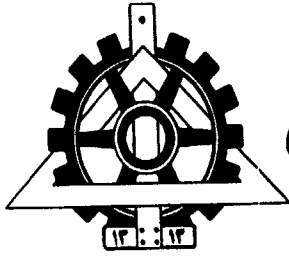


مركز
جمهوری ایران
۱۳۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا وَعَمَلًا وَإِيمَانًا وَيَقِينًا وَتَصَدِيقًا وَالْحَقْنِي بِالصَّالِحِينَ.
پروردگارا بمیزان علم و عمل و ایمان و یقین و تصدیق من بیفرا و مرا به
صالحین ملحق بفرما.

۳۰۱۷۱



دانشگاه تهران



دانشکده فنی - گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - گرایش تبدیل انرژی

مطالعه انتقال حرارت در لوله‌های آبی غشایی

بویلرهای نیروگاهی در هنگام راه‌اندازی

ارایه راه حل تحلیلی در هنگام عملکرد نرمال بویلر و
حل عددی به روش المان محدود در حالت ناپایدار

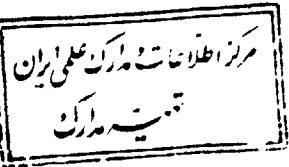
۱۳۷۹ / ۷ / ۱۰

نگارش:

عادل پیرمحمدی

استاد راهنما:

دکتر حسین شکوهمند



۳۰۱۷۱

تقدیم به:

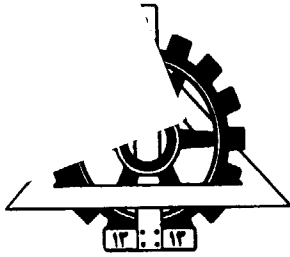
پدر و مادر عزیزم

که همیشه در تمامی مراحل زندگی یار و
یاورم هستند.

تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از خداوند متعال، در اینجا مراتب امتنان خود را نسبت به کلیه کسانی که اینجانب را در انجام این پروژه یاری نمودند ابراز می‌دارم، بخصوص لازم است سپاس ویژه خود را نسبت به استاد گرامی جناب آقای دکتر حسین شکوهمند به خاطر کمک‌های با ارزش و انتقادات و پیشنهادات ارزنده و بی‌شائبه ایشان در رابطه با پروژه ابراز دارم. همچنین از جناب آقای دکتر کهربائیان و جناب آقای دکتر رئیسی که داوری این پروژه را به عهده داشتند و قبول زحمت فرمودند، قدردانی می‌نمایم.

این پروژه با همکاری گروه پژوهشی مکانیک - پژوهشگاه نیرو انجام شد، لذا در همین جا از زحمات جناب آقای مهندس محمدقادری (مدیر پروژه عیب‌یابی بویلر) و جناب آقای مهندس فرهاد خسروی (از کارشناسان پژوهشی آن پژوهشگاه) کمال تشکر را دارم. بسیاری از دوستان، مرا در انجام پروژه یاری نمودند، مخصوصاً از آقای مهندس کریم فرزانه، آقای مهرداد رجبی (از دانشجویان دوره دکتری گروه مهندسی مکانیک) و آقایان علی عدالت، هادی محمدی (از همکلاسی‌های دوره کارشناسی ارشد اینجانب)، که کمک‌های شایانی کردند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم



دانشگاه تهران



دانشکده فنی - گروه مهندسی مکانیک

مطالعه انتقال حرارت در لوله‌های آبی غشایی بویلرهای نیروگاهی در هنگام راه‌اندازی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

از این پایان‌نامه در تاریخ ۷۹/۵/۱۸ در مقابل هیأت داوران دفاع بعمل آمد و مورد
تصویب قرار گرفت.

