بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشکده مهندسی مکانیک**

# شبیه سازی عددی سردساز گیفورد مک‌ماهان

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**

**در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی**

**دانشجو**

**علی یوسفی**

**استاد راهنما:**

**دکتر علی جعفریان**

**بهمن‌ماه ۱۳۹۳**

بسمه تعالی

# تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

**آقای علی یوسفی** پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان شبیه سازی عددی سردساز گیفورد مك ماهان** در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران | نام و نام خانوادگی | رتبه علمی | امضا |
|---|---|---|---|
| استاد راهنما | دکتر علی جعفریان دهکردی | استادیار | |
| استاد ناظر | دکتر حسن خالقی | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر محمد حسن سعیدی | استاد | |
| مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی) | دکتر حسن خالقی | دانشیار | |

**« آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس»**

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسان‌ها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام‌شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه و درآمدهای حاصل از آن‌ها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه به‌صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تأیید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می‌باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی به‌صورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم‌افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب علی یوسفی دانشجوی دوره روزانه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی ورودی سال ۱۳۹۱ متعهد می‌شوم کلِیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشاریافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هرگونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدین‌وسیله حق هرگونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

**نام و نام خانوادگی علی یوسفی**

**امضا**

**تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۲۸**

**«آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه رساله‌های دانشجویان دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس»**

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه‌های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت-های علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به‌منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه‌ی خود، مراتب را قبلاً به‌طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:
«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی است که در سال ۱۳۹۳ در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر علی جعفریان دفاع شده است.»

ماده ۳: به‌منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درم عرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به‌عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدییه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به‌علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به‌منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب‌های عرضه‌شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب علی یوسفی دانشجوی دوره روزانه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

**نام و نام خانوادگی علی یوسفی**
**امضا**
**تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۲۸**

تقدیم به

دُردانه‌های زندگی؛

**پدر**

**و**

**مادر**

**عزیزم**

## تشکر و قدردانی:

امتنان و سپاس از استاد ارجمند و فرهیخته، جناب آقای دکتر علی جعفریان، که در طول دوره تحصیل و انجام این پایان‌نامه با همیّت و جدّیت، بنده را به اندیشه و تفکّرِ صحیح در این مسیر پر پیچ و خم رهنمون شدند و با صبر بر مسائل و مشکلات پیش‌آمده و ایراد راهنمایی‌های ارزشمند و بی‌شائبه خود، چه ازلحاظ علمی و اخلاقی، درس‌هایی از زندگی را به بنده آموختند. بر آستان آفریدگار شاکرم که افتخار شاگردی ایشان را نصیب بنده نمود.

از زحمات بی‌دریغ و بی‌شائبه پدر و مادر عزیزم، که در تمام مراحل زندگی مشوق و پشتیبان بنده بوده‌اند، مرا تعلیم دادند و تربیت کردند تا به این مرحله از زندگی برسم کمال تشکر را به عمل می‌آورم و همیشه دست‌بوس آن‌ها هستم.

و در پایان، برای شروعی دوباره، سپاس بیکران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید، به طریق علم و دانش رهنمونمان شد، خودشناسی و خداشناسی را تعلیممان داد، به همنشینیِ رهروانِ علم و دانش مفتخرمان نمود، خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت و عمری و مجالی را عطا فرمود تا بدان وسیله، خویش را در این مسیر بیازماییم و قطره‌ای از اقیانوس رحمت و شناخت در آفرینش بی‌کران او را دریابیم.

