بسم الله الرحمن الرحيم

١٤٤٩٠٢٠١٤٧٨٤٥

دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

تجزیه و تحلیل حرارتی دریافت‌کننده مرکزی خورشیدی با نمک مذاب در شرایط آب و هوایی کرمان

استاد راهنما :

دکتر مظفرعلی مهرابیان

استاد مشاور :

دکتر محمد حسن صفاری پور

مؤلف :

علی زارع

اسفندماه ۱۳۸۸

۱۳۸۹/۹/۲۹

۱۴۷۸۴۵

این پایان نامه

به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : علی زارع

استاد راهنما : آقای دکتر مظفر علی مهرابیان

استاد مشاور : آقای دکتر محمد حسن صفاری پور

داور ۱ : آقای دکتر سید حسین منصوری

داور ۲ : آقای دکتر مازیار سلمان زاده

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه دفاع : آقای دکترقربانعلی محمدی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : آقای دکتر غلامرضا پور ابراهیم

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است

دانشگاه شهید باهنر
کرمان
اداره تحصیلات تکمیلی

تقدیم به :

پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم که در طول مدت تحصیل، همواره بهترین مشوق و پشتیبانم بوده‌اند؛ تنها کسانی که همچون نور امید و استقامت رهنمون من در جاده پر پیچ و خم زندگی می‌باشند.

تشکر و قدردانی :

سپاس بیکران خداوند بزرگ را سزاست که مرا در این راه یاری نمود و به من توفیق عنایت فرمود تا در راه تحصیل علم و دانش، گام بردارم و قطره‌ای از دریای بیکران دانش را که تجلی عظمت آفرینش است، مورد کنکاش قرار دهم.

در به ثمر رساندن این پایان نامه از راهنمایی‌های ارزنده، مساعدت‌های علمی و زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای ارجمند جناب آقای دکتر مظفر علی مهرابیان بهره‌مند بوده‌ام که صمیمانه از ایشان تشکر می‌نمایم و از خداوند متعال سلامتی و سعادت روز افزون ایشان را خواستارم. از جناب آقای دکتر محمدحسن صفاری‌پور به عنوان استاد مشاور که از راهنمایی‌های مفیدشان در این پایان نامه بهره‌مند بوده‌ام، صمیمانه تشکر می‌کنم. بدین وسیله از جناب آقای مرتضی عبدل زاده، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد کرمان، که همواره مرا از الطاف خویش بهره‌مند کردند و با راهنمایی‌های خود راه‌گشای اینجانب بوده‌اند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم و از خداوند منان، سعادت و بهروزی روز افزون برایشان آرزومندم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از پدر و مادر عزیزم که در طول مدت تحصیل با کمک‌های بی‌شائبه مادی و معنوی خود، مسیر رشد را برایم فراهم نمودند، کمال تشکر و قدردانی را بعمل آورم چراکه بدون تردید هر موفقیتی را که تاکنون به دست آورده‌ام، مرهون محبت‌های آنان است.

چکیده

افزایش بازده‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی خورشیدی، تأثیر قابل توجهی در طراحی بهینه‌ی میدان جمع‌کننده انرژی خورشیدی، کاهش هزینه‌ها و نیز در افزایش بازده‌ی کل نیروگاه خورشیدی دارد. جنس و دمای ماکزیمم سیال حامل انرژی، جهت بررسی کرنش‌های حرارتی ایجاد شده در دیواره‌ی دریافت‌کننده و افزایش طول عمر آن، از اهمیت زیادی برخوردار است. از آنجا که شار حرارتی که تنها به یک نیمه‌ی دیواره‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی می‌تابد، متغیّر است؛ بنابراین روابط تحلیلی انتقال حرارت برای دریافت‌کننده‌ی مرکزی قابل استفاده نیست، به همین دلیل در این پروژه، از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی (فلوئنت) برای تحلیل حرارتی و از مخلوط نیترات پتاسیم - نیترات سدیم به عنوان سیال حامل انرژی استفاده می‌شود. در این پروژه، تأثیر شار حرارتی متغیّر و نیز اثرات عواملی همچون دما و سرعت ورودی سیال، قطر و ضخامت دیواره‌ی دریافت‌کننده بین شارهای حرارتی ۱۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلووات بر مترمربع، بر بازده‌ی حرارتی دریافت کننده و دمای ماکزیمم نمک مذاب، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش شار حرارتی باعث افزایش بازده‌ی حرارتی و دمای ماکزیمم نمک مذاب می‌شود ولی به تدریج با بالا رفتن شار حرارتی، اثر آن بر بازده‌ی حرارتی کم می‌شود؛ به‌طوری که جهت کاهش هزینه‌ها، بهتر است انرژی خورشیدی را برای دستیابی به شار حرارتی در بازه‌ی ۴۰۰ الی ۷۰۰ کیلووات بر مترمربع متمرکز نمود. افزایش دمای ورودی باعث افزایش دمای ماکزیمم نمک مذاب می‌شود ولی تأثیر کمی در کاهش بازده‌ی حرارتی دارد؛ در نتیجه می‌توان با افزایش دمای ورودی، لزجت نمک مذاب را کاهش داد که این امر، کاهش افت فشار و انرژی مصرفی پمپ و در نتیجه افزایش بازده‌ی کل نیروگاه خورشیدی را در پی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: بازده حرارتی، دریافت‌کننده مرکزی، شار حرارتی متغیر، نمک مذاب