محل امضاء

78514

۱- سرپرست کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده

۲- مدیر گروه آموزشی: دکتر سید احمد نوربخش

۳- نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر منصور نیکخواه بهرامی

۴- استاد راهنما: دکتر حسین شکوهمند

۵- عضو هیأت داوران: دکتر احمد کهربائیان

۶- عضو هیأت داوران: دکتر مهرداد رئیسی



۷۹/۵/۱۸
مهررداد رئیسی

مطالعه انتقال حرارت در لوله‌های آبی غشایی بویلرهای نیروگاهی در هنگام راه‌اندازی

نام و نام خانوادگی: عادل پیرمحمدی

رشته تحصیلی و گرایش: مکانیک - تبدیل انرژی

گروه: مهندسی مکانیک

تاریخ دفاع: ۷۹/۵/۱۸

استاد راهنما: دکتر حسین شکوهمند

چکیده

در این پروژه انتقال حرارت هدایت پایدار و ناپایدار در مجموعه لوله‌های آبی بویلرهای نیروگاهی، که متشکل از لوله به همراه پره و جوش است در ناحیه‌ای از کوره که لوله‌ها مستقیماً در مقابل شعله قرار می‌گیرند و بیشترین شار حرارتی را دریافت می‌کنند، بصورت دو بعدی مطالعه شده است. دیواره محفظه کوره بویلر توسط لوله‌های آبی پوشیده می‌شود. طریقه قرار گرفتن لوله‌ها و عایق کاری دیواره به صورت‌های مختلف امکان پذیر است. بویلرهای مدرن امروزی ترکیبی از لوله‌های عمودی را با پره‌های طولی به صورت دیواره‌های آبی یکپارچه یا غشایی (Membrane Water Wall) بکار گرفته‌اند. ساختمان این دیواره‌ها از یک سری لوله‌های عمودی تشکیل شده است که توسط یک نوار فلزی به یکدیگر متصل شده‌اند و غشاء پیوسته‌ای را تشکیل داده‌اند. این نوع ترکیب بندی لوله‌ها دارای مزایای زیادی نسبت به سایر ترکیب بندی مورد استفاده در بویلرهای قدیمی دارد. یک طرف این لوله‌ها در معرض شار حرارتی است و طرف دیگر آنها کاملاً عایق کاری می‌شود. داخل لوله‌های آبی غشایی مخلوط آب و بخار جریان می‌یابد. در هنگام عملکرد بویلر در بار نامی، درجه حرارت سیال داخل لوله‌ها معمولاً ثابت باقی می‌ماند که درجه حرارت آن، درجه حرارت اشباع مربوط به فشار مخلوط دو فازی است. لوله‌های آبی غشایی بدلیل آنکه مستقیماً در مقابل شعله قرار دارند، بیشترین حرارت را از طریق تشعشع دریافت می‌کنند. نحوه توزیع شار حرارتی در سطح بیرونی لوله و پره می‌تواند با استفاده از ضرایب دید مربوط به هر یک از نقاط نسبت به سطح کوره، بدست آورد. در این پروژه نیز نحوه توزیع شار حرارتی با محاسبه ضرایب دید، بدست می‌آید و در حل تحلیلی مسأله (بدون در نظر گرفتن ناحیه جوش)، ضریب دید در روی لوله با یک جمله کسینوسی و در روی پره به وسیله یک چند جمله‌ای برازش می‌شود. این ضرایب در شرط مرزی بیرون لوله و پره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در هنگام راه‌اندازی (Startup) بویلر و قبل از رسیدن به بار نامی، لوله‌ها تحت تأثیر شدید شعله می‌باشند. بنابراین مطالعه دقیق و بررسی کامل نحوه توزیع دما، تنش‌های مکانیکی و حرارتی الزامی است. بررسی توزیع دما در جداره دیواره‌های آبی بویلر در هنگام شروع به کار آن از این جهت دارای اهمیت است که در این بررسی‌ها نقاط بحرانی و آسیب‌پذیر شناسایی شده و در طراحی لوله‌های آبی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در هنگام راه‌اندازی بویلر، تغییرات فشار سیستم و توزیع درجه حرارت در جداره لوله تابعی از زمان است. با توجه به تحت فشار بودن لوله‌ها، بالارفتن دما باعث به وجود آمدن نقاط سرد و گرم و توزیع غیر یکنواخت دما در لوله‌ها می‌شود و این مسأله باعث تأثیرپذیری آنها از تنش‌های حرارتی (بخصوص در هنگام راه‌اندازی) خواهد شد. طراحی بویلرها باید طوری باشد که علاوه بر جذب حداکثر شار حرارتی داخل کوره، توزیع دمای یکنواختی برای دیواره ایجاد شود تا از بروز تنش‌های حرارتی شدید جلوگیری بعمل آید. فشار داخل لوله‌ها که مربوط به فشار مخلوط آب و بخار است زیاد است، بنابراین می‌بایست در شرایط مختلف بهره‌برداری این لوله‌ها از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشند.

