

بررسی رفتاری ابرشاره هلیم مایع و کاربرد آن در مهندسی مکانیک

حسن طالب^۱، علی اسماعیلی^{۲*}

^۱ دانشجوی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ عضو هیئت علمی گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*مسئول مکاتبات: aliesmaeili@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

ابرشاره
هلیم
خنک‌کاری
آشکارساز
شتاب‌دهنده

دستیابی به بالاترین بازدهی در سیستم‌های سیالاتی نظیر نیروگاه‌ها، پمپ‌ها، مبدل‌ها، هواپیما و فضاپیماها تحول شکرایی در علم مکانیک سیالات ایجاد خواهد کرد. از طرف دیگر، لزجت و اتلاف حرارتی دو عامل اصلی در کاهش کارایی انواع سیستم‌های تبرید، پمپ‌ها، صنایع هوافضایی و مبدل‌های حرارتی هستند. به منظور دست‌یابی به این آرزو، سیالی که ضریب انتقال حرارت بالایی داشته و اثر لزجت در آن ناچیز باشد می‌تواند بسیار نقش‌آفرین باشد که این سیال به عنوان ابرسیال یا ابرشاره شناخته شده است. هدف از تحقیق پیشرو این است که ویژگی‌های سیالات ابرشاره، توانایی‌ها و پتانسیل‌های آن و پیشرفت‌های قابل‌تصور برای سیستم‌های مکانیکی را مورد بحث و بررسی قرار دهد. از آنجایی که هلیم مایع دارای خاصیت ابرشارگی است به طوری که دارای ضریب انتقال حرارت بالایی بوده و اثرات لزجت در آن تقریباً صفر است لذا ابتدا به بررسی خاصیت ابرشارگی گاز هلیم و کاربردهای قابل‌تصور برای آن پرداخته و سپس کاربردها و پتانسیل‌های موجود بیان خواهد شد.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵

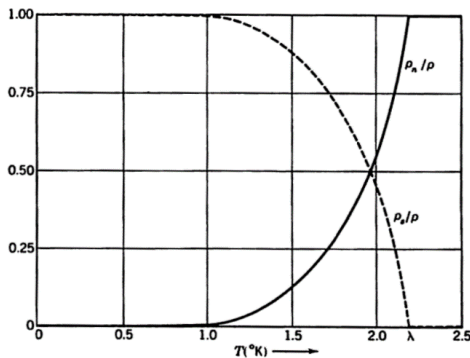
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۳

۱ مقدمه

حالت یک مایع معمولی تبدیل خواهد شد که به عنوان هلیم نوع اول (He I) نامیده شده است. به ازای دمای ۲/۱۷ درجه کلونین، هلیم دارای یک گذار فاز قابل مشاهده است که کاپیترا^۴ آنرا ابرشارگی نامیده و آن دما هم به دمای لاندا (T_λ) معروف شده است [۵]. هلیم پایین‌تر از این دما را نیز به عنوان هلیم نوع دوم (He II) و یا ابرشاره هلیم می‌شناسند. نکته قابل توجه این است که هلیم دارای هفت ایزوتوپ بوده که دوتای آن پایدار هستند (^4He و ^3He)؛ به عبارت دیگر زمانی که دمای هلیم پایین‌تر از نقطه جوش و بالاتر از نقطه لاندا قرار دارد ایزوتوپ ^4He به صورت یک مایع بی‌رنگ معمولی قابل ملاحظه است. علاوه بر این، زمانی که دما کمتر از دمای لاندا باشد هلیم نوع دوم وجود خواهد داشت که ایزوتوپ ^3He نیز در این حالت قابل دست‌یابی است. این ایزوتوپ‌ها، به دلیل پر بودن لایه آخر آن‌ها، فاقد ممان مغناطیسی و الکتریکی بوده و پایین‌ترین نقطه جوش را در بین همه عناصر دارا هستند به طوری که ^4He تا دمای ۴/۲ درجه کلونین و ^3He تا دمای ۳/۱۹ درجه کلونین در فشار اتمسفر مایع هستند. از طرف دیگر، به دلیل بالا بودن رسانش گرمایی، زمانی که می‌جوشند هیچ حبابی تشکیل نمی‌شود و مستقیماً از سطح آن بخار صورت می‌گیرد. به همین دلیل است که ماده هلیم بر خلاف سایر مواد (مانند اکسیژن) دارای نقطه سه‌گانه نیستند که شکل الف به وضوح نمایانگر این تفاوت است. همچنین در شکل ب می‌توان مشاهده نمود که گاز هلیم را نمی‌توان بدون تبدیل کردن به مایع، منجمد کرد و یا اینکه آنتروپی مایع هلیم در دماهای کمتر از تقریباً ۰/۸ درجه کلونین کمتر از آنتروپی هلیم جامد و حجم مولی مایع از حجم مولی جامد بیشتر است که این نتیجه را طبق

