



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک

عنوان:

شبیه سازی نرم افزاری

جهت پیش بینی خواص ترمودینامیکی سیال عامل در سیستم های کرایجنیکی

گردآورنده:

غلامحسن برزگر ابراهیمی

استاد راهنما:

دکتر سید مجتبی موسوی نائینیان

بهمن ۱۳۹۰

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: غلامحسن برزگر ابراهیمی

را با عنوان:

شبیه سازی نرم افزاری جهت پیش بینی خواص ترمودینامیکی سیال عامل در سیستم های

کرایجنیکی

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی / کارشناسی ارشد

تأیید می کند.

| امضاء | رتبه علمی | نام و نام خانوادگی | اعضای هیئت داوران |
|-------|-----------|--------------------|-------------------|
| | | | ۱- استاد راهنما |
| | | | ۲- استاد ممتحن |
| | | | ۳- استاد ممتحن |

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه: شبیه سازی نرم افزاری جهت پیش بینی خواص ترمودینامیکی سیال عامل در

سیستم های کرایجنیکی

استاد راهنما: دکتر سید مجتبی موسوی نائینیان

نام دانشجو: غلامحسن برزگر ابراهیمی

شماره دانشجوئی: ۸۸۰۱۸۸۴

اینجانب غلامحسن برزگر ابراهیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

حق چاپ، تکثیر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها باموافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم بابوسه بردستان پدر و مادرم:

مادرم، آنکه آفتاب مهرش در آستانه قلمم، به چرخان پیر جاست و هرگز غروب نخواهد کرد.

پدرم، به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی و سخاوتش.

پدرم راه تمام زندگیت

مادرم دنجوشی همشگیت

و تقدیم به همسر مهربانم که با صبرش در تمامی سختات، رفیق راه بود.

تقدیر و تشکر:

حمد و سپاس خداوند متعال را که به انسان حکمت و دانش آموخت تا خود را بشناسد آنگاه خدای خود را. خدای را سپاس می‌گوییم که در دوران تحصیل خود از نعمت اخلاق، تجربه و دانش استاد ارجمند جناب آقای دکتر سید مجتبی موسوی نائینیان بهره‌های فراوان بردم. نقطه نظرات جامع و کلیدی ایشان در جای جای این تحقیق، نحوه فکر کردن و رویارویی صبورانه با مسائل علمی را به من آموخت. از خداوند منان آرزوی موفقیت در تمامی مراحل زندگی برای ایشان خواستارم. همچنین از جناب آقای دکتر مصطفی مافی که همواره با صبر و متانت خاص خودشان بنده را راهنمایی نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و از خداوند متعال آرزوی توفیق روزافزون ایشان را خواستارم.

چکیده

با وجود این که فن‌آوری‌های معمول تبرید و فن‌آوری سرمایه‌های کرایجنیک به لحاظ ترمودینامیکی دارای یک اساس و ریشه مشترک می‌باشند، اما برای برآورده کردن نیازهای متفاوت توسعه یافته‌اند. البته تفاوت بارز این دو مقوله محدوده دمایی کاربرد آن‌ها می‌باشد. در صنعت، فرایندهای بسیاری وجود دارند که تمام یا بخشی از آن‌ها، در زیر دمای محیط انجام می‌گیرد که به سرمایه‌های کرایجنیک معروف است. پایه محاسبات در سیکل‌های سرمایه‌های کرایجنیک، دانستن خواص ترمودینامیکی مبردهای مورد استفاده در آنها می‌باشد. با این که جداول ترمودینامیکی مختلفی برای مبردها موجود می‌باشد اما در طراحی سیستم‌های سرمایه‌های ضروری به نظر می‌رسد که خواص ترمودینامیکی این مبردها به کمک نرم‌افزاری به صورت دقیق تخمین زده شود. استفاده از معادلات حالت، همواره روش موثری برای مطالعه خواص ترمودینامیکی مبردها بوده است. تاکنون، معادلات حالت مختلفی برای پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی مبردها ارائه شده است که از معادلات ساده اولیه با تعداد پارامترهای کمتر و دقت پایین شروع شده و به معادلات جدید پیچیده‌تر با دقت بالا ختم شده است. در معادلات حالت اولیه، فشار تابعی از متغیرهای دیگر بود و به همین علت به معادلات فشارصریح معروف بودند اما معادلات جدید به صورت تابع صریح انرژی هلمهولتز بیان می‌شوند. این معادلات با این که پیچیده‌تر از معادلات فشارصریح می‌باشند، اما به دلیل داشتن ثابت‌های تجربی بیشتر، از دقت بالاتری در محاسبه خواص ترمودینامیکی سیالات برخوردار هستند.