# چکیده

در این پایان‌نامه، دو مدل برای شبیه‌سازی عملکرد سردساز گیفورد مک‌ماهان توسعه داده شده است. جهت تحلیل و توجیه فیزیک سردساز گیفورد مک‌ماهان بر مبنای دیدگاه لاگرانژی یک کد با فرض ایده‌آل بودن بازیاب حرارتی، کامل بودن گاز سیال عامل و عملکرد سردساز در حالت پایا توسعه داده شده است. دما، فشار و جرم موجود در محفظه‌های متفاوت در هر زمان محاسبه شده و اثرات شرایط عملکردی سردساز شامل فشار عملکردی بالا و پائین سردساز بر بار سرمایشی مفید ایجاد شده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد بار سرمایشی مفید ایجاد شده بر روی محیط، حاصل از اثر سرمایشی دو گروه متفاوت از المان‌های جرمی می‌باشد. گروه اول شامل المان‌های جرمی است که با احساس افت فشار جزئی از سردساز خارج شده و گروه دوم المان‌های جرمی می‌باشند که با فشار عملکردی پائین از سردساز خارج می‌گردند. نتایج حاصل از کد بر مبنای دیدگاه لاگرانژی در دمای بالاتر از ۴۰ کلوین از دقت قابل قبولی برخوردار است. در گام دوم جهت شبیه‌سازی عددی سردساز گیفورد مک‌ماهان یک کد عددی توسعه داده شده است. ویژگی‌های منحصربه‌فرد این شبیه‌سازی، توسعه یک کد یک‌بعدی CFD با فرض ایده‌آل بودن گاز و با استفاده از مدلی شامل تمام تجهیزات موجود در سردساز ازجمله مبدل حرارتی گرم، بازیاب حرارتی، ناحیه حرکتی و مبدل حرارتی سرد و همچنین استفاده از روش جدید در شبیه‌سازی عددی، شامل تأثیر حرکت بازیاب حرارتی در حل معادلات حاکم، بدون استفاده از رویه‌ی شبکه متحرک بوده است. به‌وسیله کد عددی توسعه داده شده، استفاده از توری مش با سایز مختلف بر دمای کمینه قابل‌دسترس، توان سرمایشی و راندمان عملکردی سردساز موردبررسی قرارگرفته است. طبق نتایج شبیه‌سازی، استفاده از بازیاب با چیدمان توری مش چندگانه موجب کاهش تلفات اینرسی و ویسکوز در انتهای گرم بازیاب حرارتی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اثر به‌کارگیری بازیاب با توری‌های مش مختلف بر روی ضریب عملکرد، بیشتر از اثر آن بر کمینه دمای قابل‌دسترس است. به‌طوری‌که بازیاب با توری مش سایز ۴۰۰ علی‌رغم داشتن بیشترین افت اینرسی و ویسکوز، دارای بیشترین توان سرمایشی است. طبق نتایج شبیه سازی‌ها با استفاده از توری سایز ۴۰۰، کمینه دمای قابل دسترس ۶۵.۸۹ کلوین، ضریب عملکرد ۰.۰۴۹ و بار سرمایشی ۳۳۳.۳۲ وات در دمای ۷۰ کلوین به‌دست‌آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** سردساز گیفورد مک‌ماهان، دیدگاه لاگرانژی، بازیاب با توری مش چندگانه، CFD

