



دانشکده : فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک، گرایش: تبدیل انرژی

عنوان پایان نامه:

شبیه سازی عددی سردساز لوله ضربانی دومرحله‌ای مینیاتوری با ورودی ثانویه

نام دانشجو:

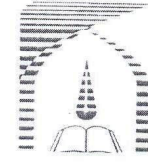
مسعود عربلو

استاد راهنما:

دکتر علی جعفریان دهکردی

آبان ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

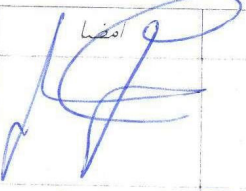


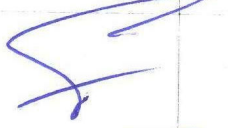
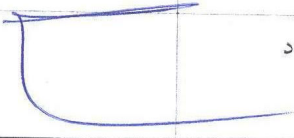


بسمه تعالی

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

آقای مسعود عربلو پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی عددی سردساز لوله ضربانی دو مرحله ای مینیاتوری با ورودی ثانویه در تاریخ ۱۳۹۱/۸/۱۶ 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	استادیار	
استاد ناظر	دکتر کیومرث مظاهری	استاد	
استاد ناظر	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر شهرام درخشان	استادیار	
استاد ناظر	دکتر کیومرث مظاهری	استاد	

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی- پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور 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 پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی مکانیک است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده

فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر علی جعفریان دهکردی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب مسعود عربلو دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: مسعود عربلو

تاریخ و امضا:

## دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

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

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء



دانشکده : فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک، گرایش: تبدیل انرژی

عنوان پایان نامه:

شبیه سازی عددی سردساز لوله ضربانی دومرحله‌ای مینیاتوری با ورودی ثانویه

نام دانشجو:

مسعود عربلو

استاد راهنما:

دکتر علی جعفریان دهکردی

آبان ۱۳۹۱

تقدیم به

صداقت و صمیمیت

صبر و استقامت

و

نور و معرفت

تمام کسانی که در راستای تعالی علم بشریت استوارانه قدم  
برداشته و موجب پیروزی آگاهی بر جهل و روشنائی بر تاریکی

شده‌اند

## تقدیر و تشکر

مَنّت خدای را عزّ و جلّ که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت.

پس در شروع کار با الهام از حدیث شریف « مَنْ عَلَّمَنِي حَرْفًا فَقَدْ صَيَّرَنِي عَبْدًا . . . » و با اتکال به روایت شیوای « وَ مَنْ لَمْ يَشْكُرْ الْمَخْلُوقَ ، لَمْ يَشْكُرْ الْخَالِقَ »، مراتب تقدیر و تشکر و سپاس خود را از زحمات بی‌دریغ، راهنمایی‌های بی‌بدیل و ارشادات صمیمانه و عالمانه استاد عزیز و ارجمندم جناب آقای دکتر جعفریان دهکردی که در تدوین و تکمیل این تحقیق سعی بلیغ و جدّ عظیم داشتند و از هیچ تلاشی دریغ نفرمودند ابراز می‌نمایم. همچنین مراتب تقدیر و تشکر خود را از جناب آقای مهندس بروجردی که با کمک‌های بی‌دریغشان، موجبات دلگرمی و هدایت اینجانب را فراهم ساختند و از جناب آقای دکتر گان، استاد محترم دانشگاه زجیانگ چین، که با فراهم کردن اطلاعات دقیق هندسی و عملکردی سیستم مورد مطالعه، اینجانب را در تکمیل این تحقیق یاری فرمودند، ابراز می‌دارم.

نگارنده با اذعان بر بی‌نقص نبودن این تحقیق، امید دارد، به سهم خود گام کوچکی در جهت اعتلای دانش

کرایوجنیک ایران برداشته باشد.