فهرست مطالب :

فصل اول - مقدمه

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ مروری بر کارهای تحقیقاتی گذشته ۲

۱-۳ اهداف پروژه ۵

فصل دوم - انرژی خورشیدی و کاربردهای آن

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ تاریخچه ۱۰

۲-۳ تشعشعات خورشیدی ۱۱

۲-۴ ثابت خورشیدی ۱۲

۲-۵ انواع تابش‌های خورشیدی ۱۴

۲-۶ جهات تابش خورشیدی ۱۵

۲-۷ میانگین ماهیانه‌ی تابش مستقیم بر روی یک سطح شیبدار ۱۸

۲-۸ میانگین ماهیانه‌ی تشعشع خارج از جو بر روی یک سطح افقی ۱۹

۲-۹ شاخص صافی هوا ۱۹

۲-۱۰ میانگین ماهیانه‌ی تابش پخشی بر روی یک سطح افقی ۲۰

۲-۱۱ تشعشع کل متوسط ماهیانه بر روی یک سطح شیبدار ۲۱

۲-۱۲ کاربردهای نیروگاهی انرژی خورشیدی ۲۲

۲-۱۳ نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی با سیستم دریافت‌کننده‌ی سهموی ۲۲

۲-۱۴ نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی با سیستم دریافت‌کننده‌ی خطی فرسنل ۲۴

۲-۱۵ نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی با سیستم دریافت‌کننده‌ی مرکزی ۲۴

۲-۱۶ نیروگاه‌های خورشیدی با سیستم دریافت‌کننده‌ی بشقاب-استرلینگ ۲۶

۲-۱۷ نیروگاه‌های دودکش خورشیدی ۲۷

۲-۱۸ مزایای نیروگاه‌های خورشیدی ۲۸

۲-۱۹ کاربردهای غیرنیروگاهی انرژی خورشیدی ۲۹

۲-۲۰ سیستم تبدیل فتوولتائیک ۳۱
۲-۲۱ مصارف سلول‌های فتوولتائیک ۳۳

فصل سوم - سیستم دریافت‌کننده مرکزی

۳-۱ مقدمه ۳۴
۳-۲ سیستم دریافت‌کننده مرکزی انرژی خورشیدی ۳۴
۳-۳ سیستم انتقال گرما ۳۸
۳-۴ سیال حامل انرژی ۳۸
۳-۵ سیستم ذخیره گرمایی ۴۱
۳-۶ میدان جمع‌کننده انرژی خورشیدی ۴۲
۳-۷ کنترل هلیوستات‌ها ۴۶
۳-۸ مکان هلیوستات‌ها ۴۷
۳-۹ اثر کسینوسی (بازده کسینوسی) ۴۷
۳-۱۰ سایه‌اندازی و انسداد ۵۱
۳-۱۱ پراکندگی جوی ۵۵
۳-۱۲ مطالعات بهینه‌سازی ۵۶
۳-۱۳ زمین هلیوستات ۵۷
۳-۱۴ برج دریافت‌کننده ۵۹
۳-۱۵ بازده کل جمع‌آوری انرژی خورشیدی ۶۱
۳-۱۶ اتلافات حرارتی ۶۱
۳-۱۷ اتلافات حرارتی میدان جمع‌کننده ۶۲
۳-۱۸ اتلافات حرارتی لوله دریافت‌کننده ۶۳
۳-۱۹ مدل‌های تحلیل سیستم دریافت‌کننده مرکزی ۶۶
۳-۲۰ تجربه جهانی ۶۷

