه ای دارد [۲۰].
۲۰-۲	تغییرات شعاع سطح مشترک مایع-بخار در حالت بدون بعد (تصویر سمت راست) و توزیع فشار در فاز مایع (تصویر سمت چپ)، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج برای حالت دائمی هستند و مربوط به دو "MHP" مشابه با شکل سطح مقطع مستطیلی و مثلثی می باشند [۲۱].
۲۱-۲	تأثیر ناحیه آدیباتیک در توزیع سرعت محوری فاز مایع (تصویر سمت راست) و فاز بخار (تصویر سمت چپ)، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج، برای حالت دائمی هستند و مربوط به یک "MHP" با شکل سطح مقطع مثلثی می باشند [۲۱].
۲۲-۲	تأثیر زاویه تماس در توزیع محوری شعاع سطح مشترک مایع-بخار در مقابل طول بدون بعد شده "MHP" (تصویر سمت راست). در تصویر سمت چپ، شار حرارت در دیوار "MHP"، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP" رسم شده است [۲۱].
۲۳-۲	تأثیر تغییرات (پنج درصدی) ضریب لزجت سیال (تصویر سمت راست) و کشش سطحی سیال (تصویر سمت چپ)، در شعاع بدون بعد شده سطح مشترک مایع-بخار [۲۲].
۲۴-۲	توزیع فشار در فازهای مایع و بخار (تصویر سمت راست) و توزیع شعاع انحنای سطح مشترک هلالی فازهای مایع و بخار (تصویر سمت چپ)، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج برای حالت دائمی هستند و مربوط به یک "Wire bonded MHP" می باشند [۲۳].

شماره عنوان	صفحه
۲۵-۲ توزیع سرعت محوری در فاز بخار (تصویر سمت راست) و توزیع دما در آرایه "MHP" (تصویر سمت چپ)، در مقابل طول بدون بعد شده "MHP". این نتایج برای حالت دائمی هستند و مربوط به یک "Wire bonded MHP" می باشند [۲۳].	۵۰
۲۶-۲ هندسه شیار و نواحی مختلف لایه مایع [۲۴].	۵۱
۲۷-۲ ضریب انتقال حرارت جابجائی و دمای دیوار بیرونی، در راستای محوری شیار [۲۴].	۵۱
۲۸-۲ هندسه دو بعدی که توسط "Stephan" و "Busse" بررسی شده است.	۵۲
۲۹-۲ منحنی ضخامت لایه مایع، شار گرما (در دیوار "MHP") و دمای سطح مشترک در "micro region" [۲۵].	۵۳
۳۰-۲ خطوط دما ثابت در دیوار لوله گرمائی میکرو و در فاز مایع. شکل (b) برای حالت $T_{iv} = T_{sat}$ و انحنای ثابت سطح مشترک رسم شده است (اختلاف دما بین دو خط دما ثابت برابر $0.202 K$ است) [۲۵].	۵۳
۳۱-۲ مدل دو بعدی به منظور محاسبه عدد ناسلت متوسط در چگالنده "MHP" [۲۶].	۵۴
۳۲-۲ مقننار بهینه مایع درون "MHP" به عنوان تابعی از توان ورودی. دمای کارکرد $380 K$ بوده است [۳۰].	۵۸
۳۳-۲ چگالش بخار اشباع در میکرو کانال مثلثی [۳۱].	۵۹
۳۴-۲ طرح بکار رفته برای لایه مایع در مرجع [۳۱].	۵۹
۳۵-۲ تغییرات متوسط ضریب انتقال حرارت در هر سطح مقطع، در طول کانال [۳۱].	۶۱
۳۶-۲ دانسیته لایه نازک آرگون (مایع) در دمای کاهش یافته برابر با 0.157 [۳۲].	۶۲
۱-۳ نمایش حجم کنترل سرعت و حجم کنترل اسکالر. در شبکه "Staggered".	۷۳
۲-۳ حجم کنترل سرعت، پیرامون نقطه P.	۷۳
۳-۳ جریان یک بعدی با سرعت ثابت u.	۷۶
۴-۳ شبکه سرعت با حجم کنترلهای مساوی.	۷۶
۵-۳ مقایسه نتایج حل عددی با حل تحلیلی در یک حالتی که "source term" صفر باشد.	۷۸