در این پروژه علاوه بر حل تحلیلی (بدون در نظر گرفتن جوش) در حالت پایدار، ناحیه جوش نیز در ترکیب لوله‌های آبی در نظر گرفته شده است. معادله انتقال حرارت فوریه در حالت ناپایدار (به هنگام روشن نمودن بویلر) با استفاده از روش عددی اجزاء محدود (Finite Element Method) حل شده و اثرات مختلف طراحی از جمله ضخامت لوله، پره و گام لوله‌ها، زاویه جوش و چگونگی راه‌اندازی مورد بررسی قرار گرفته است.

فهرست مطالب

فصل اول- انواع بویلر و نحوه چرخش آب و بخار

۲	۱- مقدمه
۴	۱-۱- تاریخچه بویلر
۴	۲-۱- معرفی انواع بویلر
۵	۱-۲-۱- بویلرهای با سوخت فسیلی
۷	۳-۱- تقسیم بندی نواحی حرارتی داخل کوره
۱۰	۴-۱- بررسی ساختمان دیواره‌های آبی
۱۴	۵-۱- چرخش در بویلر
۲۰	۱-۵-۱- بررسی بویلرهای با چرخش اجباری و معایب و مزایای آنها
۲۱	۱-۱-۵-۱- مزایای بویلرهای با چرخش اجباری
۲۳	۲-۱-۵-۱- معایب بویلرهای با چرخش اجباری
۲۴	۳-۱-۵-۱- فشار فوق بحرانی
۲۷	۴-۱-۵-۱- اثر تغییرات شار حرارتی بر عملکرد بویلرهای یکبارگذر فوق بحرانی
۲۷	۵-۲-۱- بررسی بویلرهای با چرخش طبیعی

فصل دوم- استارت بویلر

۳۳	۱-۲- مقدمه
۳۵	۲-۲- استارت سرد بویلر

فصل سوم- ملاحظات تئوری و معادلات حاکم بر مسئله

۴۳	۱-۳- مقدمه
۴۶	۲-۳- فرضیات
۴۷	۳-۳- معادلات حاکم بر مسئله
۴۷	۱-۳-۳- ناحیه لوله
۴۸	۲-۳-۳- ناحیه جوش
۴۹	۳-۳-۳- ناحیه پره

فصل چهارم - بررسی شرایط مرزی

- ۱-۴-۱- شرط مرزی شار حرارتی ۵۲
- ۱-۴-۱-۱- توزیع شار حرارتی بر روی محیط بیرونی لوله‌های آبی غشائی ۵۳
- ۱-۴-۱-۱-۱- ضریب دید دو سطح سیاه نسبت به یکدیگر ۵۴
- ۱-۴-۱-۱-۲- محاسبه ضریب شکل بین دو المان dA_1 و dA_2 در روی نوار باریک موازی ۶۰
- ۱-۴-۱-۱-۳- ضریب شکل مابین دو سطح باریک و بلند موازی ۶۲
- ۱-۴-۱-۱-۴- ضریب شکل یک صفحه با طول زیاد و عرض مشخص نسبت به یک سطح باریک و بلند ۶۲
- ۱-۴-۱-۱-۵- محاسبه ضریب دید روی لوله‌های آبی با در نظر گرفتن ناحیه جوش ۶۳
- ۱-۴-۱-۱-۶- ضریب دید در لوله‌های بدون پره (لوله‌های مماس) ۶۸
- ۱-۴-۲- نحوه توزیع شار حرارتی در امتداد ارتفاع کوره ۷۷
- ۱-۴-۲-۱- مشعل‌های افقی ۷۱
- ۱-۴-۲-۲- مشعل‌های عمودی ۷۲
- ۱-۴-۲-۳- مشعل‌های مماسی ۷۲
- ۱-۴-۳- نتایج بدست آمده از آزمایش در مصرف سوخت گاز طبیعی و مازوت ۷۶
- ۱-۴-۲- شرط مرزی عایق ۷۸
- ۱-۴-۲-۱- عایق کاری بویلر ۷۹
- ۱-۴-۳- شرط مرزی جابجائی ۸۰
- ۱-۴-۳-۱- آشنائی بانواحی مختلف در جریان سیال دوفازی ۸۰
- ۱-۴-۳-۲- انتقال حرارت جریان دو فازی ۸۸
- ۱-۴-۳-۳- جوشش مادون اشباع ۸۸
- ۱-۴-۳-۲-۳- جوشش اشباع ۹۹
- ۱-۴-۴- شار حرارتی بحرانی ۱۰۵
- ۱-۴-۴-۱- ناحیه مادون اشباع (کیفیت پایین بخار) ۱۰۶
- ۱-۴-۴-۲- شار حرارتی بحرانی در جوشش با کیفیت بخار بالا (جریان حلقوی) ۱۰۷
- ۱-۴-۴-۳- شرایط بحرانی در لوله‌های لوله‌های آبی ۱۰۹