در سال ۱۸۶۸ ستاره‌شناس فرانسوی به نام جانسن^۱ در هنگام خورشیدگرفتگی که در حال طیف‌سنجی بود، هلیم را کشف کرد [۱]. این گاز تک‌اتمی که بعد از هیدروژن فراوان‌ترین عنصر موجود در طبیعت، بی‌رنگ، بدون مزه، بی‌بو و غیر سمی است. سپس در سال‌های بعد که هلیم را در سنگ‌های معدنی حاوی اورانیوم توریم یافتند. تلاش‌ها برای مایع کردن آن شروع شد و نخستین بار در سال ۱۹۰۸ کامرینگ اونس^۲ در آزمایشگاه لیدن^۳ با رسیدن دماهای مرتبه کلونین (بسیار پایین)، هلیم را مایع نمود [۲] به طوری که منجر به ایجاد فصلی جدید در فیزیک به نام فیزیک دماهای پایین شد. هلیم در دمای ۴/۲ درجه کلونین مایع می‌شود به عبارت دیگر این گاز در دمایی نزدیک به صفر مطلق تغییر فاز می‌دهد [۳]. منظور از دمای صفر مطلق یا صفر درجه کلونین حالتی است که حرکت اتم‌ها و مولکول‌ها متوقف شود اما در مورد گاز هلیم قضیه متفاوت است و وقتی دما به صفر مطلق نزدیک شود این روند امکان‌پذیر بوده و برای کاهش بیشتر دما، لازم است که از کاهش فشار بخار بالای حمام هلیم استفاده شود. این امر منجر به جوشش ماده در دمای ۴/۲۱ کلونین خواهد شد. با تغییر فاز هلیم به مایع، آزمایش‌ها بر روی آن آغاز گردید و با انجام آزمایش‌های مختلف، ویژگی‌های غیر عادی این ماده آشکار گشت [۴]. زمانی که هلیم به دمای کمتر از نقطه جوش خود برسد، جوشش به طور کلی و ناگهانی قطع و سطح مایع کاملاً آرام می‌گردد به طوری که دیگر جوششی مشاهده نخواهد شد. به عبارت دیگر، در فشار یک اتمسفر، به ازای دمای بین نقطه جوش تا نقطه ۲/۱۷ کلونین، گاز هلیم به

¹Janssen ²Kamerling Onnes ³Lieden ⁴Kapitza



شکل ۲: نسبت مؤلفه هلیوم عادی (خط توپر) به مؤلفه هلیوم ابرشاره (خط تیره) در هلیوم مایع به عنوان تابعی از دما [۱۱].

البته باید به این نکته نیز توجه داشت که علاوه بر هلیوم مایع، ابرشارگی در برخی مواد دیگر نیز دیده شده است؛ به عنوان مثال ابرشارگی الکترون‌های آزاد در بسیاری از فلزات و نیمه فلزات، ابرشارگی نوترون‌ها در ستاره‌های نوترونی [۱۲] و رفتار ابرشارگی اتم‌های فلزات قلیایی سرد شده را می‌توان نام برد. باید توجه داشت که خاصیت ابرشارگی در هر دو نوع ^4He و ^3He وجود دارد اما این خاصیت در ^3He در دمای پایین‌تری نسبت به ^4He به وجود می‌آید که به همین دلیل اطلاعات کمتری نسبت به خاصیت ابرشارگی ^3He در دسترس است. برخی از ویژگی‌های مهم ^4He در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱: برخی از پارامترهای مهم ^4He [۱۳، ۱۴].

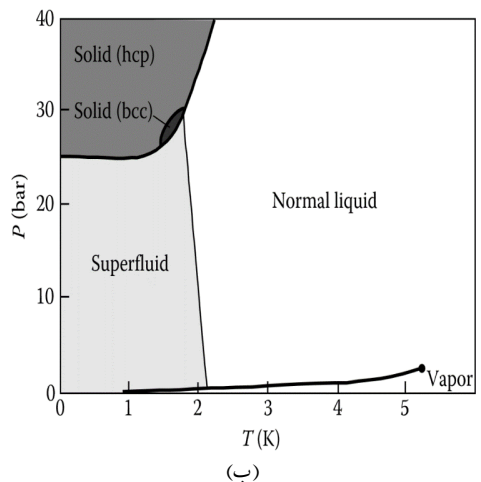
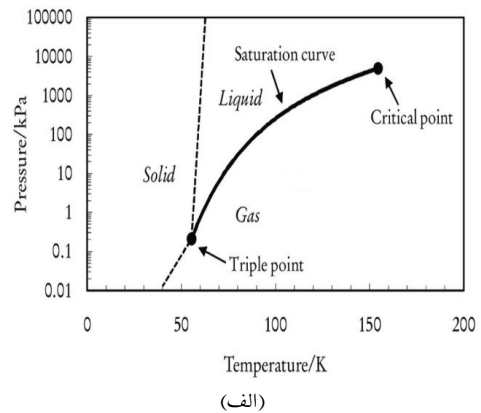
۴/۲۱	دمای جوش در فشار متعارف (K) T_b
۲/۱۷	دمای بحرانی (K) T_c
۲/۲۹	فشار بحرانی (bar) p_c
۰/۱۴۵	چگالی در $T \rightarrow 0$ ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)
۰/۱۲۵	چگالی در دمای جوش ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)