۶-۳ مقایسه نتایج حل عددی با حل تحلیلی. تعداد گره های شبکه سرعت برابر ۳۰ انتخاب شده.	۷۹
۷-۳ مقایسه نتایج روش عددی "MATLAB" با روش عددی حل معادله ممنتم. گره های شبکه با فواصل مساوی انتخاب شده اند و تعداد گره های شبکه سرعت برابر ۱۵۰ است.	۸۰
۸-۳ حلقه تکرار الگوریتم "SIMPLE".	۸۱
۹-۳ نتایج حل معادله انرژی برای فاز مایع در یک شبکه با فواصل مساوی. تعداد تکرارهای حل برابر ۵ بوده است.	۸۷
۱۰-۳ الگوریتم حل معادلات حاکم در حالتی که معادله انرژی در ناحیه جامد توسط "MATLAB" بررسی شده است. شماره گذاری ها براساس جدول است (۳-۴).	۹۳
۱۱-۳ الگوریتم حل معادلات حاکم و انتقال اطلاعات بین MATLAB و FLUENT. شماره گذاری ها براساس جدول است (۳-۴).	۹۴
۱-۴ تأثیر حضور و عدم حضور سیال کاری در "MHP"، بر توزیع دمای محوری "substrate". شار گرمای ورودی برابر $2 W$ است.	۱۰۱

صفحه	شماره عنوان
۱۰۱	۲-۴ رسم باقیمانده ها در طول تکرارهای حل. باقیمانده معادله لاپلاس-یانگ، τ ، با علامت مثلث مشخص شد. بعد از سی تکرار، روش کنترل همگرایی، اعمال شده است.
۱۰۲	۳-۴ سرعت تبخیر و چگالش در سطح مشترک فازها. شار حرارتی که از دیوار "Substrate" انتقال یافته، در شکل پائینی رسم شده است.
۱۰۲	۴-۴ سرعت محوری فازهای مایع و بخار. شار حرارتی که از دیوار "Substrate" انتقال یافته، در شکل پائینی رسم شده است.
۱۰۳	۵-۴ مقایسه شار حرارت در دیوار یک "MHP" نسبت به شار حرارت در دیوار بیرونی سیلیکان. نواحی تبخیر کننده، آدیباتیک و چگالنده، از طریق تغییر علامت شار گرما، قابل تشخیص می باشند.
۱۰۳	۶-۴ ضریب انتقال حرارت شعاعی که مطابق رابطه (۴-۱) تعریف شده است.
۱۰۴	۷-۴ بخشی از آرایه سه بعدی "MHP". بدلیل تغییرات کوچک دما در راستای عرضی، مدلسازی یک بعدی یک ناحیه باریک از آرایه که در راستای x قرار دارد، امکان پذیر است.
۱۰۵	۸-۴ سرعت محوری بدون بعد شده فاز مایع. تغییرات سرعت محوری نه تنها در بخش تبخیر کننده، بلکه در بخش چگالنده نیز بصورت خطی است.
۱۰۵	۹-۴ سرعت محوری بدون بعد شده فاز بخار. تغییرات سرعت محوری نه تنها در بخش تبخیر کننده، بلکه در بخش چگالنده نیز بصورت خطی است.
۱۰۶	۱۰-۴ مقایسه توزیع فشار بدون بعد شده با نتایج مرجع [۱۸].
۱۰۸	۱۱-۴ تأثیر اصطکاک بین فازها در توزیع فشار در فاز بخار، زمانی که شار حرارت ورودی به آرایه "MHP" ها برابر $1/6 W$ باشد.
۱۰۸	۱۲-۴ تأثیر اصطکاک بین فازها در توزیع فشار در فاز بخار، زمانی که شار حرارت ورودی به آرایه "MHP" ها برابر $1/2 W$ باشد.
۱۰۹	۱۳-۴ نتایج استفاده از معادله حالت گاز ایده آل و مقایسه با نتایج "Sobhan" که در مرجع [۱۸] ارائه شده است. شار حرارت ورودی به آرایه "MHP" ها برابر $1/6 W$ است.
۱۰۹	۱۴-۴ منحنی سرعت فازهای مایع و بخار. این نتایج مربوط به شار گرمای ورودی $2/5 W$ و ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 W/m^2 \cdot K$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند.