در این تحقیق، از یک فرم عمومی برای معادلات حالت بر مبنای تابعیت صریح انرژی هلمهولتز استفاده شده است. مزیت آن این است که مانند معادلات فشارصریح، نیاز به انتگرال‌گیری نیست و می‌توان با دیفرانسیل‌گیری، خواص ترمودینامیکی را با دقت بالا در محدوده دمایی گسترده‌ای استخراج کرد. پارامترهای فرم ساده شده این معادله حالت بنیادی، در دماهای مختلف مشخص، بر روی دو سیال کرایجنیک نیتروژن و هلیوم اعمال گردیده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که این فرم مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارد. طبق محاسبات انجام‌گرفته، میزان خطا در محاسبه آنتالپی و آنتروپی با استفاده از معادله حالت ارائه شده بسیار پایین بوده و در مقایسه با مراجع، نتایج مطلوبی حاصل شده است. طبق نتایج نهایی این کار می‌توان اظهار داشت که معادله حالت عمومی ارائه شده، زمانیکه برای محاسبه خواص ترمودینامیکی سیالات کرایجنیک استفاده می‌شود، دارای کارایی بالایی می‌باشد. ارائه یک نرم‌افزار جهت پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی مبردها به کمک این معادلات حالت به‌منظور استفاده در صنایع فرایندی دمپائین، دستاورد اصلی تحقیق حاضر می‌باشد.

کلمات کلیدی: فرایند دمپائین، سرمایه‌های کرایجنیک، مبردهای کرایجنیک، معادلات حالت بنیادی، خواص

ترمودینامیکی

فهرست مطالب

| | | |
|----|--|---------|
| ۱۴ | فصل اول: مقدمه | ۱ |
| ۱۵ | تعریف مسئله | ۱-۱ |
| ۱۶ | کرایجنیک و حوزه‌های کاربرد آن | ۲-۱ |
| ۱۷ | مشکلات روش‌های سرماسازی کرایجنیک | ۳-۱ |
| ۱۸ | کاربرد علم کرایجنیک | ۴-۱ |
| ۲۲ | پیشینه پژوهش | ۵-۱ |
| ۲۴ | اهداف تحقیق حاضر | ۶-۱ |
| ۲۵ | رئوس مطالب تحقیق | ۷-۱ |
| ۲۷ | فصل دوم: انتخاب مبردها | ۲ |
| ۲۸ | تاریخچه مبردها | ۱-۲ |
| ۲۹ | تغییرات در روند انتخاب مبردها | ۲-۲ |
| ۳۰ | تخریب لایه ازن | ۱-۲-۲ |
| ۳۰ | تغییرات آب وهوایی | ۲-۲-۲ |
| ۳۱ | مبردهای ایده‌آل | ۳-۲ |
| ۳۱ | معیارهای انتخاب | ۴-۲ |
| ۳۲ | دسترس پذیری | ۱-۴-۲ |
| ۳۳ | بازدهی | ۲-۴-۲ |
| ۳۴ | سمیت | ۳-۴-۲ |
| ۳۵ | اشتعال پذیری | ۴-۴-۲ |
| ۳۷ | خواص و کاربردهای صنعتی نیتروژن و هلیوم | ۵-۲ |
| ۴۰ | فصل سوم: انتخاب معادله حالت مناسب | ۳ |
| ۴۲ | معادلات حالت فشار صریح | ۱-۳ |
| ۴۲ | معادلات حالت اولیه | ۱-۱-۳ |
| ۴۲ | معادله حالت گاز ایده‌آل | ۱-۱-۳ |
| ۴۲ | معادله حالت ویریال | ۲-۱-۳ |
| ۴۳ | معادلات حالت کوپیک | ۲-۱-۳ |
| ۴۳ | معادله حالت واندروالس | ۱-۲-۱-۳ |
| ۴۴ | معادله حالت پنگ-رابینسون | ۲-۲-۱-۳ |
| ۴۵ | معادله حالت سواو-ردلیچ-وانگ | ۳-۲-۱-۳ |
| ۴۵ | معادله حالت بندیکت-وب-روبین | ۳-۱-۳ |
| ۴۶ | معادله حالت لی-کسلر | ۴-۱-۳ |
| ۴۷ | معادلات حالت جدید با تابعیت انرژی هلمهولتز | ۲-۳ |