فصل چهارم - موازنه انرژی و روابط انتقال حرارت

۴-۱ مقدمه ۶۹

۴-۲ معادلات کلی حاکم بر جریان سیال ۷۰
۴-۳ معادلات حاکم بر جریان متلاطم ۷۱
۴-۴ مدل سازی تلاطم ۷۳
۴-۵ ماهیت تلاطم ۷۳
۴-۶ مفاهیم اساسی ۷۵
۴-۷ مدل‌های جبری ۷۶
۴-۸ مدل‌های دیفرانسیلی یک معادله‌ای ۷۸
۴-۹ مدل‌های دیفرانسیلی دو معادله‌ای ۷۹
۴-۱۰ مدل $k-\varepsilon$ ۸۰
۴-۱۱ خواص حرارتی نمک مذاب و ماده جذب کننده ۸۱
۴-۱۲ جریان سیال درون لوله دریافت‌کننده ۸۳
۴-۱۳ موازنه انرژی در سیستم دریافت‌کننده‌ی مرکزی ۸۵
۴-۱۴ معادلات بقای انرژی در لوله‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی ۸۷
۴-۱۵ روابط انتقال حرارت در لوله‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی ۸۸
۴-۱۶ لوله‌ی دریافت‌کننده و شرایط مرزی آن ۹۴
۴-۱۷ نرم افزار محاسباتی ۹۷
۴-۱۸ کنترل شبکه‌بندی ۹۸

فصل پنجم - نتایج، بحث و تحلیل

۵-۱ دمای ورودی و شار حرارتی معین در یک نیمه‌ی دیواره ۱۰۲
۵-۲ شار حرارتی متغیّر در یک نیمه‌ی دیواره و دمای ورودی ۱۰۹
۵-۳ شار حرارتی متغیّر در یک نیمه‌ی دیواره و سرعت ورودی ۱۱۷
۵-۴ شار حرارتی متغیّر در یک نیمه‌ی دیواره و قطر داخلی لوله ۱۲۵
۵-۵ شار حرارتی متغیّر در یک نیمه‌ی دیواره و ضخامت دیواره‌ی لوله ۱۳۲
۵-۶ شار حرارتی متغیّر در یک نیمه‌ی دیواره و مخلوط نیترات سدیم – پتاسیم با درصدهای حجمی مختلف ۱۴۰

۵-۷ شار حرارتی متغیّر در کُل دیواره‌ی لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۱۴۴
۵-۸ دمای سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۱۵۱
۵-۹ اعتبارسنجی..... ۱۵۳
۵-۱۰ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی..... ۱۵۶
پیوست..... ۱۵۹
الف- زاویه شیب بهینه‌ی هلیوستات‌ها در شهر کرمان به صورت ماهیانه و فصلی..... ۱۵۹
منابع .....

فهرست اشکال :

شکل ۲-۱ ساختار کره خورشید..... ۸
شکل ۲-۲ تغییرات تابش خورشیدی بر حسب طول موج تشعشعات ۱۲
شکل ۲-۳ تغییرات تشعشع خارج از جو سطح عمود بر تابش خورشیدی در طول سال. ۱۳
شکل ۲-۴ تابش مستقیم، تابش پخشی و تابش انعکاسی ۱۵
شکل ۲-۵ تغییرات زاویه‌ی میل در طول سال..... ۱۶
شکل ۲-۶ نحوه‌ی تغییرات بازه‌ی زمانی بین غروب و طلوع خورشید در شهر کرمان در طول سال..... ۱۷
شکل ۲-۷ نحوه‌ی تغییرات تشعشع خارج از جو در طول سال در شهر کرمان ۲۰
شکل ۲-۸ تغییرات تابش پخشی روی یک سطح افقی نسبت به شاخص صافی هوا..... ۲۱
شکل ۲-۹ نیروگاه حرارتی خورشیدی ۳۰ مگاواتی کرامر کانادا با سیستم دریافت‌کننده سهموی..... ۲۳
شکل ۲-۱۰ نیروگاه حرارتی خورشیدی بَکرفیلد کالیفرنیای آمریکا با سیستم دریافت‌کننده فرسنل خطی..... ۲۴
شکل ۲-۱۱ نیروگاه حرارتی خورشیدی ۱۱ مگاواتی لامایور اسپانیا با سیستم دریافت‌کننده مرکزی ۲۶
شکل ۲-۱۲ نیروگاه خورشیدی آلبوکِرکوی آمریکا با سیستم دریافت‌کننده‌ی بشقاب -