آنچه که لزوم شناخت و مطالعه بر روی خاصیت ابرشارگی و سیال ابرشاره را برای مهندسان مکانیک را ایجاب می‌کند این است که در آینده نزدیک توانایی این ویژگی سیال ابرشاره می‌تواند پیشرفت شگرفی در صنعت به وجود آورد. تقریباً میزان اثرگذاری ابرسیالات در علم مکانیک را می‌توان مشابه ابرساناها در علم الکترونیک دانست؛ همان طوری که در ابرساناها مقاومت الکتریکی صفر می‌شود در ابرسیالات نیز اتلاف حرارتی به صفر میل خواهد کرد. همانطور که ابرسانایی الکتریکی که در سال ۱۹۱۱ در جیوه‌جامد و زیر دمای بحرانی ۲/۴ کلوین مشاهده شده است و بعد از گذشت یک قرن از پیدایش آن، بکارگیری ابرساناها در دمای اتاق دیگر دور از ذهن نیست [۱۵] چنین تحولی نیز می‌تواند در ابرشارگی سیال اتفاق بیفتد. در حال حاضر نیز محققان زیادی بر روی این موضوع متمرکز هستند و توانسته‌اند دمای کاری ابرشاره‌ها را کاهش دهند به عنوان نمونه مقاله [۱۶] از پلاریتن^۸ چگالیده شده ابرشاره هلیوم تحت شرایطی در دمای اتاق بهره گرفته شده است. این روند کاهشی مطمئناً ادامه خواهد داشت.

لذا در این تحقیق با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد سیال ابرشاره و کاربردهای فراوانی که می‌تواند در صنعت آینده داشته باشد، به بررسی و تبیین این ویژگی‌ها پرداخته می‌شود. سپس کاربردهایی که این سیال ابرشاره در حال حاضر در عرصه علم و صنعت دارد را معرفی کرده و به بیان هر یک از

معادله کلاسیوس-کلاپیرون نیز می‌توان دریافت نمود.

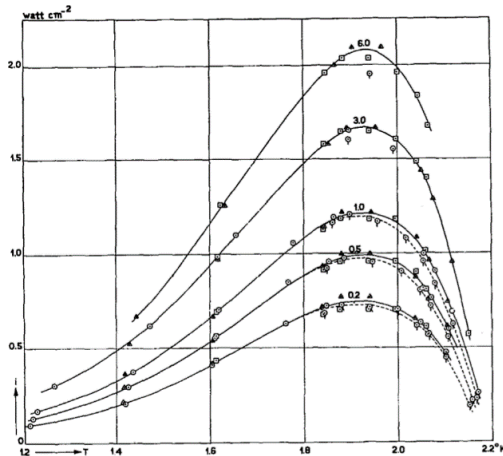
$$\left. \frac{\partial p}{\partial T} \right|_{\text{melting curve}} = \frac{S_l - S_s}{V_l - V_s} \quad (۱)$$



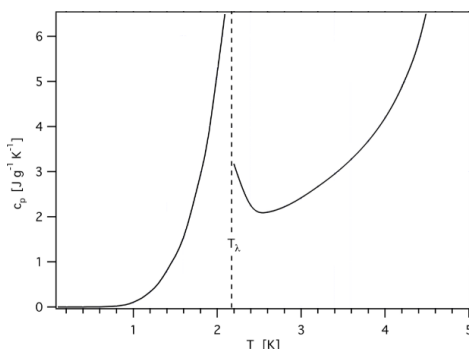
شکل ۱: (الف) نمودار فاز اکسیژن [۶] و (ب) نمودار فاز هلیوم [۷].