فصل پنجم - مشخصات نیروگاه شهید رجایی

- ۱-۵-۱- بویلر نیروگاه شهید رجایی ۱۱۳
- ۱-۵-۱-۱- ساختمان بویلر نیروگاه شهید رجایی ۱۱۴
- ۱-۵-۱-۱-۱- اکونومایزر ۱۱۴
- ۱-۵-۱-۱-۲- درام ۱۱۶
- ۱-۵-۱-۱-۳- کوره ۱۱۹

- ۱۲۲..... سوپر هیترها ۴-۱-۱-۵
- ۱۲۴..... ری هیتر ۵-۱-۱-۵
- ۱۲۷..... مشخصات طراحی بویلر نیروگاه شهید رجائی ۲-۱-۵

فصل ششم - مدل سازی و حل مسأله

- ۱۳۲..... ۱-۶- تولید شبکه
- ۱۴۲..... ۲-۶- حل تحلیلی مسأله در حالت پایدار (عملکرد نرمال بویلر)
- ۱۴۷..... ۱-۲-۶- حل ناحیه لوله
- ۱۵۰..... ۲-۲-۶- حل ناحیه پره

فصل هفتم - نتایج و پیشنهادها

- ۱۵۹..... ۱-۷- مقایسه نتایج مربوط به حل تحلیلی و عددی
- ۱۶۴..... ۲-۷- اثر ضخامت لوله
- ۱۶۹..... ۳-۷- اثر طول و ضخامت پره
- ۱۷۲..... ۴-۷- بررسی فاصله زمانی روشن نمودن مشعلها

ضمیمه الف- روش عددی المان محدود ۱۷۵.....

فهرست اشکال

۱- فصل اول

- ۱-۱- نحوه توزیع شارحرارتی بر روی محیط لوله آبی ۸
- ۱-۲- توزیع شار حرارتی در راستای ارتفاع کوره ۹
- ۱-۳- ساختمان انواع لوله‌های آبی ۱۱
- ۱-۴- اجزاء اصلی بویلر و مدار چرخش سیال عامل ۱۶
- ۱-۵- شماتیک تولید بخار در انواع بویلرها ۱۶
- ۱-۶- اثر بار بویلر بر دبی جرمی در بویلرها ۱۹
- ۱-۷- مقایسه اندازه لوله‌های آبی در بویلرهای با چرخش طبیعی و اجباری ۱۹
- ۱-۸- اختلاف دانسیته در چرخش طبیعی ۲۵
- ۱-۹- شبیه سازی بویلر یکبارگذر ۲۵
- ۱-۱۰- بویلر یکبار گذر از نوع بنسون ۲۸
- ۱-۱۱- دمای دیواره و سیال عامل در لوله‌های بویلرهای یکبارگذر (فشارمافوق بحرانی) ۲۸
- ۱-۱۲- رابطه بین چرخش در یک دیگ بخار (در یک فشار مشخص) و مقدار بخار تولید شده ۳۱