| | | |
|-----------|---|----------|
| ۴۹ | معادلات حالت بنیادی | ۳-۲-۱ |
| ۵۰ | معادلات کمکی | ۲-۲-۳ |
| ۵۰ | معادلات کمکی فشار بخار | ۳-۲-۱ |
| ۵۱ | معادلات کمکی فشار مایع متراکم | ۲-۲-۳ |
| ۵۱ | معادلات کمکی چگالی مایع اشباع | ۳-۲-۳ |
| ۵۲ | معادلات کمکی چگالی بخار اشباع | ۴-۲-۳ |
| ۵۲ | معادلات کمکی ظرفیت گرمایی گاز ایده آل | ۵-۲-۳ |
| ۵۴ | محاسبه آنتالپی، آنترופی، ظرفیت گرمای ویژه حجم ثابت و ظرفیت گرمای ویژه فشار ثابت نیتروژن و هلیوم | ۳-۳ |
| ۵۴ | خواص ترمودینامیکی نیتروژن | ۱-۳-۳ |
| ۵۹ | خواص ترمودینامیکی هلیوم | ۲-۳-۳ |
| ۶۱ | روابط مشتق جزئی برای محاسبه خواص ترمودینامیکی | ۳-۳-۳ |
| ۶۳ | فصل چهارم: نتایج و صحت سنجی | ۴ |
| ۶۴ | خواص ترمودینامیکی نیتروژن | ۱-۴ |
| ۶۴ | مقادیر خواص ترمودینامیکی نیتروژن در محدوده دما و فشار نمونه | ۱-۱-۴ |
| ۶۷ | صحت سنجی خواص ترمودینامیکی نیتروژن در فشار ۰.۱ مگاپاسکال | ۲-۱-۴ |
| ۷۰ | صحت سنجی خواص ترمودینامیکی نیتروژن در فشار ۵ مگاپاسکال | ۳-۱-۴ |
| ۷۲ | خواص ترمودینامیکی هلیوم | ۲-۴ |
| ۷۲ | مقادیر خواص ترمودینامیکی هلیوم در محدوده دما و فشار نمونه | ۱-۲-۴ |
| ۷۵ | صحت سنجی خواص ترمودینامیکی هلیوم در فشار ۱۰ مگاپاسکال | ۲-۲-۴ |
| ۷۷ | صحت سنجی خواص ترمودینامیکی هلیوم در فشار ۵۰ مگاپاسکال | ۳-۲-۴ |
| ۸۰ | فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات | ۵ |
| ۸۱ | نتیجه گیری | ۱-۵ |
| ۸۲ | پیشنهادات | ۲-۵ |
| ۸۳ | منابع و مراجع | ۶ |