## چکیده

در این پایان‌نامه به منظور تجزیه و تحلیل و بهبود عملکرد سردساز لوله ضربانی دومرحله‌ای مینیاتوری با ورودی ثانویه و بررسی اثرات اجزاء مختلف سیستم بر عملکرد آن یک کد عددی یک‌بعدی توسعه داده شده است. جهت توسعه کد، معادلات حاکم بر قسمت‌های مختلف سردساز با فرض گاز کامل و تراکم‌پذیر به عنوان سیال عامل به شکل کلی استخراج شد؛ به گونه‌ای که امکان شبیه‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل و غیرمتخلخل فراهم گشت. در کد توسعه داده شده، دقت معادلات افت اصطکاکی مختلف در محاسبه افت اصطکاکی جریان نوسانی در محیط غیرمتخلخل مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که معادلات افت اصطکاکی جریان غیرنوسانی دقت مهندسی لازم را ندارند. اما در مقابل، معادله افت اصطکاکی جریان نوسانی دقت بسیار خوبی دارد. پس از ارزیابی صحت و دقت نتایج حاصل از کد، یک سردساز دومرحله‌ای آزمایشگاهی مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. اثرات توری مش چندگانه در بازیاب و ورودی ثانویه بر عملکرد سردساز مرحله اول مطالعه شد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری توری مش چندگانه مناسب در بازیاب موجب کاهش تلفات در انتهای گرم آن شده و ورودی ثانویه نیز موجب بهبود اختلاف فاز دبی جرمی و فشار در طول لوله ضربانی، افزایش دامنه نوسانات فشار در انتهای سرد سیستم و کاهش دمای کمینه قابل دسترس می‌شود. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها، کمینه دمای قابل دسترس  $70/4$  درجه کلوین و ضریب عملکرد  $0/0229$  در دمای  $80$  درجه کلوین برای مرحله اول سردساز، در شرایط بدون استفاده از بازیاب با توری مش چندگانه و ورودی ثانویه حاصل گردید؛ در حالی که همین مقادیر برای سردساز با بازیاب با توری مش چندگانه و ورودی ثانویه به ترتیب  $53/7$  درجه کلوین و  $0/0401$  به دست آمد. شبیه‌سازی سردساز دومرحله‌ای، مقدار کمینه دمای قابل دسترس مرحله دوم را  $26/4$  درجه کلوین نشان داد. علاوه بر این شبیه‌سازی سردساز دومرحله‌ای با بازیاب با توری مش چندگانه و ورودی ثانویه مناسب، کمینه دمای قابل دسترس  $18/2$  درجه کلوین را نشان داد.

**کلید واژگان:** سردساز لوله ضربانی، بازیاب با توری مش چندگانه، ورودی ثانویه، *CFD*

## فهرست مطالب

## صفحه

ج	فهرست علایم و نشانه‌ها .....
ه	فهرست شکل‌ها .....
ح	فهرست جدول‌ها .....
۱	فصل اول: مقدمه و مروری بر ادبیات موضوع .....
۲	۱-۱- مقدمه .....
۳	۱-۱-۱- انواع سردسازها .....
۴	۱-۱-۲- سردسازهای جریان غیرنوسانی .....
۵	۱-۱-۳- سردسارهای جریان نوسانی بازیابی .....
۶	۱-۲-۱- کلیاتی در مورد سردسازهای لوله ضربانی .....
۷	۱-۲-۱- تاریخچه سردساز لوله ضربانی .....
۱۴	۱-۲-۲-۱- سردساز لوله ضربانی دومرحله‌ای و مزایای آن .....
۱۹	فصل دوم: مکانیزم عملکرد و ترمودینامیک سردساز لوله ضربانی .....
۲۰	۱-۲-۱- مکانیزم عملکرد سردساز لوله ضربانی .....
۲۳	۱-۲-۲- ترمودینامیک سردسازهای لوله ضربانی .....
۲۹	فصل سوم: معادلات حاکم و روش عددی .....
۳۰	۱-۳-۱- معادلات حاکم و روابط اساسی .....
۳۰	۱-۳-۱-۱- معادلات حاکم بر محیط غیرمتخلخل .....
۳۱	۱-۳-۱-۲- معادلات حاکم بر محیط متخلخل .....
۳۵	۱-۳-۲- روش عددی .....
۳۷	۱-۳-۲-۱- گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و مومنتوم .....
۴۱	۱-۳-۲-۲- گسسته‌سازی معادله انرژی سیال .....