استرلینگ ۲۷
شکل ۲-۱۳ نیروگاه دودکش خورشیدی اسپانیا با برج ۲۰۰ متری ۲۸
شکل ۳-۱ شماتیک سیستم دریافت‌کننده‌ی مرکزی با نمک مذاب ۳۷
شکل ۳-۲ شماتیک سیستم ذخیره‌ی گرمایی دو تانک سرد و گرم ۴۲
شکل ۳-۳ قسمت‌های مختلف هلیوستات ۴۴
شکل ۳-۴ شار حرارتی جمع‌آوری شده توسط هلیوستات‌ها در میدان جمع‌کننده انرژی خورشیدی ۴۵
شکل ۳-۵ سطح مؤثر دو هلیوستات در سمت شمالی و جنوبی برج دریافت کننده که در هنگام ظهر هلیوستات A بازده‌ی کسینوسی بیشتری نسبت به هلیوستات B دارد ۴۸
شکل ۳-۶ بازده کسینوسی هلیوستات‌ها در مکان‌های مختلف میدان جمع‌کننده با زاویه ارتفاع خورشیدی ۴۹
شکل ۳-۷ متوسط بازده‌ی کسینوسی سالیانه‌ی نیروگاه براستو در کالیفرنیای آمریکا ۵۱
شکل ۳-۸ سایه اندازی و انسداد در میدان جمع‌کننده انرژی خورشیدی ۵۲
شکل ۳-۹ آرایش شعاعی هلیوستات‌ها به صورت یک در میان ۵۳
شکل ۳-۱۰ فاصله‌ی طولی و شعاعی هلیوستات‌ها از یکدیگر بر حسب فاصله‌ی آنها از برج دریافت‌کننده ۵۴
شکل ۳-۱۱ چگالی تراکم هلیوستات‌ها بر حسب فاصله از برج دریافت‌کننده ۵۵
شکل ۳-۱۲ پراکندگی جوی برای شرایط آب و هوایی پاک و غبار آلود ۵۶
شکل ۳-۱۳ آرایش بهینه‌ی میدان جمع‌کننده با کمترین اتلافات پراکندگی جوی و اتلاف کسینوسی که توسط بَتل‌سون در سال ۱۹۸۱ ارائه شد ۵۷
شکل ۳-۱۴ نیروگاه خورشیدی ۱۱ مگاواتی اسپانیا با آرایش هلیوستات‌ها در شمال برج دریافت‌کننده ۵۸
شکل ۳-۱۵ ارتفاع بهینه‌ی برج دریافت‌کننده بر حسب توان تولیدی نیروگاه ۶۰
شکل ۳-۱۶ هزینه‌ی ساخت برج دریافت‌کننده با ارتفاع‌های مختلف ۶۰
شکل ۳-۱۷ اتلافات حرارتی در دریافت‌کننده‌ی مرکزی ۶۴
شکل ۳-۱۸ بازده‌ی میدان جمع‌کننده‌ی انرژی خورشیدی با سیستم دریافت‌کننده‌ی مرکزی