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: واحد جداسازی هوا به روش کرایجنیکی..... ۲۱
- شکل ۲-۱: استفاده از هیدروژن و اکسیژن مایع در پیشرانش موشک‌های فضایی..... ۲۱
- شکل ۳-۱: مخزن سوخت هیدروژن مایع در اتومبیل..... ۲۲
- شکل ۱-۴: نمودار مقایسه آنتالپی نیتروژن بر حسب دما در فشار ۰.۱ مگاپاسکال..... ۶۷
- شکل ۲-۴: نمودار مقایسه آنتروپی نیتروژن بر حسب دما در فشار ۰.۱ مگاپاسکال..... ۶۸
- شکل ۳-۴: نمودار مقایسه ظرفیت گرمای ویژه حجم ثابت نیتروژن بر حسب دما در فشار ۰.۱ مگاپاسکال..... ۶۹
- شکل ۴-۴: نمودار مقایسه گرمای ویژه ایزوبار نیتروژن بر حسب دما در فشار ۰.۱ مگاپاسکال..... ۶۹
- شکل ۵-۴: نمودار مقایسه آنتالپی نیتروژن بر حسب دما در فشار ۵ مگاپاسکال..... ۷۰
- شکل ۶-۴: نمودار مقایسه آنتروپی نیتروژن بر حسب دما در فشار ۵ مگاپاسکال..... ۷۱
- شکل ۷-۴: نمودار مقایسه ظرفیت گرمای ویژه حجم ثابت نیتروژن بر حسب دما در فشار ۰.۱ مگاپاسکال..... ۷۱
- شکل ۸-۴: نمودار مقایسه گرمای ویژه ایزوبار نیتروژن بر حسب دما در فشار ۵ مگاپاسکال..... ۷۲
- شکل ۹-۴: نمودار مقایسه آنتالپی هلیم بر حسب دما در فشار ۱۰ مگاپاسکال..... ۷۵
- شکل ۱۰-۴: نمودار مقایسه آنتروپی هلیم بر حسب دما در فشار ۱۰ مگاپاسکال..... ۷۶
- شکل ۱۱-۴: نمودار مقایسه ظرفیت گرمای ویژه حجم ثابت هلیم بر حسب دما در فشار ۱۰ مگاپاسکال..... ۷۶
- شکل ۱۲-۴: نمودار مقایسه گرمای ویژه ایزوبار هلیم بر حسب دما در فشار ۱۰ مگاپاسکال..... ۷۷
- شکل ۱۳-۴: نمودار مقایسه آنتالپی هلیم بر حسب دما در فشار ۵۰ مگاپاسکال..... ۷۸
- شکل ۱۴-۴: نمودار مقایسه آنتروپی هلیم بر حسب دما در فشار ۵۰ مگاپاسکال..... ۷۸
- شکل ۱۵-۴: نمودار مقایسه ظرفیت گرمای ویژه حجم ثابت هلیم بر حسب دما در فشار ۵۰ مگاپاسکال..... ۷۹
- شکل ۱۶-۴: نمودار مقایسه ظرفیت گرمای ویژه ایزوبار هلیم بر حسب دما در فشار ۵۰ مگاپاسکال..... ۷۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مقایسه برخی خواص هلیوم و نیتروژن با آب..... ۳۷
- جدول ۱-۳: مقادیر و حدود خواص نقطه ثابت نیتروژن..... ۵۴
- جدول ۲-۳: ثابت‌های سیال نیتروژن و خواص مرجع حالت گاز ایده ال..... ۵۵
- جدول ۳-۳: ضرایب و اجزای معادله حالت بنیادی انرژی هلمهولتز برای سیال نیتروژن..... ۵۶
- جدول ۴-۳: اجزای معادله کمکی ظرفیت گرمایی گاز ایده ال ($Cp0$) نیتروژن..... ۵۷
- جدول ۵-۳: اجزای معادله کمکی فشار بخار نیتروژن..... ۵۷
- جدول ۶-۳: اجزای معادله کمکی دانسیته مایع اشباع نیتروژن..... ۵۸
- جدول ۷-۳: اجزای معادله کمکی دانسیته بخار اشباع نیتروژن..... ۵۸
- جدول ۸-۳: مقادیر و حدود خواص نقطه ثابت هلیوم..... ۵۹
- جدول ۹-۳: ثابت‌های سیال هلیوم و خواص مرجع حالت گاز ایده ال..... ۵۹
- جدول ۱۰-۳: ضرایب و اجزای معادله حالت بنیادی انرژی هلمهولتز برای سیال هلیوم..... ۶۰
- جدول ۱-۴: خواص ترمودینامیکی نیتروژن در فشار ۰.۱ مگاپاسکال..... ۶۵
- جدول ۲-۴: خواص ترمودینامیکی نیتروژن در فشار ۵ مگاپاسکال..... ۶۶
- جدول ۳-۴: خواص ترمودینامیکی نیتروژن در فشار ۱۰ مگاپاسکال..... ۷۳
- جدول ۴-۴: خواص ترمودینامیکی نیتروژن در فشار ۱۰ مگاپاسکال..... ۷۴