# فهرست مطالب


**فصل ۱: مقدمه** **۱**

۱-۱- مقدمه ..... ۲

۱-۱-۱- دسته بندی سردسازها ..... ۳

۱-۱-۱-۲- سردسازهای جریان غیر نوسانی ..... ۴

۱-۱-۱-۳- سردسازهای جریان نوسانی بازیابی ..... ۵

۱-۱-۲- کاربرد سردسازها ..... ۶

۱-۱-۳- کلیاتی پیرامون سردساز گیفورد مک‌ماهان ..... ۸

۱-۱-۴- مروری بر پیشینه تحقیقات ..... ۹

**فصل ۲: مکانیزم عملکرد و ترمودینامیک سردساز گیفورد مک ماهان** **۱۶**

۲-۱- مدل فیزیکی ..... ۱۷

۲-۲- بررسی مکانیزم سرمایش ..... ۱۸

۲-۳- فیزیک عملکرد سیکل گیفورد مک ماهان برمبنای دیدگاه ترمودینامیکی ..... ۲۱

۲-۴- فیزیک عملکرد سیکل گیفورد مک ماهان بر مبنای دیدگاه لاگرانژی ..... ۲۳

**فصل ۳: معادلات حاکم، روش عددی و الگوریتم حل** **۲۶**

۳-۱- معادلات حاکم بر قسمتهای مختلف ..... ۲۷

۳-۱-۱- معادلات حاکم بر محیط غیرمتخلخل ..... ۲۷

۳-۱-۲- معادلات حاکم بر محیط متخلخل [۱۸] ..... ۲۸

۳-۱-۲-۲- معادله پیوستگی ..... ۲۹

۳-۱-۲-۳- معادله مومنتوم (ترم دارسی) ..... ۳۱

۳-۱-۳- معادله انرژی ..... ۳۲

۳-۲- روش حل عددی ..... ۳۳

۳-۲-۲- گسسته سازی معادلات پیوستگی و مومنتوم ..... ۳۵

۳-۲-۳- گسسته سازی معادله انرژی سیال ..... ۳۹

۳-۲-۴- گسسته سازی معادله انرژی فاز جامد ..... ۴۲

۳-۲-۵- معادلات شیر دورانی ..... ۴۴

۳-۲-۶- شرایط مرزی اعمالی بر معادلات ..... ۴۵

۳-۲-۷- محاسبه ضرایب افت اصطکاکی و خواص ترموفیزیکی ..... ۴۶

۳-۲-۷-۱- محاسبه ضرایب افت اصطکاکی در محیط غیرمتخلخل ..... ۴۶

۳-۲-۷-۲- ضرایب اینرسی و نفوذپذیری محیط متخلخل ..... ۴۷

۳-۲-۷-۳- محاسبه خواص ترموفیزیکی سیال و جامد ..... ۴۹

۳-۲-۸- محاسبه پارامترهای کلی ..... ۵۱

۳-۲-۹- الگوریتم حل ..... ۵۱

**فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها** **۵۴**

۴-۱- شبیه سازی سردساز گیفورد مک ماهان ..... ۵۵

۴-۲- شبیه‌سازی عملکرد سردساز گیفورد مک‌ماهان بر مبنای دیدگاه لاگرانژی ..... ۵۵

۴-۲-۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد سردساز گیفورد مک‌ماهان بر مبنای دیدگاه لاگرانژی ..... ۵۶

۴-۳- شبیه‌سازی عددی سردساز گیفورد مک‌ماهان ..... ۶۴

۴-۳-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سردساز گیفورد مک‌ماهان ..... ۶۴