۱۱۰	۱۵-۴ مقایسه توزیع دمای محوری در آرایه ای که فاقد سیال کاری است با توزیع دما در آرایه ای که در آن 21% از حجم هر "MHP"، با آب پر شده است (تصویر سمت راست). در تصویر سمت چپ توزیع دما در آرایه ای که با آب پر شده است، بصورت جداگانه نشان داده شده. این نتایج مربوط به گرمای ورودی $1/6 W$ ، $2/5 W$ و $3/5 W$ در بخش تبخیر کننده و ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 W/m^2 \cdot K$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند.
۱۱۰	۱۶-۴ توزیع دمای محوری در آرایه "MHP" برای مقادیر مختلف حرارت ورودی. این نتایج مربوط به ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 W/m^2 \cdot K$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند [۱۵].
۱۱۱	۱۷-۴ توزیع فشار در فازهای مایع و بخار (تصویر سمت راست) و توزیع شعاع انحنای سطح مشترک هلالی فازهای مایع و بخار (تصویر سمت چپ)، این نتایج مربوط به شار گرمای ورودی $1/6 W$ ، $2/5 W$ ، $3/5 W$ در بخش تبخیر کننده آرایه و ضریب انتقال حرارت جابجائی $120 W/m^2 \cdot K$ در بخش چگالنده "MHP" می باشند.

شماره عنوان	صفحه
۱۸-۴	مقایسه توزیع فشار در فازهای مایع و بخار با نتایج مرجع [۱۵] این نتایج مربوط به شار گرمای ورودی 1.6 W ، 2.5 W ، 3.5 W در بخش تبخیر کننده آرایه و ضریب انتقال حرارت جابجایی $120 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ در بخش چگالنده آن می باشند.
۱۹-۴	۱۱۱ سرعت عبور فاز بخار از سطح مشترک مایع-بخار در فرایندهای تبخیر و چگالش.
۲۰-۴	۱۱۲ سرعت محوری فازهای مایع و بخار. در ناحیه آدیاباتیک "MHP"، سرعت تقریباً ثابت می ماند.
۲۱-۴	۱۱۳ در فاز مایع مقداری از تغییر سرعت محوری بدلیل تغییر در سطح مقطع جریان مایع است.
۲۲-۴	۱۱۳ تشکیل ناحیه آدیاباتیک در "MHP".
۲۳-۴	توزیع شار حرارت در دیوار آرایه "MHP" (تصویر سمت راست) و شار حرارت در دیوار "MHP" (تصویر سمت چپ). مساحت زیر سطح هر کدام از منحنی ها برابر صفر است. این موضوع بالاتر انرژی را تأیید می کند شار حرارت ورودی به آرایه 2.5 W است و 10% درصد از گرمای ورودی، توسط چهل عدد "MHP" به چاه حرارتی انتقال یافته است.
۲۳-۴	۱۱۴ نوسانات ناشی از تبخیر در ناحیه ای که در حد واسط چگالنده و تبخیر کننده ظاهر شده است (تصویر سمت راست). در تصویر سمت چپ توزیع ضریب انتقال حرارت شعاعی، در راستای محوری رسم شده است. شار حرارت ورودی به آرایه 2.5 W است و 10% درصد از گرمای ورودی، توسط چهل عدد "MHP" به چاه حرارتی انتقال یافته است.
۲۴-۴	۱۱۴ توزیع دما در آرایه "MHP". شار حرارت ورودی به آرایه 2.5 W است. نسبت پر بودن از سیال کاری، برای هر "MHP" 21% است و 10% از کل گرمای ورودی، توسط چهل عدد "MHP" به چاه حرارتی انتقال یافته است.
۲۵-۴	۱۱۵ تأثیر شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه، بر توزیع دمای محوری آرایه "MHP". نسبت پر بودن از سیال کاری، برای هر "MHP" 21% است و 10% از کل گرمای ورودی، توسط چهل عدد "MHP" به چاه حرارتی انتقال یافته است.
۲۶-۴	۱۱۵ شار حرارتی که از طریق هدایت حرارتی در هر فاز انتقال یافته است. بدلیل اندازه بزرگ گرادیان دما در $x = 24 \text{ mm}$ و $x = 28 \text{ mm}$ ، هدایت حرارتی در این نقطه بسیار زیاد است.