فهرست علائم و اختصارات

| اختصارات | |
|---|----------------|
| قابلیت تخریب لایه ازن | ODP |
| قابلیت گرمایش زمین | GWP |
| نیتروژن | N ₂ |
| هلیوم | H ₂ |
| متغیرها و پارامترها | |
| میزان بار حرارتی | Q |
| حجم | V |
| فشار | P |
| آنتروپی | S |
| آنتروپی بر واحد جرم یا مول | s |
| آنتالپی | H |
| دما | T |
| ضریب تراکم پذیری | Z |
| انرژی داخلی | U |
| انرژی هلمهولتز | A |
| ظرفیت گرمایی ویژه فشار ثابت | C_p |
| ظرفیت گرمایی ویژه حجم ثابت | C_v |
| نرخ ظرفیت گرمایی | γ |
| ثابت جهانی گازها | R |
| وزن مولکولی | M |
| انرژی گیبس | G |
| فیوگاسیته، ضریب اصطکاک | f |
| فیوگاسیته جزء i ام در مخلوط چند جزئی | f_i |
| ضریب برای δ در معادله حالت بنیادی | j |
| ضریب برای τ در معادله حالت بنیادی | i |
| تعداد ترمها در معادله حالت بنیادی | m |
| ضریب برای δ در ترمهای نمایی معادله حالت بنیادی | l |
| ضریب در معادله حالت بنیادی | N |
| سرعت صوت | W |
| عدد رینولدز | Re |
| انرژی هلمهولتز در واحد مول | a |

| | |
|---|---------------|
| نرخ ظرفیت گرمائی | CP |
| انرژی گیس در واحد مول | g |
| دمای مادون سرد شدن میرد | $T_{Subcool}$ |
| افت فشار | ΔP |
| ضریب اثر متقابل در معادله حالت پنگ - رایینسون | k_{ij} |
| ضریب اثر متقابل در معادله حالت لی - کسلر | k'_{ij} |

علائم یونانی

| | |
|-----------------------|----------|
| نرخ ظرفیت گرمایی | γ |
| انرژی هلمهولتز کاهیده | α |
| دانسیته کاهیده | δ |
| دمای کاهیده | τ |
| چگالی | ρ |
| فاکتور خروج از مرکز | ω |
| حجم مخصوص مولی | ν |

زیرنویس‌ها

| | |
|---------------------------------|----------|
| مشخصات بحرانی | c |
| حالت مرجع | 0 |
| مقطع ۱ | ۱ |
| مقطع ۲ | ۲ |
| نقطه سه گانه | trp |
| تصحیح شده | correct |
| مشخصات مربوط به مخلوط مواد خالص | m |
| حداکثر | max |
| حداقل | min |
| مقطع خروجی | out |
| مشخصات کاهیده | r |
| تابع باقیمانده | residual |
| مجموع | total |

بالانویس‌ها

| | |
|------------------------------------|-----|
| فاز گاز | G |
| فاز بخار | v |
| فاز مایع | L |
| سیال ساده در معادله حالت لی - کسلر | (O) |
| سیال مرجع در معادله حالت لی - کسلر | (R) |
| گاز ایده‌آل | * |

۱ فصل اول: مقدمه

۱-۱ تعریف مسئله

آگاهی از خواص فیزیکی مبردها در طراحی بسیاری از انواع محصولات، فرآیندها و تجهیزات صنعتی ضروری است. معادلات حالت، ابزاری قوی و مؤثر در جهت مطالعه خواص ترمودینامیکی و رفتار فازی مواد مختلف می‌باشند. این معادلات، فشار، حجم و دما را به یکدیگر ربط می‌دهند. ترمودینامیک به خودی خود نمی‌تواند خواص فیزیکی را فراهم کند، تنها نظریه مولکولی یا تجربه می‌تواند آن را انجام دهد. اما ترمودینامیک، تلاش‌های تجربی یا نظری را با رابطه بین خواص ترمودینامیکی کاهش می‌دهد.