۴-۳-۱-۱- استقلال از شبکه محاسباتی و گام زمانی ..... ۶۴

۴-۳-۱-۲- صحت سنجی و بررسی نتایج ..... ۶۸

۴-۳-۲- بررسی اثرات بازیاب با توری مش چندگانه ..... ۷۷

**فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادها** **۸۳**

۵-۱- جمع‌بندی مطالب ..... ۸۴

۵-۲- پیشنهادات جهت ادامه کار ..... ۸۵

**مراجع** **۸۷**

# فهرست اشکال


شکل (۱-۱) تقسیم‌بندی انواع سردسازها ..... ۴
شکل (۱-۲) طرحواره سردساز گیفورد مک ماهان [۱] ..... ۸
شکل (۲-۱) طرحواره سردساز گیفورد مک‌ماهان ..... ۱۷
شکل (۲-۲) نمودار دما برحسب آنتروپی در سیکل گیفورد مک‌ماهان ..... ۱۹
شکل (۲-۳) حجم کنترل های در نظر گرفته‌شده در دیدگاه ترمودینامیکی ..... ۲۱
شکل (۳-۱) طرحواره محیط متخلخل[۲۰] ..... ۳۰
شکل (۳-۲) طرحواره سردساز گیفورد مک ماهان و حجم کنترل اعمال شده برای شبیه سازی. ۳۴
شکل (۳-۳) پروفیل دمای اولیه در طول سردساز ..... ۴۶
شکل (۳-۴) پارامترهای هندسی محیط متخلخل[۲۶] ..... ۴۸
شکل (۴-۱) نمودار تغییرات بار سرمایشی برحسب تعداد المان ها ..... ۵۷
شکل (۴-۲) تغییرات بار سرمایشی برحسب فشار عملکردی پائین سردساز ..... ۵۷
شکل (۴-۳) نمودار تغییرات بار سرمایشی برحسب فشار عملکردی بالا سردساز ..... ۵۸
شکل (۴-۴) نمودار تغییرات دمای گاز و جرم موجود در سردساز برحسب زمان ..... ۵۹
شکل (۴-۵) نمودار نشان دهنده‌ی اثر سرمایشی المان‌های مختلف ..... ۶۲
شکل (۴-۶) نمودار تغییرات دما برحسب زمان برای حالت تعداد المان برابر پنج ..... ۶۳
شکل (۴-۷) تغییرات فشار مقطع میانی مبدل حرارتی گرم در طی یک سیکل ..... ۶۵
شکل (۴-۸) تغییرات دمای مقطع میانی مبدل حرارتی سرد در طی یک سیکل ..... ۶۶
شکل (۴-۹) تغییرات دمای مقطع میانی مبدل حرارتی سرد در طی یک سیکل ..... ۶۷
شکل (۴-۱۰) تغییرات فشار مقطع میانی مبدل حرارتی گرم در طی یک سیکل ..... ۶۷
شکل (۴-۱۱) مقایسه تغییرات بار سرمایشی به دمای موردنظر برای سردسازی حاصل از تحقیق حاضر و بررسی دیگر محققین ..... ۶۹
شکل (۴-۱۲) متوسط سیکلی دبی جرمی در طول سردساز ..... ۷۰
شکل (۴-۱۳) تغییرات فشار نوسانی کمپرسور و حرکت جابه‌جا کننده نسبت به زمان ..... ۷۱
شکل (۴-۱۴) تغییرات دبی جریان در مقاطع مختلف سردساز در طی یک سیکل زمانی ..... ۷۲
شکل (۴-۱۵) نمودار تغییرات دمای ماکزیمم در طول سردساز از ورودی مبدل حرارتی گرم تا انتهای مبدل حرارتی سرد ..... ۷۳
شکل (۴-۱۶) نمودار تغییرات دمای کمینه در طول سردساز از ورودی مبدل حرارتی گرم تا انتهای مبدل حرارتی سرد ..... ۷۳
شکل (۴-۱۷) نمودار تغییرات فشار ماکزیمم و مینیموم در طول سردساز از ورودی مبدل حرارتی گرم تا انتهای مبدل حرارتی سرد ..... ۷۴

شکل (۴-۱۸) نمودار نرخ تولید آنتروپی در بازیاب حرارتی سردساز مدل ..... ۷۵
شکل (۴-۱۹) نمودار تغییرات نرخ تولید آنتروپی در بازیاب حرارتی نسبت به فرکانس حرکتی جابه‌جا کننده ..... ۷۵
شکل (۴-۲۰) نمودار نرخ تغییرات تولید آنتروپی براثر افت اینرسیال و ویسکوز در طول بازیاب حرارتی ..... ۷۶
شکل (۴-۲۱) نمودار نرخ تولید آنتروپی در بازیاب حرارتی با چیدمان توری مش چندگانه و یکنواخت ..... ۷۹
شکل (۴-۲۲) نمودار نرخ تغییرات تولید آنتروپی براثر افت اینرسی و ویسکوز با چیدمان توری مش چندگانه و یکنواخت ..... ۸۰
شکل (۴-۲۳) نمودار تغییرات نسبت فشار بیشینه به کمینه در طول بازیاب حرارتی ..... ۸۰
شکل (۴-۲۴) نمودار P-V مربوط به ناحیه انبساطی در دو حالت از استفاده از توری مش با سایز ۴۰۰ و ۲۰۰ ..... ۸۲