۲۷-۴	۱۱۶ رسم شعاع انحنا در سطح مشترک فازهای مایع و بخار (تصویر سمت راست). در تصویر سمت چپ ضریب خالی بودن "MHP" رسم شده است.
۲۸-۴	۱۱۸ تأثیر رسانائی گرمائی جامد در توزیع دمای محوری در آرایه "MHP".
۲۹-۴	۱۱۸ تغییرات فشار اشباع بخار آب با دما. با افزایش دما، فشار اشباع فاز بخار به شدت افزایش می یابد.
۳۰-۴	تغییرات رسانائی گرمائی بخار آب با دما. معادله ارائه شده برای محدوده دمائی 300 K تا 900 K صادق است.
۳۱-۴	۱۲۰ اثر وابستگی پارامترهای k_v ، $C_{p,\ell}$ ، μ_ℓ و ρ_ℓ به دما، در سرعت محوری فازهای مایع و بخار در یک "MHP". شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر 3.5 W است. شرایط مدل سازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. دانسیته فاز بخار، در هر دو حالت با دما و فشار مرتبط است.
	۱۲۱

- ۳۲-۴ تغییرات دانسیته فاز مایع (آب) در راستای محوری "MHP" (تصویر سمت راست). در تصویر سمت چپ، مقادیر ضریب لزجت فاز مایع در راستای محوری "MHP" رسم شده است. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۱
- ۳۳-۴ تغییرات رسانائی گرمائی فاز بخار در راستای محوری "MHP" (تصویر سمت راست). سرعت فاز مایع در سطح مشترک مایع-بخار در تصویر سمت چپ رسم شده است. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۲
- ۳۴-۴ اثر وابستگی پارامترهای k_v ، $C_{p,\ell}$ ، μ_ℓ و ρ_ℓ به دما، در شار حرارت از دیوار آرایه و دیوار "MHP" (تصویر سمت راست). توزیع دمای محوری آرایه در تصویر سمت چپ، رسم شده است. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۲
- ۳۵-۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت شعاعی در راستای محوری "MHP" (تصویر سمت راست). در تصویر سمت چپ، دانسیته فاز بخار برای دو حالتی که خواص k_v ، $C_{p,\ell}$ ، μ_ℓ و ρ_ℓ ثابت یا وابسته به دما باشند، رسم شده است. دانسیته فاز بخار، در هر دو حالت با دما و فشار مرتبط است. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۳
- ۳۶-۴ رسم باقیمانده ها تا تکرار ۱۵۰. در تصویر سمت راست، خواص سیال (به غیر از دانسیته فاز بخار) ثابت است. در تصویر سمت چپ در اثر تغییرات خواص سیال با دما، نوسانات باقیمانده ها بیشتر است. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۳
- ۳۷-۴ تأثیر گرمای نهان تبخیر h_{fg} ، بر شار حرارت از دیوار "MHP" و دیوار آرایه "MHP" (تصویر سمت راست). در تصویر سمت چپ، توزیع دمای محوری در آرایه "MHP" رسم شده است. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۴
- ۳۸-۴ تأثیر گرمای نهان تبخیر h_{fg} ، بر شار حرارت از دیوار "MHP" و دیوار آرایه "MHP". شار حرارت در مقیاس لگاریتمی و برای بخش چگالنده "MHP" رسم شده است. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۴
- ۳۹-۴ تأثیر گرمای نهان تبخیر h_{fg} ، بر سرعت چگالش فاز بخار (تصویر سمت راست) و ضریب انتقال حرارت شعاعی (تصویر سمت چپ). در شکل‌های پائینی، منحنی ها در مقیاس لگاریتمی و برای بخش چگالنده "MHP" رسم شده اند. شار حرارت ورودی به بخش تبخیر کننده آرایه برابر $3.5 W$ است. شرایط مدلسازی عددی مشابه مرجع [۱۸] انتخاب شده است. ۱۲۵
- ۴۰-۴ نمایش بخشهای مختلف هندسه دو بعدی. در این شکل، نوع مرزهایی که مورد استفاده قرار گرفته اند، مشخص شده است. ۱۲۶
- ۴۱-۴ شبکه دو بعدی، که قبل از تطبیق شبکه بر اساس گرادیان دما، طراحی شده است. ۱۲۶

شماره عنوان	صفحه
۴۲-۴	تأثیر افزایش رسانائی حرارتی جسم تقویت کننده هدایت حرارتی، در توزیع دمای محوری یک جامد مسطح در تصاویر (الف)، (ب) و (پ)، رسانائی گرمائی جسم تقویت کننده هدایت حرارتی، به ترتیب برابر k_{copper} ، $10k_{copper}$ و $100k_{copper}$ است.