۴۳	..... گسسته‌سازی معادله انرژی فاز جامد ..... ۳-۲-۳
۴۶	..... معادلات ورودی ثانویه ..... ۴-۲-۳
۴۷	..... محاسبه ضرایب افت اصطکاکی و خواص ترموفیزیکی ..... ۵-۲-۳
۴۷	..... محاسبه ضرایب افت اصطکاکی در محیط غیرمتخلخل ..... ۱-۵-۲-۳
۴۸	..... ضرایب اینرسی و نفوذپذیری محیط متخلخل بر اساس روابط تجربی ..... ۲-۵-۲-۳
۴۹	..... ضرایب اینرسی و نفوذپذیری محیط متخلخل بر اساس روابط تحلیلی هندسی ..... ۳-۵-۲-۳
۵۱	..... محاسبه خواص ترموفیزیکی سیال و جامد ..... ۴-۵-۲-۳
۵۲	..... پارامترهای کلی و الگوریتم حل ..... ۶-۲-۳
۵۴	..... فصل چهارم: شبیه‌سازی سردساز تک‌مرحله‌ای ..... ۴-۲-۳
۵۵	..... سردساز تک‌مرحله‌ای ساده ..... ۱-۴
۶۶	..... بررسی اثرات بازیاب با توری مش چندگانه ..... ۲-۴
۶۹	..... بررسی اثرات ورودی ثانویه ..... ۳-۴
۷۳	..... بررسی اثرات همزمان بازیاب با توری مش چندگانه و ورودی ثانویه ..... ۴-۴
۷۸	..... فصل پنجم: شبیه‌سازی سردساز دومرحله‌ای ..... ۴-۲-۳
۷۹	..... سردساز دومرحله‌ای ساده ..... ۱-۵
۸۴	..... سردساز دومرحله‌ای با بازیاب با توری مش چندگانه و ورودی ثانویه ..... ۲-۵
۸۶	..... بهبود عملکرد سردساز دومرحله‌ای ..... ۳-۵
۸۹	..... فصل ششم: جمع‌بندی مطالب و پیشنهادات ..... ۴-۲-۳
۹۰	..... جمع‌بندی مطالب ..... ۱-۶
۹۱	..... پیشنهاد ادامه کار ..... ۲-۶
۹۲	..... مراجع ..... ۴-۲-۳