۲- فصل دوم

- ۱-۲- عملکرد بویلر در حالت‌های مختلف ۳۴
- ۲-۲- منحنی استارت بویلر نیروگاه منتظر قائم ۳۸
- ۳-۲- نمودار راه‌اندازی بویلر نیروگاه منتظر قائم کرج ۳۹
- ۴-۲- راه‌اندازی بویلر پس ۵۵ ساعت توقف ۴۱
- ۵-۴- راه‌اندازی بویلر پس از ۸ ساعت توقف ۴۱

۳- فصل سوم

- ۳-۱- مقطع لوله‌های آبی غشائی ۴۴

۴- فصل چهارم

- ۴-۱- نمایش اجزاء سطحی برای محاسبه ضریب شکل..... ۵۵
- ۴-۲- الف) زاویه سطحی، ب) زاویه فضایی..... ۵۵
- ۴-۳- زاویه فضایی احاطه شده توسط dA_n در روی یک نقطه روی dA_1 در مختصات کروی..... ۵۷
- ۴-۴- تصویر جزء dA_1 عمود بر مسیر تابش..... ۵۷
- ۴-۵- نمایش دستگاه مختصات کروی برای محاسبه ضریب شکل..... ۵۷
- ۴-۶- محاسبه ضریب دید بین دو المان در روی دو نوار باریک و بلند موازی..... ۶۱
- ۴-۷- محاسبه ضریب دید بین یک سطح باریک و بلند و یک سطح بلند با عرض مشخص با محورهای موازی..... ۶۱
- ۴-۸- محاسبه ضریب دید، الف) بر روی لوله، ب) بر روی جوش، ج) بر روی پره..... ۶۴
- ۴-۹- ضریب دید بین سطح باریک و بلند و صفحه با طول بی‌نهایت..... ۶۷
- ۴-۱۰- ضریب دید روی لوله، پره و جوش در دو حالت زاویه جوش ۳۰ و بدون در نظر گرفتن جوش..... ۶۷
- ۴-۱۱- محاسبه ضریب دید در لوله های مماس..... ۶۹
- ۴-۱۲- تغییرات ضریب دید بر روی لوله های صاف (مماس)..... ۷۰
- ۴-۱۳- توزیع شار حرارتی در قسمت وسط ارتفاع لوله های دیواره ای..... ۷۱
- ۴-۱۴- اثر چرخش مجدد گازهای حاصل از احتراق بر توزیع شار حرارتی در بارهای مختلف..... ۷۴
- ۴-۱۵- اثر زاویه مشعل ها بر بازده بویلر در شارهای حرارتی مختلف..... ۷۵
- ۴-۱۶- رابطه تقریبی مابین دمای گازهای خروجی از دودکش و انرژی آزاد شده در سوخت های مختلف..... ۷۷
- ۴-۱۷- نواحی انتقال حرارت در جوشش جابجائی..... ۸۱
- ۴-۱۸- تغییرات درجه حرارت در مسیر حرکت آب و بخار بویلرها..... ۸۳
- ۴-۱۹- تغییرات ضریب انتقال حرارت در مقابل کیفیت، در شارهای مختلف..... ۸۷
- ۴-۲۰- تغییرات درجه حرارت سطح و سیال عامل در جوشش مادون اشباع..... ۹۰
- ۴-۲۱- منحنی جوشش مادون اشباع..... ۹۰
- ۴-۲۲- مدل Bowring..... ۹۷
- ۴-۲۳- مدل Bowring، اثر مادون اشباع بودن سیال بر تغییرات شار حرارتی تک فاز..... ۹۸

- ۱۰۱-۴-۲۴- تشکیل هسته در فیلم مایع.....
- ۱۰۴-۴-۲۵- تغییرات ضریب F در تقریب Chen.....
- ۱۰۴-۴-۲۶- تغییرات ضریب اصلاح S.....
- ۱۰۶-۴-۲۷- شرایط بحرانی در لوله های آبی.....
- ۱۰۸-۴-۲۸- مکانیزم شار حرارتی بحرانی در ناحیه مادون اشباع و کیفیت پائین.....
- ۱۱۰-۴-۲۹- توزیع شار حرارتی در لوله های بدون پره و چرخش سیال.....
- ۱۱۱-۴-۳۰- نحوه توزیع شار حرارتی در لوله های آبی، الف) پره دار، ب) بدون پره.....