۴۳-۴	رسم توزیع دمای محوری در صفحه تقارن جسم جامد با افزایش رسانائی حرارتی جسم تقویت کننده هدایت حرارت، دمای محوری یکنواخت تر شده است.
۴۴-۴	رسم توزیع دمای محوری در لبه های کناری جسم جامد و در خط مرکزی آن، شکستگی منحنی توزیع دما، در لبه ها دیده نمی شود.
۴۵-۴	شار حرارتی که از دیوار جسم تقویت کننده حرارتی عبور کرده است.
۴۶-۴	شبکه ای که بر اساس گرادیان دما تطبیق یافته است. بدلیل ثابت بودن دما در چاه حرارتی گرادیان دما صفر است و شبکه ریز نشده است.
۴۷-۴	پارامترهایی که در مشخص شدن ابعاد طولی و عرضی دامنه محاسباتی بکار رفته اند.
۴۸-۴	پارامترهایی که در مشخص شدن ابعاد عمقی دامنه محاسباتی بکار رفته اند [۱۶].
۴۹-۴	نامگذاری مرزهای کناری در نمای بالا (سمت راست) و نمای پایین (سمت چپ).
۵۰-۴	نامگذاری سایر مرزهایی که در آرایه "MHP" در نظر گرفته شده اند.
۵۱-۴	هندسه ای که توسط "GAMBIT" ایجاد شده است. بدلیل تقارن، نیمی از دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده است.
۵۲-۴	نمایش یک مقطع عرضی از شبکه سه بعدی که در نواحی جامد ایجاد شده است.
۵۳-۴	موقعیت "MHP#1" در آرایه "MHP". سطح مقطع "MHP" بصورت مثلث مدلسازی شده است.
۵۴-۴	نمایش شبکه در سطح مشترک شیشه پیرکس و سیلیکان.
۵۵-۴	نمایش شبکه در مجاورت "MHP#1" در سطح مشترک شیشه پیرکس و سیلیکان. در این تصویر نواحی تطبیق یافته نشان داده شده است.
۵۶-۴	نتایج حل عددی در آرایه سه بعدی "MHP". این نتایج برای حالتی که "MHP" ها فاقد سیال کاری باشند، بدست آمده است. ضریب انتقال حرارت جابجائی در تمام سطوح آرایه برابر $5 W / m^2 - K$ انتخاب شده است.
۵۷-۴	مقایسه نتایج حل عددی، با اندازه گیری های آزمایشی در آرایه سه بعدی، در موقعیت "MHP#1". این نتایج برای حالتی که "MHP" ها فاقد سیال کاری باشند، بدست آمده است. ضریب انتقال حرارت جابجائی در تمام سطوح آرایه برابر $5 W / m^2 - K$ انتخاب شده است.
۵۸-۴	خطوط دما ثابت در حالتی که "MHP" ها فاقد سیال کاری باشند. اختلاف دمای بین هر دو خط دما ثابت $4^{\circ}C$ است. حرارت ورودی برابر $Q=1/4W$ و ضریب انتقال حرارت جابجائی (طبیعی) در سطح آرایه برابر مقدار $h = 5 W / m^2 - K$ انتخاب شده است.
۵۹-۴	مقایسه نتایج حل عددی، با اندازه گیری های آزمایشی در آرایه سه بعدی، در موقعیت "MHP#1". این نتایج برای حالتی که "MHP" ها فاقد سیال کاری باشند، بدست آمده است. ضریب انتقال حرارت جابجائی در تمام سطوح آرایه برابر $1 W / m^2 - K$ انتخاب شده است.