با زوایای مختلف محوری و سمت‌الرأس خورشیدی، در حالتی که برج دریافت‌کننده در مرکز میدان جمع‌کننده‌ی انرژی خورشیدی واقع نشده است..... ۶۷
شکل ۴-۱ موازنه‌ی انرژی در میدان جمع‌کننده و سیستم دریافت‌کننده‌ی مرکزی نیروگاه خورشیدی..... ۸۶
شکل ۴-۲ مدل مقاومت حرارتی در قسمتی از لوله‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی ۸۸
شکل ۴-۳ شار حرارتی و محورهای مختصات در لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۹۵
شکل ۴-۴ مش مثلثی در سطح مقطع ورودی و خروجی لوله‌ی دریافت‌کننده ۹۸
شکل ۴-۵ دقت همگرایی معادلات حاکم بر جریان سیال..... ۱۰۰
شکل ۵-۱ انرژی حرارتی منتقل شده به نمک مذاب در دماهای ورودی و قطرهای مختلف با شار حرارتی ثابت..... ۱۰۳
شکل ۵-۲ اتلاف حرارتی کل در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده در دماهای ورودی و قطرهای مختلف با شار حرارتی ثابت..... ۱۰۴
شکل ۵-۳ افت فشار در لوله‌ی دریافت‌کننده در دماهای ورودی و قطرهای مختلف با شار حرارتی ثابت..... ۱۰۴
شکل ۵-۴ دمای ماکزیمم نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در دماهای ورودی و قطرهای مختلف با شار حرارتی ثابت..... ۱۰۵
شکل ۵-۵ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در دماهای ورودی و قطرهای مختلف با شار حرارتی ثابت..... ۱۰۵
شکل ۵-۶ تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی *(z=1,8 m)* در دماهای ورودی مختلف با قطر و شار حرارتی ثابت..... ۱۰۶
شکل ۵-۷ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با دمای ورودی ۵۷۳,۱۵ درجه‌ی کلوین..... ۱۰۷
شکل ۵-۸ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با دمای ورودی ۶۲۳,۱۵ درجه‌ی کلوین..... ۱۰۷

شکل ۵-۹ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با دمای ورودی ۶۷۳,۱۵ درجه‌ی کلوین.....۱۰۸
شکل ۵-۱۰ کانتورهای دمای دیواره با شار حرارتی ثابت در یک نیمه‌ی دیواره.....۱۰۸
شکل ۵-۱۱ انرژی حرارتی منتقل شده به نمک مذاب در دماهای ورودی و شارهای حرارتی مختلف با قطر ثابت.....۱۱۱
شکل ۵-۱۲ اتلاف حرارتی کل در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده در دماهای ورودی و شارهای حرارتی مختلف با قطر ثابت.....۱۱۱
شکل ۵-۱۳ ماکزیمم دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در دماهای ورودی و شارهای حرارتی مختلف با قطر ثابت.....۱۱۲
شکل ۵-۱۴ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در دماهای ورودی و شارهای حرارتی مختلف با قطر ثابت.....۱۱۲
شکل ۵-۱۵ تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی *(z=1,8 m)* در شارهای حرارتی مختلف با قطر و دمای ورودی ثابت.....۱۱۳
شکل ۵-۱۶کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۱۴
شکل ۵-۱۷کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۵۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۱۴
شکل ۵-۱۸کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۹۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۱۵
شکل ۵-۱۹کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۴۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۱۵
شکل ۵-۲۰ کانتورهای دمای دیواره با دمای ورودی ثابت.....۱۱۶
شکل ۵-۲۱ انرژی حرارتی منتقل شده به نمک مذاب در سرعت‌های ورودی و شارهای حرارتی مختلف.....۱۱۹

شکل ۵-۲۲ اتلاف حرارتی کل در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده در سرعت‌های ورودی و شارهای حرارتی مختلف..... ۱۱۹
شکل ۵-۲۳ دمای ماکزیمم نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در سرعت‌های ورودی و شارهای حرارتی مختلف..... ۱۲۰
شکل ۵-۲۴ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در سرعت‌های ورودی و شارهای حرارتی مختلف..... ۱۲۰
شکل ۵-۲۵ تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی ($z=1,8\ m$) در شارهای حرارتی مختلف با سرعت ورودی، قطر داخلی و دمای ورودی ثابت..... ۱۲۱
شکل ۵-۲۶ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع ۱۲۲
شکل ۵-۲۷ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۵۰۰ کیلووات بر مترمربع..... ۱۲۲
شکل ۵-۲۸ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۹۰۰ کیلووات بر مترمربع..... ۱۲۳
شکل ۵-۲۹ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۴۰۰ کیلووات بر مترمربع..... ۱۲۳
شکل ۵-۳۰ کانتورهای دمای دیواره با سرعت ورودی ثابت..... ۱۲۴
شکل ۵-۳۱ انرژی حرارتی منتقل شده به نمک مذاب در شارهای حرارتی و قطرهای مختلف با دمای ورودی ثابت..... ۱۲۶
شکل ۵-۳۲ اتلاف حرارتی کُل در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده در شارهای حرارتی و قطرهای مختلف با دمای ورودی ثابت..... ۱۲۷
شکل ۵-۳۳ دمای ماکزیمم نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شارهای حرارتی و قطرهای مختلف با دمای ورودی ثابت..... ۱۲۷
شکل ۵-۳۴ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در شارهای حرارتی و قطرهای