۵- فصل پنجم

- ۱-۵- ابعاد بویلر نیروگاه شهید رجایی و نحوه قرارگرفتن اکونومایزر، سوپرهیستر، ری هیتر و درام در آن..... ۱۱۵
- ۲-۵- نحوه نگهداری اکونومایزر اولیه..... ۱۱۷
- ۳-۵- نحوه نگهداری اکونومایزر ثانویه..... ۱۱۸
- ۴-۵- جداکننده افقی..... ۱۱۸
- ۵-۵- خشک کن بخار..... ۱۲۰
- ۶-۵- ساختمان کوره بویلر و نحوه عایق کاری آن..... ۱۲۰
- ۷-۵- تغییرات دمای بخار سوپرهیترهای تشعشعی و جابجایی برحسب درصد بخار خروجی..... ۱۲۳
- ۸-۵- نحوه قرارگیری دی سوپرهیترهای اولیه و ثانویه..... ۱۲۵

۶- فصل ششم

- ۱-۶- لوله آبی غشائی و شرایط مرزی آن..... ۱۳۳
- ۲-۶- شبکه بندی ناحیه لوله، پره و جوش با الف) المان های مثلثی ب) المان های چهارضلعی..... ۱۳۵
- ۳-۶- محاسبه مختصات المان های چهارضلعی..... ۱۳۶
- ۴-۶- تولید شبکه در قسمت جوش..... ۱۳۹
- ۵-۶- مقطع لوله آبی غشائی..... ۱۴۳
- ۶-۶- محاسبه ضریب دید بر روی، الف) لوله، ب) پره..... ۱۵۰
- ۷-۶- خطوط همدمای در روش تحلیلی، الف) پره، ب) لوله..... ۱۵۳

۷- فصل هفتم

- ۱-۷ مشخصات هندسی لوله‌های آبی نیروگاه شهید رجایی..... ۱۵۷
- ۲-۷ نمودار راه‌اندازی بویلر نیروگاه شهید رجایی..... ۱۵۸
- ۳-۷ تغییرات ضریب شکل بر روی لوله و پره، الف) محاسبات دقیق، ب) تقریب..... ۱۶۰
- ۴-۷ مقایسه روش تحلیلی و عددی، دمای الف) سطح خارجی لوله، ب) سطح داخلی لوله..... ۱۶۱
- ۵-۷ مقایسه دمای سطح بیرونی پره در دو روش عددی و تحلیلی..... ۱۶۲
- ۶-۷ خطوط همدمای در روش عددی، بدون ناحیه جوش..... ۱۶۲
- ۷-۷ خطوط همدمای در روش تحلیلی، الف) پره، ب) لوله..... ۱۶۳
- ۸-۷ خطوط همدمای در حالت زاویه جوش ۴۵ درجه..... ۱۶۳
- ۹-۷ اثر زاویه جوش بر دمای سطح خارجی لوله..... ۱۶۳
- ۱۰-۷ تغییرات درجه حرارت سطح: الف) داخلی، ب) خارجی - ۱: پایان مرحله دوم، ۲: پایان مرحله سوم، ۳: پایان مرحله چهارم..... ۱۶۵
- ۱۱-۷ تغییرات درجه حرارت سطح: الف) داخلی، ب) خارجی، در پایان مرحله چهارم راه‌اندازی و ضخامت‌های مختلف..... ۱۶۵
- ۱۲-۷ تغییرات دمای تاج لوله و نوک پره در طول راه‌اندازی در ضخامت‌های مختلف لوله..... ۱۶۶
- ۱۳-۷ اختلاف دمای تاج و سطح داخلی لوله در طول راه‌اندازی در ضخامت‌های مختلف لوله..... ۱۶۷
- ۱۴-۷ توزیع دما در پایان مرحله چهارم راه‌اندازی (ضخامت لوله ۱۲ میلیمتر)..... ۱۶۷
- ۱۵-۷ دمای تاج لوله در مرحله سوم راه‌اندازی و ضخامت‌های مختلف لوله..... ۱۶۸
- ۱۶-۷ اثر تغییرات ضخامت پره، الف) دمای داخلی لوله، ب) دمای سطح بیرونی لوله..... ۱۶۹
- ۱۷-۷ اثر کاهش ضخامت پره، در زوایای جوش مختلف..... ۱۷۰
- ۱۸-۷ اثر ضخامت پره بر تغییرات ضریب دید..... ۱۷۱
- ۱۹-۷ اثر ضخامت پره بر دمای نوک پره در طول راه‌اندازی..... ۱۷۱
- ۲۰-۷ تغییرات دمای سطح بیرونی لوله در پایان مرحله چهارم راه‌اندازی با طول‌های مختلف پره..... ۱۷۱
- ۲۱-۷ تغییرات دمای نوک پره در کل مرحله سوم راه‌اندازی ۲۰ دقیقه با طول‌های مختلف پره..... ۱۷۳
- ۲۲-۷ تغییرات دمای تاج لوله و نوک پره در مرحله سوم..... ۱۷۳