- ۶۰-۴ مقایسه نتایج حل عددی، با اندازه گیری های آزمایشی در موقعیت "MHP#1". این نتایج برای حالتی که "MHP" ها فاقد سیال کاری باشند بدست آمده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی در تمام سطوح آرایه برابر $h = 1 \text{ W/m}^2 - \text{K}$ انتخاب شده است و ضریب انتقال حرارت جابجایی (اجباری) در سطح چاه حرارتی، $h = 1000 \text{ W/m}^2 - \text{K}$ است. ۱۳۹
- ۶۱-۴ انطباق منحنی ها و درونیایی اطلاعات تجربی برای تعیین توزیع دما در راستای محوری "MHP" ها. ۱۴۰
- ۶۲-۴ خطوط دما ثابت در سطح مشترک شیشه پیرکس و سیلیکان. حرارت ورودی برابر $1/9 \text{ W}$ است. ۱۴۰
- ۶۳-۴ خطوط دما ثابت در سطح خارجی شیشه پیرکس. حرارت ورودی برابر $1/9 \text{ W}$ است. ۱۴۱
- ۶۴-۴ توزیع دمای محوری در صفحه تقارن سیلیکان و در محل "MHP#1". حرارت ورودی برابر $1/9 \text{ W}$ است. ۱۴۱
- ۶۵-۴ توزیع دمای محوری در لبه کناری سیلیکان (Silicon Edge#2) و در محل "MHP#1". حرارت ورودی برابر $1/9 \text{ W}$ است. ۱۴۲
- ۶۶-۴ توزیع دمای محوری در لبه کناری سیلیکان و در محل "MHP#1". ۱۴۲
- ۶۷-۴ نسبت شار حرارت انتقال یافته از طریق جابجایی طبیعی به شار حرارت انتقال یافته از طریق تابش در سطح شیشه پیرکس. حرارت ورودی برابر $1/9 \text{ W}$ است. ۱۴۳
- ۶۸-۴ توزیع شار حرارت در امتداد صفحه تقارن آرایه، در سطح خارجی شیشه پیرکس. حرارت ورودی برابر $1/9 \text{ W}$ است. ۱۴۴
- ۶۹-۴ شار حرارت ورودی به دیوار "MHP#1". علت نوسانات، ایراد در کاربرد شرط مرزی دما ثابت است. در واقعیت دما در راستای عرضی "MHP" ثابت نیست. ۱۴۴
- ۷۰-۴ شار حرارت ورودی به "MHP" یک بعدی. این مقادیر با میانگین گیری در هر مقطع عرضی بدست آمده اند. ۱۴۵
- ۷۱-۴ توزیع سرعت محوری در فاز مایع در "MHP#1". حرارت ایجاد شده در منبع حرارتی برابر $Q=1/9 \text{ W}$ در نظر گرفته شده است. ۱۴۶
- ۷۲-۴ توزیع سرعت محوری در فاز بخار در "MHP#1". حرارت ایجاد شده در منبع حرارتی برابر $Q=1/9 \text{ W}$ در نظر گرفته شده است. ۱۴۶
- ۷۳-۴ تغییرات شعاع سطح مشترک هلالی مایع-بخار. با استفاده از کمیت T_1 ، موقعیت خط تماس در دیوار "MHP" قابل تشخیص است. T_0 برابر شعاع دایره محیطی سطح مقطع "MHP" است. ۱۴۷
- ۷۴-۴ تغییرات "Void Fraction" در راستای محوری "MHP#1". حرارت ایجاد شده در منبع حرارتی برابر $Q=1/9 \times 10^{-5} \text{ W}$ در نظر گرفته شده است. ۱۴۷
- ۷۵-۴ رسم باقیمانده ها و تغییرات حرارت خالص ورودی به "MHP#1". حرارت ایجاد شده در منبع حرارتی، برابر $Q=1/9 \text{ W}$ است. ۱۴۸
- ۷۶-۴ شبکه در بخشی از انتهای چگالنده "MHP". شبکه در گوشه ها ریزتر است. ۱۴۹
- ۷۷-۴ موقعیت اولیه فاز مایع. سطح تماس اولیه فاز مایع و بخار کاملاً مسطح است. ۱۴۹
- ۷۸-۴ موقعیت سطح مشترک فاز مایع در کنار دیوار در حالت دائمی. بدلیل خطای عددی، سطح مشترک در حالت دائمی نوسان دارد. ۱۵۰