مختلف با دمای ورودی ثابت..... ۱۲۸
شکل ۵-۳۵ تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی (z=۱٫۸ m) در در شارهای حرارتی مختلف با قطر داخلی و دمای ورودی ثابت.....۱۲۹
شکل ۵-۳۶ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع ۱۲۹
شکل ۵-۳۷ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۵۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۳۰
شکل ۵-۳۸ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۹۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۳۰
شکل ۵-۳۹ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۴۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۳۱
شکل ۵-۴۰ کانتورهای دمای دیواره با قطر داخلی ثابت.....۱۳۲
شکل ۵-۴۱ انرژی حرارتی منتقل شده به نمک مذاب در شارهای حرارتی و ضخامت‌های مختلف.....۱۳۴
شکل ۵-۴۲ اتلاف حرارتی کُل در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده در شارهای حرارتی و ضخامت‌های مختلف.....۱۳۴
شکل ۵-۴۳ دمای ماکزیمم نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شارهای حرارتی و ضخامت‌های مختلف ۱۳۵
شکل ۵-۴۴ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در شارهای حرارتی و ضخامت‌های مختلف.....۱۳۵
شکل ۵-۴۵ تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی (z=۱٫۸ m) در شارهای حرارتی مختلف با دما ورودی، سرعت ورودی و ضخامت دیواره ثابت.....۱۳۶
شکل ۵-۴۶ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع ۱۳۷

شکل ۵-۴۷ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۵۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۳۷
شکل ۵-۴۸ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۹۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۳۸
شکل ۵-۴۹ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۱۴۰۰ کیلووات بر مترمربع.....۱۳۸
شکل ۵-۵۰ کانتورهای دمای دیواره با ضخامت دیواره‌ی ثابت.....۱۳۹
شکل ۵-۵۱ انرژی حرارتی منتقل شده به مخلوط نیترات پتاسیم – نیترات سدیم با درصدهای حجمی و شارهای حرارتی مختلف.....۱۴۲
شکل ۵-۵۲ اتلاف حرارتی کُل در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده با مخلوط نیترات پتاسیم – نیترات سدیم با درصدهای حجمی و شارهای حرارتی مختلف.....۱۴۲
شکل ۵-۵۳ دمای ماکزیمم مخلوط نیترات پتاسیم – نیترات سدیم با درصدهای حجمی مختلف در سطح مقطع خروجی لوله و شارهای حرارتی مختلف.....۱۴۳
شکل ۵-۵۴ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده با مخلوط نیترات پتاسیم – نیترات سدیم با درصدهای حجمی مختلف در شارهای حرارتی مختلف..... ۱۴۳
شکل ۵-۵۵ دیاگرام فازی مخلوط نیترات پتاسیم – نیترات سدیم با درصد حجمی مختلف.....۱۴۴
شکل ۵-۵۶ انرژی حرارتی منتقل شده به نمک مذاب در شارهای حرارتی مختلفی که در یک نیمه یا سراسر لوله وجود دارند.....۱۴۵
شکل ۵-۵۷ اتلاف حرارتی کُل در سطح خارجی لوله‌ی در شارهای حرارتی مختلفی که در یک نیمه یا سراسر لوله وجود دارند.....۱۴۶
شکل ۵-۵۸ دمای ماکزیمم نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شارهای حرارتی مختلفی که در یک نیمه یا سراسر لوله وجود دارند ۱۴۶
شکل ۵-۵۹ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در شارهای حرارتی مختلفی که