# فهرست جداول

جدول (۳-۱) مشخصات هندسی و ضرایب اینرسی و نفوذپذیری توریهای مختلف ..... ۴۹
جدول (۴-۱) مشخصات فیزیکی و عملکردی سردساز گیفورد مکماهان موردبررسی .....۵۶
جدول (۴-۲) تغییرات مقدار جرم ورودی و خروجی از سیکل..... ۶۰
جدول (۴-۳) روند تغییرات بار سرمایشی برحسب وات محاسبه‌شده با تعداد المان‌های گاز.....۶۲
جدول (۴-۴( اطلاعات مربوط به تعداد المان گاز برابر پنج .....۶۳
جدول (۴-۵) مشخصات هندسی سردساز گیفورد مک‌ماهان مورد بررسی .....۶۸
جدول (۴-۶) کمینه دمای قابل‌دسترسی و راندمان عملکردی حاصل از نتایج شبیه‌سازی حاضر برای سردساز مدل .....۶۹
جدول (۴-۷) نرخ تولید آنتروپی در بازیاب حرارتی با چیدمان توری مش چندگانه و یکنواخت.. ۷۹
جدول (۴-۸) مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بازیاب حرارتی با توری مش یکنواخت و چندگانه ..... ۸۱

# فهرست علائم اختصاری

ضریب افت اصطکاکی ..... $f$

شتاب جاذبه ..... $(\mathrm{N\ kg^{-1}})$ $g$

ضریب هدایتی حرارتی مؤثر ..... $(\mathrm{W\ m^{-1}\ K^{-1}})$ $k$

جرم ..... $(\mathrm{kg})$ $m$

دبی جرمی ..... $(\mathrm{kg\ s^{-1}})$ $\dot{m}$

شار انتقال حرارت با محیط ..... $(\mathrm{W\ m^{-2}})$ $\dot{q}$

زمان یک سیکل رفت‌وبرگشت بازیاب ..... $(\mathrm{s})$ $t_p$

سرعت جریان سیال ..... $(\mathrm{m\ s^{-1}})$ $u$

سطح انتقال حرارت بین سیال و فاز جامد ..... $(\mathrm{m^2})$ $A_{s,f}$

ظرفیت حرارتی ویژه جامد ..... $(\mathrm{J\ kg^{-1}\ K^{-1}})$ $C$

ضریب فورچیمر ..... $C_F$

ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت ..... $(\mathrm{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}})$ $C_p$

ظرفیت گرمای ویژه در حجم ثابت ..... $(\mathrm{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}})$ $C_v$