خاصیت اصلی و مهم هلیوم مایع، ابرشاره بودن آن است؛ به عبارتی هلیوم مایع در لوله‌های باریک بدون اتلاف، شارش می‌کند. این خاصیت باعث شد که برخی از دانشمندان به دنبال توجیه نمودن این رفتار بپردازند. در سال ۱۹۳۸ فریتز لاندن^۵ این خاصیت (ابرشارگی) را با تئوری بوز-اینشتین مرتبط دانست [۸] و این پدیده را مشابه با ابرسانایی در فلزات بیان کرد. سپس تیزا^۶ برای این ویژگی، مدل دوشاره‌ای را ارائه نمود که در این مدل، اتم‌های هلیوم به دو مؤلفه عادی و ابرشاره تقسیم شده بود [۹] و ویژگی‌های منحصر به فرد این سیال در حقیقت به دلیل وجود مؤلفه دوم معرفی کرد. پس از آن در سال ۱۹۴۱ لاندائو^۷ در مقاله‌ای مهم نشان داد که هلیوم مایع از مدل دو شاره‌ای پیروی می‌کند و از آن سال به بعد، مدل دو شاره‌ای مورد تایید و قابل استناد قرار گرفت [۱۰]. نسبت مؤلفه‌های هلیوم به صورت تابعی از دماست که در شکل ۲ این خصلت هلیوم به تصویر کشیده شده است. در این شکل، نسبت چگالی مؤلفه ابرشاره (ρ_s) و نسبت چگالی مؤلفه عادی (ρ_n) به چگالی کل (ρ) بر حسب دما نشان داده شده به طوری که با کاهش دما، نسبت مؤلفه ابرشارگی به حداکثر مقدار خود می‌رسد در حالی که نسبت مؤلفه عادی به سمت صفر میل خواهد کرد.

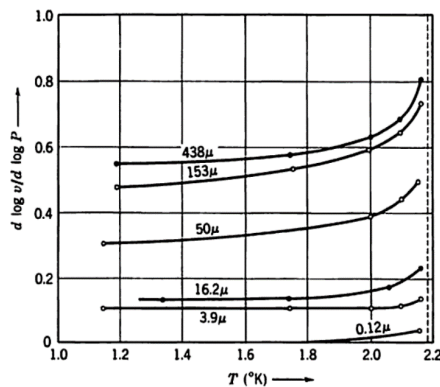
^۵Fritz London ^۶Tisza ^۷Landau ^۸polariton



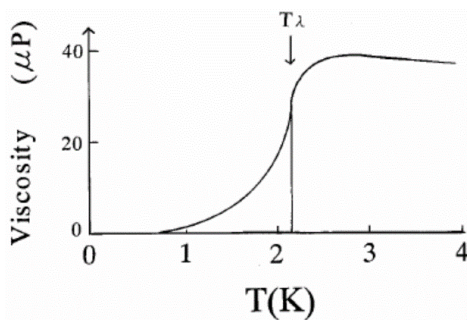
شکل ۳: شارگرمایی He II به عنوان تابعی از دما برای لوله‌های موئین بین ۰/۳ تا ۱/۵ میلی‌متر [۱۸].



شکل ۴: نمودار ظرفیت گرمایی ویژه تابعی از دما [۲۱].



شکل ۵: نمودار سرعت He II بر حسب اختلاف فشار دو سر لوله [۱۱].



شکل ۶: نمودار ویسکوزیته به عنوان تابعی از دما [۲۳].

این کاربردها پرداخته خواهد شد. به عبارت دیگر، در این تحقیق سعی شده است یک مرجع مناسبی برای مرور اجمالی این سیال فراهم آید و محرکی برای استفاده از ویژگی‌های خاص این سیال (مانند انتقال حرارت بسیار زیاد) با توجه به محدودیت‌های تولید و نگهداری آن باشد و علاقمندان به این حوزه را برای ادامه تحقیقات بنیادی تحریک نماید.

۲ ویژگی‌های خاص هلیوم مایع

۱.۲ ابررسانایی گرمایی

طبق آزمایش‌هایی که برای محاسبه انتقال حرارت هلیوم مایع شد انتقال حرارت هلیوم نوع دو (He II) بیش از پنج برابر هلیوم نوع یک (He I) است [۱۷، ۱۸]. گاز هلیوم، خود رسانایی گرمایی زیادی دارد ولی رسانندگی ابرشاره هلیوم (He II) به حدی زیاد است که حدود ۱۰۰۰ برابر مس تخمین زده می‌شود [۱۹]. رسانندگی گرمایی زیاد باعث می‌شود که گرادیان دمایی (نقاط داغ موضعی) بالایی به وجود نیاید؛ لذا هلیوم مایع را می‌توان به عنوان یک ابررسانا^۹ معرفی نمود [۲۰] و از آن به عنوان یک مبرد بروذتی^{۱۰} مورد استفاده قرار گیرد. یکی از دلایلی که هلیوم پس از عبور دمای لاندا از جوشش باز می‌ایستد و شفاف باقی می‌ماند نیز به همین علت است. شکل ۳ نمایانگر افزایش قابل ملاحظه شارحرارتی این مایع درون لوله موئین در حوالی دمای گذار است.

نمودار ظرفیت گرمایی ویژه با کاهش دما با یک افزایش غیرعادی مواجه است (در همان دمای بحرانی) و علت نامگذاری این دما به دمای لاندا، شباهت نمودار این خاصیت به لاندا (λ) است. شکل ۴ گویای این شباهت است. طبق شکل، ظرفیت گرمایی ویژه با نزدیک شدن به دمای لاندا به بی‌نهایت میل خواهد کرد.