در یک نیمه یا سراسر لوله وجود دارند..... ۱۴۷
شکل ۵-۶۰ تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله (z=۱٫۸ m) با شارهای حرارتی مختلف در کل دیواره‌ی لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۱۴۸
شکل ۵-۶۱ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با شار حرارتی ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع در کُل دیواره‌ی لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۱۴۸
شکل ۵-۶۲ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با شار حرارتی ۵۰۰ کیلووات بر مترمربع در کُل دیواره‌ی لوله‌ی دریافت‌کننده ۱۴۹
شکل ۵-۶۳ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با شار حرارتی ۹۰۰ کیلووات بر مترمربع در کُل دیواره‌ی لوله‌ی دریافت‌کننده ۱۴۹
شکل ۵-۶۴ کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با شار حرارتی ۱۴۰۰ کیلووات بر مترمربع در کُل دیواره‌ی لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۱۵۰
شکل ۵-۶۵ کانتورهای دمای دیواره با شار حرارتی ثابت در کُل دیواره..... ۱۵۱
شکل ۵-۶۶ کانتورهای دمای دیواره با شار حرارتی ثابت در یک نیمه‌ی دیواره..... ۱۵۲
شکل ۵-۶۷ کانتورهای دمای دیواره با شار حرارتی ثابت در یک نیمه‌ی دیواره..... ۱۵۲
شکل ۵-۶۸ کانتورهای دمای دیواره با شار حرارتی ثابت در یک نیمه‌ی دیواره..... ۱۵۳
شکل ۵-۶۹ تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله در شار حرارتی ۴۰۰ کیلووات بر مترمربع..... ۱۵۴
شکل ۵-۷۰ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در قطرهای مختلف با شار حرارتی و دمای ورودی ثابت..... ۱۵۵
شکل ۵-۷۱ بازده‌ی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده در شارهای حرارتی مختلف با دمای ورودی و قطر ثابت..... ۱۵۵

فهرست جداول :

جدول ۲-۱ روز متوسط در هر ماه و مقدار n در هر روز از سال ۱۳

جدول ۲-۲ انواع شرایط آب و هوایی بر اساس شاخص صافی هوا..... ۱۹
جدول ۳-۱ مخلوط‌های نمک مذاب و دمای کارکرد آنها..... ۴۰
جدول ۳-۲ ماکزیمم شار حرارتی در سطح خارجی دریافت‌کننده با سیال‌های حامل انرژی متفاوت..... ۵۹
جدول ۳-۳ اتلافات حرارتی میدان جمع‌کننده‌ی انرژی خورشیدی در نیروگاه براستو آمریکا..... ۶۲
جدول ۳-۴ نیروگاه‌های خورشیدی با سیستم دریافت‌کننده‌ی مرکزی در برخی از کشورهای جهان..... ۶۸
جدول ۴-۱ متغیرهای استفاده شده برای z توسط افراد مختلف..... ۸۰
جدول ۴-۲ ضریب صدور «لوز سِرمت» و خواص حرارتی مخلوط نیترات سدیم- نیترات پتاسیم با درصد حجمی برابر در دماهای ورودی لوله‌ی دریافت‌کننده در این پروژه.... ۸۳
جدول ۴-۳ عدد رینولدز مخلوط نیترات سدیم – نیترات پتاسیم با درصد حجمی برابر در جریان درون لوله‌ی دریافت‌کننده در دمای ورودی ۵۷۳,۱۵ درجه‌ی کلوین..... ۸۳
جدول ۴-۴ عدد رینولدز مخلوط نیترات سدیم – نیترات پتاسیم با درصد حجمی برابر در جریان درون لوله‌ی دریافت‌کننده در دمای ورودی ۶۲۳,۱۵ درجه‌ی کلوین..... ۸۴
جدول ۴-۵ طول ورودی هیدرولیکی و طول ورودی حرارتی محاسبه شده در این پروژه در جریان مخلوط نیترات پتاسیم – نیترات سدیم با درصد حجمی برابر درون لوله‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی..... ۸۵
جدول ۴-۶ جهت شارهای حرارتی در لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۸۷
جدول ۴-۷ ضریب هدایت حرارتی فولاد ضدزنگ در دماهای ورودی دریافت‌کننده در این پروژه..... ۹۱
جدول ۴-۸ مقادیر مختلف C و m در رابطه‌ی ۴-۶۲..... ۹۳
جدول ۴-۹ ضریب انتقال حرارت جابجایی متوس محاسبه شده در این پروژه در جریان خارجی هوا روی لوله‌ی دریافت‌کننده با ضخامت جداره‌ی ۲ میلیمتر در شرایط آب و هوایی شهر کرمان..... ۹۳
جدول ۴-۱۰ اتلاف حرارتی کُل و انرژی منتقل شده به نمک مذاب..... ۹۹