یکی از فعالیتهای مهم در مهندسی کرایجنیک، طراحی و شبیه سازی فرآیندهای مختلف به منظور بهینه‌سازی واحدهای سرمایشی از نظر اقتصادی و عملیاتی می‌باشد. برای انجام این کار لازم است که خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیالات موجود در فرآیند مشخص باشد. برای استفاده از رایانه در شبیه سازی و طراحی فرآیندهای مختلف سرمایشی و شیمیایی نیاز به نرم‌افزاری است که قادر به محاسبه خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیالات با دقت بالا باشد. معادلات حالت، کاربرد وسیعی در تعیین خواص ترمودینامیکی مواد خالص و مخلوطها جهت محاسبات فرآیندهای سرمایشی و شیمیایی مخصوصا مواد نفتی دارند. تاکنون، معادلات حالت بسیاری ارائه شده است که از معادلات ساده اولیه با تعداد پارامترهای کمتر و دقت پایین شروع شده و به معادلات جدید پیچیده‌تر با دقت بالا ختم شده است. در معادلات حالت اولیه، فشار تابعی از متغیرهای دیگر بود و به همین علت به معادلات فشارصریح معروف بودند اما معادلات جدید به صورت تابع صریح انرژی هلمهولتز بیان می‌شوند. این معادلات با این‌که پیچیده‌تر از معادلات فشارصریح می‌باشند، اما به دلیل داشتن ثابت‌های تجربی بیشتر، از دقت بالاتری در محاسبه خواص ترمودینامیکی سیالات برخوردار هستند.

یکی از معادلات حالت معروف فشارصریح که کاربرد زیادی در نرم‌افزارهای مختلف دارد معادله حالت پنگ رابینسون می‌باشد، اما متأسفانه از دقت بالایی برخوردار نیست و این معادله در دماهای

پایین یعنی نزدیک به نقطه سه گانه و در دماهای نزدیک به نقطه بحرانی خواص ترمودینامیکی را با خطای بسیار زیادی پیش بینی می کند و یا در محدوده هایی کلا توانایی پیشگویی این خواص را ندارد.

با توجه به مطالب ذکر شده می توان دریافت که یکی از بزرگترین مشکلات در پیش بینی خواص ترمودینامیکی مواد مختلف عدم دسترسی به معادله حالتی است که بتواند در بازه وسیعی از دمای کاهیده قابل کاربرد باشد و خواص ترمودینامیکی را با دقت بالا پیش بینی کند. بر همین اساس معادله حالت جدیدی به منظور بهبود در نتایج حاصل برای محاسبه این خواص در محدوده دمایی گسترده ای پیشنهاد شده است. این معادله جدید به صورت تابع صریح انرژی هلمهولتز است و مزیت آن این است که مانند معادلات فشار صریح، نیاز به انتگرال گیری نیست و می توان با دیفرانسیل گیری، خواص ترمودینامیکی را با دقت بالا برای محدوده دمایی گسترده ای استخراج کرد. در نتیجه امکان استفاده از این معادله برای تمامی بازه دمای کاهیده فراهم شده و خطای محاسباتی نسبت به داده های تجربی بصورت بسیار چشمگیری کاهش یافته است. در فصل سه به معرفی این معادله و تشریح جزئیات آن پرداخته خواهد شد.

۲-۱ کرایجنیک و حوزه های کاربرد آن

کرایجنیک، شاخه ای از فیزیک تعریف شده است که به فرایندها در دمای بسیار پایین و اثر آن ها بر روی ماده می پردازد، که هدف آن رسیدن به درجه حرارت پایین که در روی زمین به طور طبیعی رخ نمی دهد و استفاده از آن ها را برای مطالعه طبیعت و یا صنعت انسان ضروری است. در تعریف دیگر، آن را نیز به عنوان علم و فن آوری در دمای زیر ۱۲۰ درجه کلوین می دانند. دلیل این نامگذاری را می توان با بررسی درجه حرارت کارکردی سیالات کرایجنیک درک کرد. فرایندهای خاصی که در درجه حرارت محدود به ۱۲۰ درجه کلوین اتفاق می افتد و رفتار این سیالات در عملکردشان در این محدوده دمایی، استفاده از آن ها را در تجهیزات و صنایع مختلف برودتی ضروری می نماید.