## فهرست علائم و نشانه ها

$A_{s,f}$	سطح انتقال حرارت بین سیال و فاز جامد ( $m^2$ )	$f$	ضریب افت اصطکاکی
$C$	ظرفیت حرارتی ویژه جامد ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )	$\mathcal{G}$	شتاب جاذبه ( $N\ kg^{-1}$ )
$C_F$	ضریب فورچیمر	$k$	ضریب هدایت حرارتی موثر ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ )
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )	$m$	جرم (kg)
$C_v$	ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )	$\dot{m}$	دبی جرمی ( $kg\ s^{-1}$ )
$CHX$	مبدل حرارتی دما پایین	$n^*$	جریان مولی پایا ( $mol\ s^{-1}$ )
$COP$	ضریب عملکرد	$q''$	شار انتقال حرارت با محیط ( $W\ m^{-2}$ )
$DID$	قطر اوریفیس ورودی ثانویه (m)	$t_p$	زمان یک سیکل رفت و برگشت پیستون (s)
$H$	جریان انتالپی (W)	$u$	سرعت جریان سیال
$HHX$	مبدل حرارتی دما بالا		<b>نشانه‌های یونانی:</b>
$IT$	لوله اینترنس	$\bar{\Phi}$	متوسط جریان $\Phi$ در مقطع مورد بررسی
$K$	نفوذپذیری ( $m^2$ )	$\alpha$	ضریب انتقال حرارت بین سیال و جامد ( $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ )
$MHX$	مبدل حرارتی میانی سردساز مرحله دوم	$\varepsilon$	ضریب تخلخل محیط متخلخل
$Nu$	عدد ناسلت	$\lambda$	ضریب تصحیح جریان حرارت در جامد
$O$	اوریفیس	$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی ( $N\ s^{-1}\ m^{-1}$ )
$P$	فشار سیال (Pa)	$\rho$	دانسیته سیال ( $kg\ m^{-3}$ )
$PT$	لوله ضربانی	$\omega$	فرکانس زاویه‌ای حرکت پیستون ( $rad\ s^{-1}$ )
$\dot{Q}$	فلاکس حرارت (W)		<b>زیرنویس‌ها و بالانویس‌ها:</b>
$R$	ثابت جهانی خاص گاز ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )	$B$	مخزن
$Re$	عدد رینولدز	$f$	فضا و خاصیت مربوط به سیال
$Re_g$	بازياب	$m$	مقدار متوسط سیکلی
$Re_m$	عدد رینولدز نوسانی در محیط متخلخل	$S$	فضا و خاصیت مربوط به جامد
$Re_\omega$	عدد رینولدز نوسانی در محیط غیرمتخلخل	$SS$	استینلس استیل
$\dot{S}$	نرخ تولید انترپپی بر واحد حجم ( $W\ m^{-3}\ K^{-1}$ )	$t$	زمان (s)

$T$	دما (K)	$t_p$	زمان یک سیکل (s)
$V$	حجم ( $m^3$ )	$tot$	کل فضای مورد بررسی
$a_{s,f}$	سطح انتقال حرارت واحد حجم ( $m^2 m^{-3}$ )	*	مقدار مرزی

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- تقسیم بندی انواع سردسازها. .... ۳
- شکل ۲-۱- شماتیک سردساز لوله ضربانی تک مرحله‌ای. .... ۸
- شکل ۳-۱- شماتیک سردساز لوله ضربانی اوریفیس دار با ورودی ثانویه. .... ۹
- شکل ۴-۱- شماتیک سردساز لوله ضربانی با چند مسیر کنارگذر. .... ۱۰
- شکل ۵-۱- شماتیک سردساز دو مرحله‌ای پیکربندی  $CT$ . .... ۱۶
- شکل ۶-۱- شماتیک سردساز دو مرحله‌ای پیکربندی  $ST$  با دو کمپرسور. .... ۱۷
- شکل ۷-۱- مقایسه شماتیک دو نوع سردساز دو مرحله‌ای پیکربندی  $ST$  متداول. .... ۱۸
- شکل ۱-۲- شماتیک سردساز لوله ضربانی اوریفیس دار. .... ۲۰
- شکل ۲-۲- تغییرات دما و فشار در قسمت سرد لوله ضربانی طی یک سیکل کامل جریان. .... ۲۱
- شکل ۳-۲- جریان انتروپی و انتالپی در قسمت‌های مختلف سردساز لوله ضربانی تک مرحله‌ای. .... ۲۳
- شکل ۴-۲- حجم کنترل های دربرگیرنده اوریفیس و مبدل حرارتی  $X_3$ . .... ۲۴
- شکل ۵-۲- حجم کنترل شامل لوله ضربانی و دو مبدل حرارتی در دو انتهای آن. .... ۲۶
- شکل ۶-۲- حجم کنترل شامل بازیاب و دو مبدل حرارتی متصل به آن. .... ۲۷
- شکل ۱-۳- شماتیک محیط متخلخل. .... ۳۲
- شکل ۲-۳- شماتیک سردساز لوله ضربانی تک مرحله‌ای با ورودی ثانویه و حجم‌های کنترل  
اعمال شده برای شبیه‌سازی. .... ۳۶
- شکل ۳-۳- پروفیل دمای اولیه در طول سردساز. .... ۴۶
- شکل ۴-۳- پارامترهای هندسی در گشودگی‌ها. .... ۴۸
- شکل ۵-۳- پارامترهای هندسی محیط متخلخل بازیاب. .... ۵۰
- شکل ۱-۴- مقایسه تغییرات ضریب عملکرد نسبت به طول لوله اینرتنس حاصل از شبیه‌سازی  
..... ۵۵