۲.۲ گرانروی (ویسکوزیته)

قهوه‌ای که بهم زده می‌شود بالاخره به دلیل اصطکاک آرام خواهد گرفت، اما ابرشاره هلیوم اصطکاک نداشته و به حرکت خود ادامه می‌دهد. در مورد گرانروی دو مورد آزمایش و بحث وجود دارد: مقاومت سیال در مقابل حرکت در لوله‌های با قطر بسیار کم و مورد دوم نیروی کششی وارد بر اجسام غوطه‌ور در هلیوم است [۲۲]. در مورد اول با توجه به اینکه گرانروی با اختلاف فشار رابطه مستقیم دارد نتایج آزمایش‌ها [۱۱] نشان دادند که سرعت ابرشاره در لوله‌هایی به قطر d (قطر لوله موئین) مستقل از اختلاف فشار دو سر لوله است (شکل ۵). طبق این آزمایش، اگر گرانروی به عنوان تابعی از دما در نظر گرفته شود، ویسکوزیته به طور ناگهانی در دمای لاندا به صفر میل خواهد کرد.

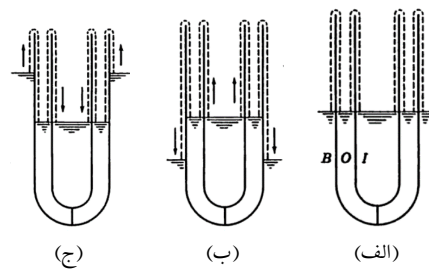
در آزمایش‌های مورد دوم، گرانروی سیال در برابر چند نوسانگر دورانی در دماهای بزرگ‌تر از دمای لاندا و نیز کمتر از آن دما مورد بررسی قرار گرفت. نتایج‌ها نشان دادند که ویسکوزیته هلیوم به یکباره صفر نشده اما افت بسیار شدیدی می‌کند و به صفر نزدیک می‌شود (شکل ۶). چون تنها عامل میرایی دیسک مؤلفه عادی هلیوم است.

⁹superconductors ¹⁰Cryogenic Refrigeration

۳.۲ اثر فیلم هلیوم

روی دیواره‌های هر ظرف حاوی مایع، لایه‌ای از مولکول‌های آن تشکیل می‌شود که اگر سطح ظرف باز باشد، فقط به صورت رطوبت خود را نشان خواهد داد. اما اگر در ظرفی هلیوم مایع وجود داشته باشد، این لایه آنقدر ضخیم است که هلیوم می‌تواند از داخل آن جریان پیدا کند [۲۴].

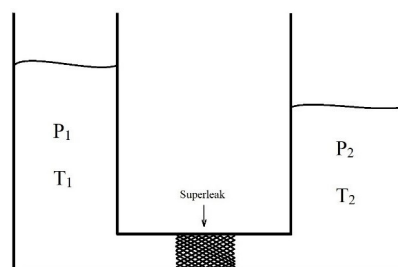
ضخامت این لایه برای مایعات معمولی ۱ نانومتر و برای هلیوم ۳۰ نانومتر است. بدین ترتیب اگر ظرفی از ابرشاره نیمه پر و سر بسته باشد، لایه‌ای نازک تمام ظرف را می‌پوشاند به طوری که اگر ظرف از بالا سوراخ شود، تمام هلیوم از آن بالا خالی می‌گردد! همچنین اگر لوله آزمایش درون یک ظرف از هلیوم قرار داده شود O, I و B به ترتیب معرف بین لوله موئین، داخل لوله موئین و حمام ابرشاره است)، لوله به تدریج شروع به پر شدن می‌کند تا هم‌تراز آن شود (شکل ۷ الف)، اگر مقدار هلیوم داخل لوله بیشتر از سطح ظرف باشد، از آن بیرون خواهد ریخت (شکل ۷ ب) و اگر لوله را پایین تر از سطح مایع در حمام نگه داشته شود، ابرشاره هلیوم از این دیواره نازک عبور کرده و به داخل ظرف خواهد رفت (شکل ۷ ج). نکته قابل توجه دیگر اینجاست که نسبت سرعت خالی شدن مایع به عمق آن در همه موارد تقریباً ثابت است.



شکل ۷: اثر فیلم در هلیوم مایع [۱۱].