علم کرایجنیک در ارتباط با تولید و به‌کارگیری حداقل دماهایی است که در روی زمین و در فضای نزدیک زمین در شرایط طبیعی نمی‌تواند به وجود آید. فناوری کرایجنیک برای نخستین بار به منظور مایع کردن هوا توسط یک دانشمند لهستانی در سال ۱۸۸۳ به جهان معرفی گردید. این ابداع زمینه نوینی از کاربرد سیستم‌های جدید از قبیل ابررساناها را فراهم آورد. در اواسط قرن بیستم تقاضا جهت رسیدن به دماهای کرایجنیک به منظور استفاده در گستره‌ی وسیعی از کاربردها افزایش یافت. در ابتدا اکثر این کاربردها به منظور مایع سازی هوا و گازهای طبیعی در سیستم‌های بسیار بزرگ گسترش یافته بود تا این که نیاز به استفاده از کرایوکولرهای کوچک برای کاربردهای دیگر احساس شد.

مصرف گازهای مختلف صنعتی مانند اکسیژن، نیتروژن، متان (گاز طبیعی)، آرگون، هیدروژن، نئون، کریپتون و سایر گازها در بسیاری از زمینه‌های صنعتی مانند متالورژی، شیمی، مهندسی برق، مهندسی انرژی هسته‌ای، هواپیمایی، صنایع هوا و فضا، کشاورزی، داروسازی، فرآیند تغذیه و غیره به طرز چشمگیری در حال رشد است. این گازها هم به صورت مایع و هم به صورت گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند و دارای نقطه جوش پایینی در محدوده دماهای کرایجنیکی هستند. بنابراین تولید، حمل و نقل و ذخیره سازی آن‌ها کاملاً به علم کرایجنیک وابسته است و در حقیقت بخش بزرگی از این علم را تشکیل می‌دهد.

در دماهای پایین مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد و برخی از مواد در این دماها از خود ویژگی‌های ابررسانایی و ابرسیالی نشان می‌دهند. کم کردن دما منجر به کاهش آنتروپی و در نتیجه کاهش اختلالات داخلی می‌شود. لذا استفاده‌ی عملی از این پدیده می‌تواند در کنترل از راه دور ارتباطات رادیویی، فناوری‌های لیزر و مادون قرمز بسیار مفید باشد.

۳-۱ مشکلات روش‌های سرماسازی کرایجنیک

تمامی روش‌های سرماسازی کرایجنیک دارای مشکلاتی هستند که عاملی بازدارنده در بسیاری از کاربردها (مخصوصاً ابررساناها) محسوب می‌شوند. در ادامه به برخی از این مشکلات اشاره شده است:

- قابلیت اعتماد
- راندمان
- سایز و وزن
- لرزش
- اختلالات مغناطیسی
- عدم جذب رطوبت
- قیمت

تا هنگامی که هدف این گونه سرماسازها تولید سرما در دماهای بسیار پایین با راندمان بالا باشد عملکرد آنها یکی از موارد مهمی است که می‌بایست مورد مطالعه قرار گیرد. توان ورودی، ظرفیت سرماسازی و دمای کاری نیز از پارامترهای مهم به شمار می‌آیند. همزمان با افزایش کاربرد این گونه از سرماسازها، ضروریاتی که می‌بایست در آنها لحاظ گردد نیز افزایش می‌یابد. برای مثال در صنایع فضایی، قابلیت اعتماد، طول عمر بالا، وزن کم و راندمان بالا از نکات مهمی است که می‌بایست رعایت گردد زیرا امروزه، یک ماموریت فضایی، حداقل بین ۳ تا ۱۰ سال طول می‌کشد. از این رو بررسی و تحقیق جهت بهبود عملکرد این نوع از سرماسازها همچنان ذهن دانشمندان این عرصه را به خود مشغول کرده و در حال حاضر تحقیقات بر روی آن، مسئله‌ی روز این دانشمندان است.

۴-۱ کاربرد علم کرایجنیک

رسیدن به دمایی کمتر از ۱۰ درجه کلوین به عنوان نیازی اجتناب ناپذیر در قرن بیستم مطرح گردیده و ذهن پژوهشگران را به خود مشغول نموده است. تولید اکسیژن مایع برای سوخت فضاپیماها و در کاربردهای پزشکی، تولید گاز مایع، خنک کردن سنسورهای مادون قرمز در کاربردهای متعدد و خنک سازی در نیمه‌هادی‌ها و فوق‌هادی‌ها، عوامل اصلی ایجاد این ضرورت بوده‌اند. مهمترین موارد استفاده‌ی سرماسازهای لوله ضربانی خنک‌کردن سنسورهای حساس مانند ردیاب‌های مادون قرمز