- ..... حاضر و نتایج کار محققین دیگر.
- شکل ۴-۲- متوسط سیکلی جریان انرژی، انتالپی و اکسرژی در طول سیستم از انتهای پیستون تا خروجی لوله ضربانی. ....
- ۵۷
- شکل ۴-۳- نمودار تغییرات دمای کمینه قابل دسترس نسبت به طول لوله اینرتنس برای بازیاب با توری مش ۳۲۵ و ۴۰۰. ....
- ۵۹
- شکل ۴-۴- نمودار تغییرات ضریب عملکرد در دمای ۸۰ درجه کلوین نسبت به طول لوله اینرتنس برای بازیاب با توری مش ۳۲۵ و ۴۰۰. ....
- ۶۰
- شکل ۴-۵- نمودار تغییرات دمای سیال و جامد ماتریس در مقطع میانی بازیاب در طی یک سیکل. ....
- ۶۲
- شکل ۴-۶- نمودار تغییرات دبی جریان در مقاطع مختلف سردساز ساده در طی یک سیکل. ....
- ۶۲
- شکل ۴-۷- نمودار تغییرات دمای ماکزیمم، مینیمم و میانگین سیکلی در طول سیستم از انتهای پیستون تا خروجی لوله ضربانی. ....
- ۶۳
- شکل ۴-۸- نمودار تغییرات فشار ماکزیمم، مینیمم و میانگین سیکلی در طول سیستم از انتهای پیستون تا خروجی لوله ضربانی. ....
- ۶۴
- شکل ۴-۹- نمودار تغییرات نرخ تولید انرژی در طول بازیاب. ....
- ۶۵
- شکل ۴-۱۰- نمودار تغییرات نرخ تولید انرژی در طول بازیاب با چیدمان توری مش (۲۰۰)، (۳۲۵ و ۴۰۰). ....
- ۶۹
- شکل ۴-۱۱- بیشینه، کمینه و میانگین سیکلی دما در طول سیستم با ورودی ثانویه مناسب. ....
- ۷۱
- شکل ۴-۱۲- نمودار تغییرات دبی جریان در قسمت‌های مختلف برای سردساز با ورودی ثانویه مناسب در طی یک سیکل. ....
- ۷۲
- شکل ۴-۱۳- نمودار تغییرات نسبت فشار بیشینه به کمینه در طول بازیاب برای شبیه‌سازی‌های

- ..... مختلف. ۷۵
- شکل ۴-۱۴- نمودار تغییرات کمینه دمای قابل دسترس در مقابل طول لوله اینترنس برای شبیه-  
سازهای مختلف. ۷۵
- شکل ۴-۱۵- نمودار تغییرات ضریب عملکرد در دمای ۸۰ درجه کلوین در مقابل تغییرات طول  
لوله اینترنس. ۷۶
- شکل ۴-۱۶- نمودار  $P-V$  کمپرسور برای سردساز بهبود داده شده و سردساز با بازیاب با توری  
مش ۳۲۵. ۷۷
- شکل ۵-۱- شماتیک سردساز دومرحله‌ای نوع استرلینگ با ورودی ثانویه و حجم‌های کنترل  
اعمال شده برای شبیه‌سازی. ۷۹
- شکل ۵-۲- تغییرات میانگین سیکلی دما در طول مرحله اول و دوم سردساز از خروجی کمپرسور  
تا خروجی مبدل حرارتی گرم. ۸۱
- شکل ۵-۳- نمودار تغییرات کمینه دمای قابل دسترس در  $CHX2$  نسبت به طول لوله اینترنس  
مختلف. ۸۲
- شکل ۵-۴- مقایسه نمودار توان سرمایش سردساز حاصل از نتایج شبیه‌سازی با مقادیر ارائه شده  
توسط گان و همکارانش. ۸۳
- شکل ۵-۵- نمودار تغییرات فشار بیشینه به کمینه در طول بازیاب مرحله دوم سردساز با توری مش  
یکنواخت و سردساز با بازیاب با چیدمان توری مش چندگانه و ورودی ثانویه مناسب. ۸۵
- شکل ۵-۶- مقایسه نمودار توان سرمایش سردساز بهبود داده شده با مقادیر ارائه شده توسط گان  
و همکارانش. ۸۸