ضریب عملکرد ..... COP

نفوذپذیری ..... $(\mathrm{m^2})$ $K$

عدد ناسلت ..... $Nu$

فشار سیال ..... $(\mathrm{Pa})$ $P$

ثابت جهانی خاص گاز ..... $(\mathrm{J\ kg^{-1}\ K^{-1}})$ $R$

عدد رینولدز ..... $Re$

عدد رینولدز نوسانی در محیط غیرمتخلخل ..... $Re_w$

دما ..... $(\mathrm{K})$ $T$

حجم ..... $(\mathrm{m^3})$ $V$

سطح انتقال حرارت واحد حجم ..... $(\mathrm{m^{-1}})$ $a_{s,f}$

## علائم یونانی

ضریب تخلخل محیط متخلخل ..... $\varepsilon$

ضریب انتقال حرارت بین سیال و جامد ..... $(\mathrm{W\ m^{-2}\ K^{-1}})$ $a$

ضریب تصحیح جریان حرارت در جامد ..... $\lambda$

ویسکوزیته دینامیکی ..... $(\mathrm{N\ s^{-1}\ m^{-1}})$ $\mu$

فرکانس حرکتی بازیاب حرارتی ..... $(\mathrm{Hz})$ $fr$

چگالی ..... $\rho$ $(kg.m^{-3})$

## زیرنویس‌ها و بالانویس‌ها

فضا و خاصیت مربوط به سیال ..... $f$

فضا و خاصیت مربوط به جامد ..... $s$

# فصل ۱:

# مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

علم کرایوجنیک[1] در ارتباط با تولید و به‌کارگیری حداقل دماهایی است که بر روی زمین و در شرایط طبیعی قابل‌دسترسی نمی‌باشند. علم کرایوجنیک برای نخستین بار در سال ۱۸۸۳ به‌منظور مایع سازی هوا توسط یک دانشمند لهستانی به جهان معرفی گردید. این علم زمینه نوینی از کاربرد دستگاه‌های جدید از قبیل ابررساناها را فراهم آورد. به‌طورکلی سردساز دماپایین به آن دسته از دستگاه‌های سرمایشی اطلاق می‌گردد که توانایی رسیدن به دماهای زیر ۱۲۰ درجه کلوین با ظرفیت بار سرمایشی در بازه‌ی $10^{-3}$ تا $10^{+3}$ وات در یک دوره زمانی مشخص را دارا باشد. به‌منظور استفاده در گستره‌ی وسیعی از کاربردها، در اواسط قرن بیستم تقاضا جهت رسیدن به دماهای کرایوجنیک افزایش چشم‌گیری یافت. در گام نخست بیشتر این کاربردها به‌منظور مایع سازی هوا و گازهای طبیعی در سیستم‌های بزرگ گسترش پیدا نمود. باگذشت زمان نیاز به استفاده از سردسازهای کوچک برای کاربردهای دیگر احساس گردید، لذا این نیازها انگیزه اصلی تحقیق در مورد سردسازها در چهار دهه اخیر بوده است.

تمامی روش‌های سردسازی کرایوجنیک دارای مشکلاتی می‌باشند که عاملی بازدارنده در بسیاری از کاربردها محسوب می‌گردند. برخی از این مشکلات و محدودیت‌ها عبارت‌اند از: هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری، قابلیت اعتماد، راندمان عملکردی، ابعاد و وزن، لرزش، ارتعاشات و اختلالات مغناطیسی. امروزه به دلیل این‌که هدف این نوع سردسازها تولید سرما در دماهای بسیار پایین باراندمان بالا است، عملکرد آن‌ها یکی از موارد مهمی است که می‌بایست مورد مطالعه قرار گیرد. توان ورودی، ظرفیت سردسازی و دمای کاری نیز از پارامترهای مهم عملکردی سردساز محسوب می‌گردند. با افزایش کاربرد این نمونه از سردسازها، پارامترهای مهمی که می‌بایست در آن‌ها لحاظ گردد نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان‌مثال در صنایع هوایی و فضایی قابلیت اعتماد، عمر بالا، وزن کم و راندمان عملکردی بالا از پارامترهای مهمی است که باید رعایت گردد؛

1 Cryogenics

زیرا امروزه زمان یک مأموریت فضایی حداقل بین ۳ تا ۱۰ سال است. ازاین‌رو بررسی و تحقیق جهت بهبود عملکرد این نوع از سردسازها همچنان ذهن دانشمندان این عرصه را به خود مشغول کرده و در حال حاضر پژوهش بر روی آن، مسئله روز این دانشمندان است. به‌منظور روشن شدن اهمیت علم کرایوجنیک و جایگاه سردساز گیفورد مک‌ماهان[1] در میان سردسازهای مختلف در ادامه این فصل و فصل بعد به مطالب زیر پرداخته می‌شود:

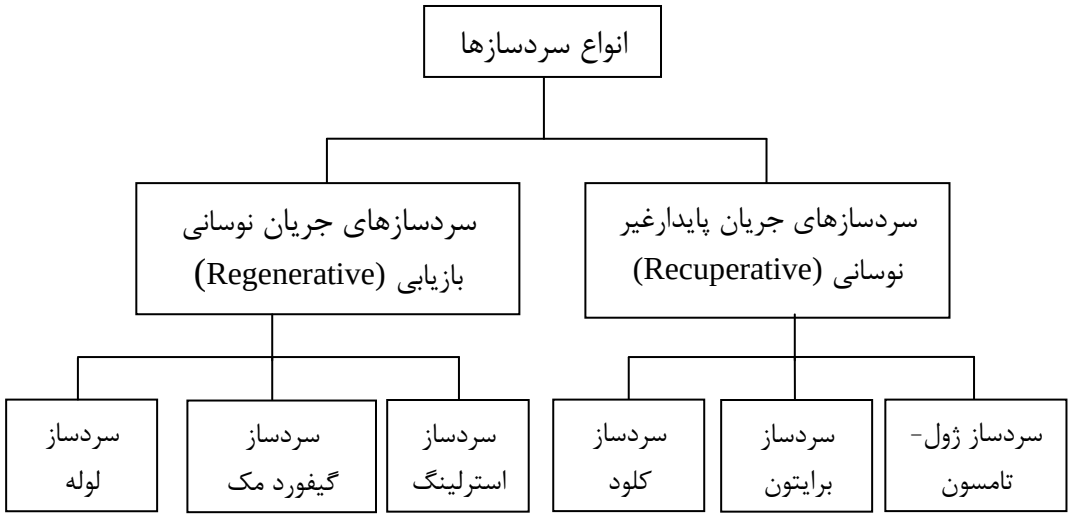
- معرفی و دسته‌بندی انواع سردسازها
- تاریخچه سردساز گیفورد مک‌ماهان
- مکانیزم عملکرد و ترمودینامیک سردساز گیفورد مک‌ماهان

## ۱-۱-۱- دسته بندی سردسازها

روش‌های متعددی جهت رسیدن به دماهای کرایوجنیک وجود دارد؛ که این روش‌ها به‌طورکلی به دودسته سیکل‌های جریان غیر نوسانی و نوسانی بازیابی تقسیم می‌گردند. از دسته سردسازهای جریان غیر نوسانی می‌توان به سیستم ژول- تامسون، برایتون و سیکل کلود اشاره نمود، همچنین سردسازهای جریان نوسانی بازیابی شامل سیکل‌های استرلینگ، گیفورد مک‌ماهان و لوله ضربانی است. تقسیم‌بندی سردسازها در شکل (۱-۱) نشان داده‌شده است.

به‌طورکلی تمامی سردسازهایی که با سیال گازی کار می‌نمایند به سه قسمت ضروری نیازمند هستند که عبارت‌اند از: انتهای گرم، منطقه تبادل حرارت و انتهای سرد. انتهای گرم معمولاً شامل یک کمپرسور جهت انجام تراکم می‌باشد. سرمایش در انتهای سرد رخ می‌دهد که به‌طور معمول شامل یک وسیله انبساطی از قبیل شیر فشارشکن، منبسط کننده، جابه‌جاشونده، لوله ضربانی یا تشدیدکننده‌ی آکوستیک می‌باشد. در ادامه توضیح مختصری پیرامون مزایا، معایب و نحوه عملکرد سرسازهای جریان غیر نوسانی و جریان نوسانی آمده است تا دلیل و اهمیت افزایش تقاضا برای استفاده از سردسازهای جریان نوسانی به‌ویژه سردساز گیفورد مک‌ماهان آشکار گردد.