۴.۲ اثر ترمومکانیکی

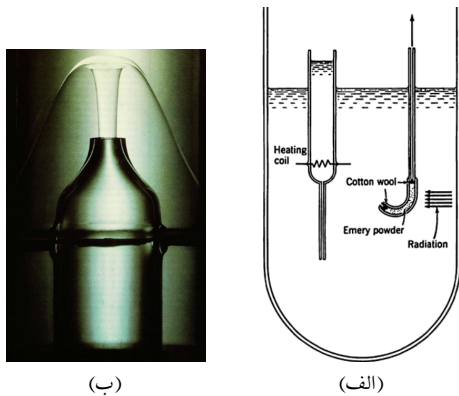
این آزمایش با دو مخزن هلیوم که به وسیله لوله‌ای موئین به هم متصل‌اند، انجام شده است. ابتدا دما و سطح مایع در هر دو مخزن یکسان است. با افزایش فشار در یک سمت، ابرشاره به سمت دیگر مخزن حرکت خواهد کرد. شارش مایع باعث ایجاد اختلاف دما در دو مخزن می‌شود (شکل ۸). مخزن‌ها با superleak (ماده‌ای با حفره‌هایی در اندازه میکرو که سیالات عادی به دلیل لزجت نمی‌توانند از آن بگذرند و تنها سیالی می‌تواند از آن بگذرد که لزجت آن بسیار کم و تقریباً صفر است) با یکدیگر در تماس‌اند. در ادامه درباره این ویژگی و کاربردی که از این ویژگی ساخته شده، بیشتر توضیح می‌دهیم.



شکل ۸: اثر ترمومکانیکی [۲۵].

۵.۲ اثر فواره

این اثر جزء ویژگی‌های خاص هلیوم مایع است که در دسته اثرات ترمومکانیکی قرار می‌گیرد. اگر جسمی با مواد پودری فشرده شده، به طوری دارای راه‌های باریکی که نقش لوله موئین را ایفا می‌کند باشد، درون ظرف هلیوم مایع قرار داده شود و به آن نور تابانده (مثلاً با چراغ قوه) تا دمای قسمتی از جسم اندکی گرم شود (دمای قسمتی از مایع که توسط پودر از ظرف جدا گردیده بود کمی افزایش می‌یابد)، مشاهده خواهد شد که ابرشاره هلیوم از منافذ پودر عبور کرده و فواره‌ای در حدود ۳۰ cm به وجود می‌آورد [۲۲]. نمایی از این آزمایش در شکل ۹ الف و تأثیر واقعی آن در شکل ۹ ب آورده شده است.



شکل ۹: (الف) شماتیک اثر فواره [۱۱]؛ (ب) عکس واقعی این اثر [۲۶].

۶.۲ صوت دوم

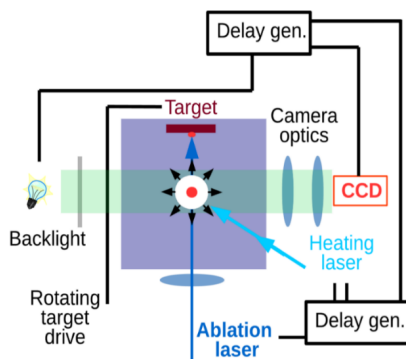
واضح است که صوت حاصل از اختلاف فشار (صوت معمولی) را می‌توان در هر سیالی به وجود آورد. این صوت، سینوسی بوده و گرادیان دمایی ایجاد نمی‌کند ($\text{grad } T = 0$). امکان ایجاد این صوت در ابرشاره هلیوم نیز وجود دارد و آن را «صوت اول» نامیده‌اند. نکته مورد توجه برای اندیشمندان که مطالعات زیادی درباره آن انجام داده‌اند، «صوت دوم» است. تیزا نخستین نفری بود که وجود صوتی مستقل از فشار را پیشگویی کرد. وی اثبات نمود که سرعت این صوت در دمای $1/6$ درجه کلوین به یک مقدار بیشینه محلی و در دمای بحرانی به مقدار صفر خواهد رسید [۱۱]. این صوت شبیه صوت اول بوده اما دارای چندین تفاوت اساسی با آن است.

آنچه در این ویژگی اهمیت دارد، نحوه رفتار این سیال با تغییرات دمایی است. صوت دوم در اثر اختلاف دما یا اعمال گرما (نه تغییرات فشار) در نقطه‌ای از سیال به وجود می‌آید به همین دلیل به آن «موج گرمایی» یا «موج آنتروپی» نیز گفته می‌شود. در این موج گرادیان چگالی برابر صفر است ($\text{grad } \rho = 0$)؛ به عبارت دیگر چگالی جریان برابر صفر خواهد بود. پشکوف^{۱۱} در سال ۱۹۴۴ به کمک روش تشدید، دستگاهی طراحی نمود تا این تغییرات دما را در مایع مشاهده کند. شکل آن شبیه به صوت اول (دارای نوسان) بود [۲۷] به همین دلیل اسم آن را صوت نهادند.