جدول ۴-۱۱ دقت همگرایی معادله‌ی پیوستگی، معادله‌ی انرژی و سرعت محوری ۹۹
جدول ۴-۱۲ حداقل تعداد گره‌ها برای شبکه‌بندی مناسب لوله‌ی دریافت‌کننده ۱۰۱
جدول ۵-۱ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده مرکزی با قطر داخلی ۲۰ میلیمتر در دماهای ورودی مختلف ۱۰۲
جدول ۵-۲ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده مرکزی با قطر داخلی ۴۰ میلیمتر در دماهای ورودی مختلف ۱۰۲
جدول ۵-۳ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با دمای ورودی ۵۷۳,۱۵ درجه‌ی کلوین در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۰۹
جدول ۵-۴ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با دمای ورودی ۶۲۳,۱۵ درجه‌ی کلوین در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۱۰
جدول ۵-۵ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با سرعت ورودی ۴ متر بر ثانیه در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۱۷
جدول ۵-۶ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با سرعت ورودی ۲ متر بر ثانیه در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۱۸
جدول ۵-۷ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با قطر داخلی ۲۰ میلیمتر در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۲۵
جدول ۵-۸ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با قطر داخلی ۵۰ میلیمتر در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۲۶
جدول ۵-۹ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با ضخامت دیواره‌ی ۲ میلیمتر در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۳۳
جدول ۵-۱۰ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با ضخامت دیواره‌ی ۴ میلیمتر در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۳۳
جدول ۵-۱۱ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با مخلوط ۴۰ درصد حجمی نیترات پتاسیم و ۶۰ درصد حجمی نیترات سدیم در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۴۰
جدول ۵-۱۲ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با مخلوط نیترات پتاسیم – نیترات سدیم با درصد حجمی برابر در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا $۱۴۰۰\frac{kW}{m^۲}$ ۱۴۱

جدول ۵-۱۳ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با مخلوط ۶۰ درصد حجمی نیترات پتاسیم و ۴۰ درصد حجمی نیترات سدیم در شارهای حرارتی ۱۰۰ تا ۱۴۰۰ $\frac{kW}{m^2}$ ۱۴۱
جدول ۵-۱۴ مشخصات لوله‌ی دریافت‌کننده با شارهای حرارتی بین ۱۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلووات بر مترمربع در کُل دیواره‌ی لوله‌ی دریافت‌کننده..... ۱۴۵
جدول ۵-۱۵ مقایسه‌ی عدد ناسلت به دست آمده از حل عددی و روابط تجربی..... ۱۵۶
جدول الف-۱ زاویه شیب بهینه هلیوستات برای جمع‌آوری ماکزیمم تابش متوسط خورشیدی ماهیانه در شهر کرمان..... ۱۵۹
جدول الف-۲ زاویه شیب بهینه هلیوستات برای جمع‌آوری ماکزیمم تابش متوسط خورشیدی فصلی در شهر کرمان..... ۱۵۹

فهرست علایم :

مساحت ..... $A\ (m^2)$
مساحت کل هلیوستات‌ها ..... $A_h\ (m^2)$
قطر داخلی لوله‌ی دریافت‌کننده ..... $D_{in}\ (m)$
قطر خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده ..... $D_{out}\ (m)$
چگالی آینه ..... DM
ضریب اصطکاک ..... f
نیروی شناوری ..... $F_i\ (N)$
نیروی حجمی ..... $F_B\ (N)$
تشعشع خارج از جو یک سطح عمودی در یک روز ..... $G_{on}\ (W/m^2)$
ثابت خورشیدی ..... $G_{sc}\ (W/m^2)$
ضریب انتقال حرارت جابجایی ..... $h\ (W/m^2.K)$
تابش مستقیم روی سطح افقی ..... $\bar{H}_b\ (MJ/m^2)$
تابش مستقیم روی سطح شیبدار ..... $\bar{H}_{b,T}\ (MJ/m^2)$
تابش پخشی روی سطح افقی ..... $\bar{H}_d\ (MJ/m^2)$
میانگین ماهیانه‌ی تشعشع خارج از جو روی سطح افقی ..... $\bar{H}_o\ (MJ/m^2)$