[1] Gifford-McMahon




شکل (۱-۱) تقسیم‌بندی انواع سردسازها

## ۱-۱-۱-۲- سردسازهای جریان غیر نوسانی

این سردسازها تنها از یک بازیاب استفاده می‌نمایند و مبرد در سیستم دارای یک جریان یک‌طرفه (غیر نوسانی) است. در این سردسازها کمپرسور با یک ورودی فشارثابت کار می‌کند. چنانچه کمپرسور از نوع رفت و برگشتی باشد به‌منظور تولید جریان یک‌طرفه باید از شیرهای ورودی و خروجی استفاده نمود. البته کمپرسورهای گریز از مرکز و دوار نیازی به داشتن شیرهای ورودی و خروجی برای فراهم کردن جریان یک‌طرفه نخواهند داشت. این نوع سردسازها به سه دسته سردسازهای ژول- تامسون، برایتون و کلود تقسیم می‌شوند.

معایب سردسازهای جریان غیر نوسانی که باعث افزایش تقاضا برای استفاده از سیستم‌های نوسانی بازیابی به‌خصوص در اندازه‌های کوچک‌شده است، به‌طورکلی شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- بازگشت ناپذیری در سردساز ژول- تامسون بیشتر از سردسازهای دیگر است، لذا نمی‌تواند سرمایشی با راندمان بالا در مقایسه با سردسازهای دیگر که از سیال خالص از قبیل نیتروژن یا هلیوم به‌عنوان مبرد استفاده می‌کنند، به‌خصوص در دماهای پایین‌تر از ۷۰ درجه کلوین، ایجاد نماید. یک سردساز ژول- تامسون معمولی با توان سرمایشی ۲ وات در

دمای ۸۰ درجه کلوین نیاز به یک کمپرسور با توان ورودی ۴۰۰ وات دارد که به‌صورت تقریبی دارای راندمانی برابر ۱/۵ درصد سیکل کارنو می‌باشد؛ بنابراین به‌منظور رسیدن به یک سرمایش مطلوب باید اختلاف فشار زیادی توسط کمپرسور ایجاد گردد.

۲- در کمپرسورهایی دارای روان کار روغن می‌باشند، به‌منظور جلوگیری از آلودگی روغن در مسیر فشار بالا نیاز به جداسازی روغن در فشار گاز بالا است. در هر حال حتی باوجود جداساز روغن، ممکن است درجایی که مسیر جریان باریک است، خفگی ناشی از آلودگی اتفاق بیافتد. این امر به شدت سبب کاهش اعتماد به دستگاه می‌گردد. به‌منظور جلوگیری از این اشکال به مبدل حرارتی ویژه مانند هامپسون[1] نیاز است که بسیار گران‌قیمت است. علاوه بر قابلیت اعتماد پایین این سیستم، هزینه‌ی بالای تهیه‌ی اتصالات فشار بالا از معایب دیگر این سیستم می‌باشد.

۳- در سردساز برایتون، شیر ژول- تامسون با یک منبسط کننده جایگزین شده است که این امر موجب افزایش راندمان سردساز می‌گردد؛ اما در مقابل، پیچیدگی و هزینه‌ی ساخت سردساز را افزایش داده و قابلیت اعتماد به سیستم را نیز کاهش می‌دهد.

۴- به‌طورکلی استفاده از نسبت فشار بالا در سردسازهای جریان غیر نوسانی سبب ایجاد محدودیت در پروسه‌ی تراکم و به دنبال آن محدودیت در راندمان کل سیستم می‌گردد که این از معایب این نوع سردسازها است.

### ۱-۱-۱-۳- سردسازهای جریان نوسانی بازیابی

سردسازهای جریان نوسانی بازیابی با استفاده از حداقل یک مبدل حرارتی به‌عنوان بازیاب تحت جریان و فشار نوسانی کار می‌نمایند. این سردسازها نظیر دستگاه‌های الکتریکی AC می‌باشند، درحالی‌که سردسازهای جریان غیر نوسانی همانند دستگاه‌های الکتریکی DC عمل می‌کنند. در سردسازهای جریان نوسانی بازیابی در نیم سیکل اول گاز داغ وارد بازیاب می‌گردد و گرما از آن

[1] Hampson heat exchanger