همانطور که برای ایجاد صوت اول که در اثر تغییر فشار به وجود می‌آید، به میکروفون و برای دریافت آن به بلندگو نیاز است، برای صوت دوم نیز به یک مقاومت گرمایی و یک اسیلوسکوپ^{۱۲} (وسیله‌ای برای اندازه‌گیری نیروی

¹¹Peshkov ¹²oscilloscope

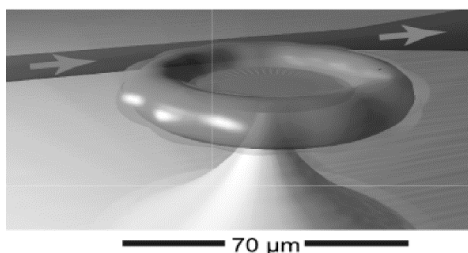
می‌شود) این ماده حباب‌های بزرگتری را نسبت به دیگر مواد تشکیل داده که این حباب‌ها در روش‌های تصویربرداری منجر به وضوح بهتر و دقیق‌تر حرکات غیریکنواخت شده است [۳۰]. کاربرد عمده این تکنیک در مهندسی هوافضا است؛ جایی که مشاهده سرعت‌های زیاد فضاپیماها و موشک‌ها، پرتابه‌ها^{۱۴}، تحقیقات احتراق، انفجار و ... اهمیت بسزایی دارد. به عنوان نمونه، ارزیابی مستقیم تغییرات دمایی و شوک در هوای بسیار دشوار است. ولی مطالعه این پدیده‌ها در یک سیال ابرشاره به وضوح قابل مشاهده است. این تکنیک برای تشخیص نانو ذرات فلزی پلاسمونیک^{۱۵} (به واکنش‌های بین الکترون‌های آزاد در نانو ذرات فلزی و نور را گویند) حل شده در ابرشاره هلیوم که بعد از گرمایش حاصل از پالس‌های لیزری، حباب تولید می‌کند بسیار مثر شمر واقع شده است [۳۰]. به طوری که در شکل ۱۱ نحوه کار حباب‌های گازی نانو یا میکرو ذرات در ابرشاره هلیوم به خوبی تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است Backlight و CCD^{۱۶} در راستای عمودی هستند که برای نمایش دوبعدی بدین صورت به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱۱: شماتیک نحوه کار حباب‌های گازی نانو یا میکروذرات در ابرشاره هلیوم [۳۰].

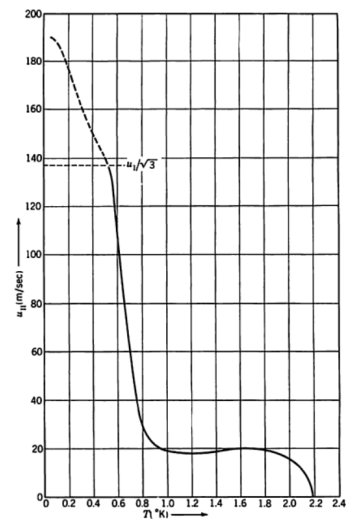
۲.۱.۳ آشکارسازی حرکت براونی

حرکت براونی^{۱۷} در فیزیک به نوعی از حرکت تصادفی ذرات غوطه‌ور در سیال مایع یا گاز بر اثر برخورد این ذرات با اتم‌ها یا مولکول‌های سیال گفته می‌شود [۳۱]. چون این حرکت بر پایه احتمالات به وجود آمده‌اند، نمایش چنین حرکاتی غیرقابل پیش‌بینی است. این حرکت روی ارتعاش‌کننده‌های میکرو و با بهره‌گیری از ویژگی صوت سوم ابرشاره هلیوم به ضخامت فمتو^{۱۸} تا پیکو^{۱۹} قابل مشاهده شده است [۳۲]. در شکل ۱۲ یک میکرومخروط ارتعاش‌کننده براساس حرکت براونی درون ابرشاره هلیوم نمایش داده شده است.



شکل ۱۲: نمایشگر میکرومخروط ارتعاش‌کننده در ابرشاره هلیوم [۳۲].

مکانیکی و حرارتی با استفاده از اشعه کاتدی) نیاز است [۱۹]. وی جریان متناوبی را به یک مقاومت گرمایی داده و از طرف دیگر به وسیله اسیلوسکوپ آنرا دریافت نمود. سپس از آن نموداری برای سرعت صوت دوم برحسب دما رسم نمود که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰: سرعت صوت دوم بر حسب دما [۲۸].

۷.۲ صوت سوم

پدیده دیگر این ابرشاره، ایجاد یک موج سطحی بروی آن است. این موج به دلیل تفاوت دمایی در دو نقطه ایجاد می‌شود. نخستین بار اتکینز^{۱۳} در سال ۱۹۵۹ به وجود این لایه موج سطحی در ابرشاره هلیوم پی‌برد و نام آن را «صوت سوم» نهاد. این موج شبیه به امواج ایجاد شده در آب بر اثر انداختن یک سنگ در آن است با این تفاوت که این امواج بر اثر تفاوت دما در دو نقطه ایجاد خواهد شد [۲۹].