## فهرست جدول ها

جدول ۱-۳- مشخصات هندسی و ضرایب اینرسی و نفوذپذیری توری‌های مختلف طبق روابط ۳-۶۹ و ۳-۷۰.....	۵۰
جدول ۱-۴- کمینه دمای سردساز مدل، حاصل از نتایج شبیه‌سازی حاضر و مقادیر آزمایشگاهی هاروی و جی‌سانگ.....	۵۶
جدول ۲-۴- مشخصات هندسی مرحله اول سردساز مورد مطالعه.....	۵۸
جدول ۳-۴- ضرایب اینرسی و نفوذپذیری توری‌های مختلف بازیاب حاصل از شبیه‌سازی با معادلات ۳-۶۶ و ۳-۶۷.....	۵۹
جدول ۴-۴- مقایسه نتایج سیستم با بازیاب با توری‌های مش چندگانه و سیستم با بازیاب با توری مش یکنواخت ۳۲۵.....	۶۷
جدول ۵-۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سیستم با ورودی ثانویه با قطرهای اوریفیس مختلف و طول لوله اینرتنس ۱/۳۵ متر.....	۷۰
جدول ۱-۵- مشخصات هندسی مرحله دوم سردساز مورد مطالعه.....	۸۰
جدول ۲-۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سیستم با بهترین حالت سردساز مرحله اول و ورودی ثانویه با قطر اوریفیس مختلف و طول لوله اینرتنس ۲/۶ متر سردساز مرحله دوم.....	۸۵

## فصل اول

مقدمه و مروری بر ادبیات موضوع

علم کرایوجنیک<sup>۱</sup> در ارتباط با تولید و به کارگیری حداقل دماهایی است که در روی زمین در شرایط طبیعی نمی‌تواند به وجود آید. فناوری کرایوجنیک 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. سردساز دما پایین به طور کلی به آن دسته از دستگاه‌های سرمایشی اطلاق می‌گردد که توانایی رسیدن به دماهای زیر ۱۲۰ درجه کلوین با ظرفیت سرمایش در گستره‌ی ۱۰<sup>-۳</sup> تا ۱۰<sup>۳</sup> وات در یک پرپود زمانی مشخص را دارا باشد. در اواسط قرن بیستم تقاضا جهت رسیدن به دماهای کرایوجنیک به منظور استفاده در گستره‌ی وسیعی از کاربردها افزایش یافت. در ابتدا اکثر این کاربردها به منظور مایع‌سازی هوا و گازهای طبیعی در سیستم‌های بسیار بزرگ گسترش یافت، تا اینکه نیاز به استفاده از سردسازهای کوچک برای کاربردهای دیگر احساس شد. این نیازها انگیزه اصلی تحقیق در مورد سردسازها در چهار دهه اخیر بوده است.