ضمیمه

- الف-۱- هدایت حرارتی در میله‌های بطول L ۱۷۷
- الف-۲- تقسیم ناحیه به گره‌های المان محدود ۱۷۸
- الف-۳- تقریب خطی میدان دما ۱۷۹
- الف-۴- مش‌بندی میله ۱۸۱
- الف-۵- توابع شکل و میدان دمای خطی ۱۸۲
- الف-۶- المان مستطیلی چهار نقطه‌ای ۱۸۵
- الف-۷- المان ۸ نقطه‌ای درجه دو ۱۸۷
- الف-۸- مختصات ξ و η برای المان مستطیلی ۱۸۹
- الف-۹- مختصات طبیعی ۱۹۱
- الف-۱۰- المان‌های با مرزهای منحنی الخط در مش بندی ناحیه استوانه‌ای ۱۹۷
- الف-۱۱- مش بندی ناحیه با استفاده از المان‌های مثلثی ۱۹۹
- الف-۱۲- المان مثلثی در مختصات کارتیزین ۲۰۰
- الف-۱۳- سیستم مختصات سطح (طبیعی) ۲۰۱
- الف-۱۴- مختصات سطح در المان‌های خطی ۲۰۲

علائم اختصاری:

حروف انگلیسی

تعداد گره‌ها در امتداد زاویه	n_3	نصف عرض پره (m)	b
$\omega + \alpha < \theta < \omega + \alpha + \beta$			
فشار (pa)	p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg^{\circ}C$)	c_p
عدد پراوتل	pr	قطر خارجی و داخلی لوله (m)	d_i, d_o
حرارت منتقل شده (W)	Q	شتاب جاذبه (m/sec^2)	g
شار حرارتی (W/m^2)	q	سرعت جرمی (kg/m^2s)	G
شعاع بی‌بعد	r	انتالپی تبخیر مایع به بخار (kJ/kg)	h_{lg} یا h_{fg}
شعاع (m)	r'	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2^{\circ}C$)	h
شعاع داخلی بی‌بعد (R_i/R_o)	r_i	ضریب انتقال حرارت بدون بعد (k_f/k_t)	K
شعاع خارجی و داخلی لوله (m)	R_i, R_o	ضریب انتقال حرارت هدایتی پره ($W/m^{\circ}C$)	k_f
عدد رینولدز	Re	ضریب انتقال حرارت هدایتی لوله ($W/m^{\circ}C$)	k_t
گام لوله‌ها	S_T	ضریب انتقال حرارت هدایتی جوش ($W/m^{\circ}C$)	k_w
دمای بی‌بعد	T	نصف طول پره (m)	l
دما ($^{\circ}C$)	T'	دبی جرمی (kg/sec)	\dot{m}
دمای سیال ($^{\circ}C$)	T_{∞}	تعداد گره‌ها در امتداد شعاع لوله	M_1
مربوط به سطح داخلی لوله	i	تعداد گره‌ها در امتداد پره	M_4
مربوط به حالت مایع	f یا l	زمان (sec)	t
بردار عمود بر سطح	n	دستگاه مختصات کارتزین بی‌بعد	x, y
جوشش هسته‌ای	NB	دستگاه مختصات کارتزین با بعد	x', y'
		تعداد گره‌ها در امتداد زاویه $0 < \theta < \omega$	n_1
		تعداد گره‌ها در امتداد زاویه $\omega < \theta < \omega + \alpha$	n_2