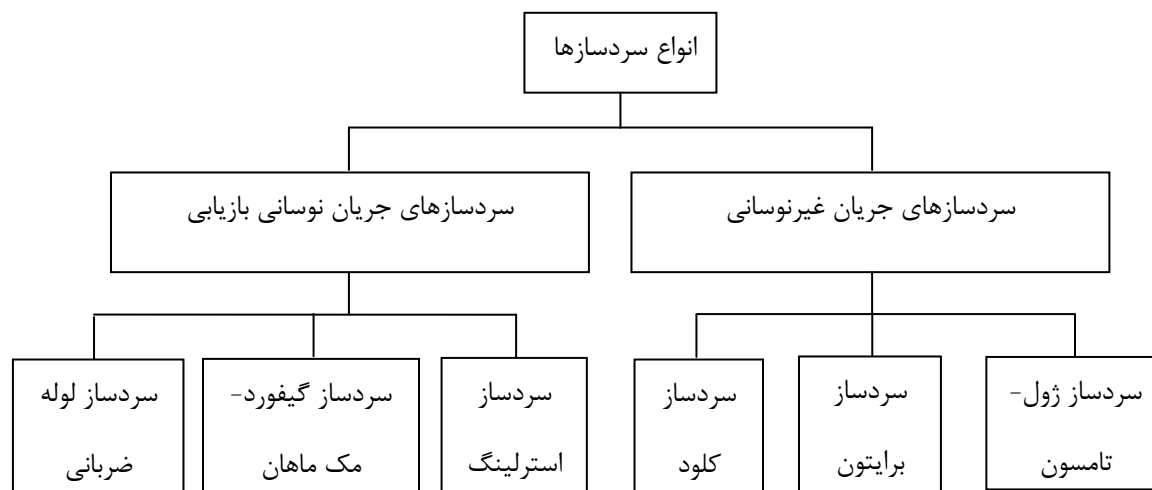
تمامی روش‌های سردسازی کرایوجنیک دارای مشکلاتی هستند که عاملی بازدارنده در بسیاری از کاربردها محسوب می‌شوند. برخی از این مشکلات و محدودیت‌ها عبارتند از: قابلیت اعتماد، راندمان، اندازه و وزن، لرزش و ارتعاشات، اختلالات مغناطیسی و هزینه‌های بالا. تا هنگامی که هدف این‌گونه سردسازها تولید سرما در دماهای بسیار پایین با راندمان بالا باشد عملکرد آن‌ها یکی از موارد مهمی است که باید مورد مطالعه قرارگیرد. توان ورودی، ظرفیت سردسازی و دمای کاری نیز از پارامترهای مهم به شمار می‌آیند. همزمان با افزایش کاربرد این‌گونه از سردسازها، ضروریاتی که باید 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 سردسازها همچنان ذهن دانشمندان این عرصه را به خود مشغول کرده و در حال حاضر تحقیقات بر روی آن، مسئله روز این دانشمندان است. در ادامه این فصل و فصل بعد به

مطالب زیر پرداخته می‌شود تا اهمیت علم کرایوجنیک و جایگاه سردساز لوله ضربانی در میان سردسازهای مختلف بیشتر آشکار شود:

- معرفی و دسته بندی انواع سردسازها
- تاریخچه سردساز لوله ضربانی
- معرفی سردساز لوله ضربانی دومرحله‌ای و مزایای آن
- مکانیزم عملکرد و ترمودینامیک سردساز لوله ضربانی

### ۱-۱-۱- انواع سردسازها

روش‌های مختلفی جهت رسیدن به دماهای کرایوجنیک وجود دارد که این روش‌ها به طور کلی به دو دسته سیکل‌های گازی جریان غیرنوسانی و نوسانی بازیابی تقسیم می‌گردند. سردسازهای جریان غیرنوسانی شامل سیستم ژول- تامسون، برایتون و سیکل کلود و سردسازهای جریان نوسانی بازیابی شامل سیکل‌های استرلینگ، گیفورد- مک ماهان و لوله ضربانی است. تقسیم‌بندی سردسازها در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- تقسیم بندی انواع سردسازها

هر سردسازی که با سیال گازی کار می‌کند به سه قسمت ضروری نیازمند است: 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