۳ کاربردهای کنونی ابرشاره

همانطور که در قسمت قبل اشاره شده ابرشاره دارای توانایی‌های بالقوه‌ای است که اگر قابلیت بکارگیری در دمای اتاق به ویژگی‌های بالا اضافه شود می‌تواند کاربردهای شگفت‌انگیزی داشته باشد. اگرچه در حال حاضر چنین امکانی فراهم نیست ولی با توجه به این ویژگی‌های خاص سیال مدنظر، هم‌اکنون نیز کاربردهایی در صنعت برای خود فراهم آورده که می‌توان به صورت ذیل دسته‌بندی نمود.

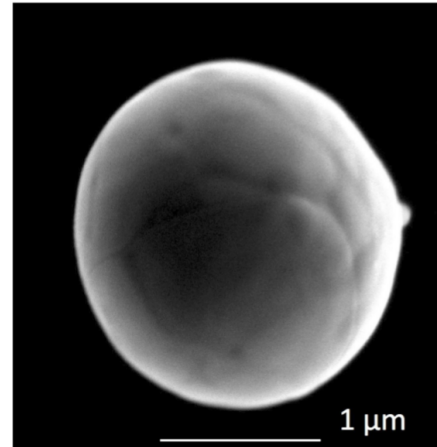
۱.۳ آشکارسازی

۱.۱.۳ آشکارسازی حرکات غیریکنواخت

ابرشاره هلیوم به علت ویژگی‌هایی که دارد در آشکارسازی جریان تحت شرایط خاص می‌تواند بکار گرفته شود. در حقیقت به علت کم بودن آنتالپی تبخیر ابرشاره هلیوم (که باعث افزایش فشار درونی حباب می‌شود) و کم بودن فشار بخار اشباع آن (که منجر به کاهش فشار خارجی برای بزرگ شدن حباب

۳.۱.۳ کاربرد در ردیاب‌های مادون‌سرخ

در ردیاب‌های مادون‌سرخ^{۲۹} استفاده از نیمه رساناهایی مانند ZnO رایج است. به منظور تولید ریزدانه‌های ZnO، معمولاً از لیزر پالسی در سیال هلیوم ابرشاره بهره می‌گیرند [۳۳]. این ریزدانه‌ها همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده دارای سطحی صاف و کاملاً کروی هستند که با میکروسکوپ‌های الکترونیکی قابل تشخیص است.



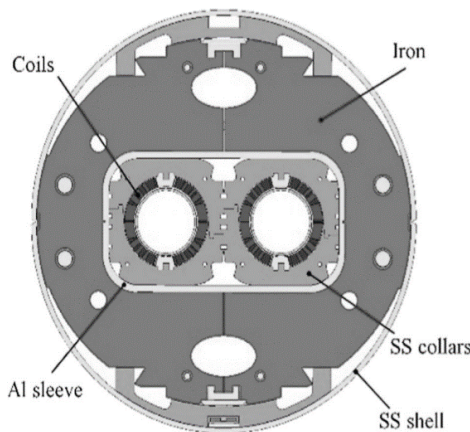
شکل ۱۳: مشاهده میکروسکوپی ذرات ZnO با استفاده از برش لیزری در داخل ابرشاره هلیوم به وسیله میکروسکوپ الکترونی [۳۳].

۲.۳ استفاده از ابرشاره‌ها در سیستم‌های تبرید

با توجه به ویژگی‌های فوق‌العاده ابرشاره‌ها در بحث انتقال حرارت، انتظار می‌رود که جدی‌ترین و مهم‌ترین کاربرد ابرشاره در صنعت تبرید باشد. از جمله خنک‌کاری در شتاب‌دهنده‌ها و نیز راکتورهای ذوب هسته اتمی بسیار بزرگ مانند: CERN در مرز سوئیس و فرانسه، JT-60^{۲۱} و KEK در ژاپن، KASTAR^{۲۲} در کره جنوبی و همچنین ITER^{۲۳} (بزرگ‌ترین پروژه راکتورهای ذوب هسته اتم در حوزه فیزیک که هم اکنون با همکاری بین هفت کشور بزرگ و اتحادیه اروپا در حال ساخت است) به وسیله ابرشاره‌ها انجام می‌پذیرد. علت استفاده چنین صنایعی از ابرشاره این است که هزاران ابرسانا در پروژه‌های فوق مورد استفاده قرار گرفته و از طرفی این ابرساناها در دماهای بسیار پایین (۱/۹ درجه کلوین) خاصیت ابرسانایی^{۲۴} از خود نشان می‌دهند [۳۴]؛ لذا استفاده از ابرشاره‌ها برای خنک‌کاری توجیه‌پذیر خواهد بود. به‌عنوان مثال عنصر نیوبوم^{۲۵}، آلیاژ آن مورد استفاده در موشک‌ها و راکت‌ها است، در دماهای پایین (۱/۹ درجه کلوین) خاصیت ابرسانایی از خود نشان می‌دهد. از این ماده در شتاب‌دهنده پرنرژ^{۲۶} KEK در شهر توسبا^{۲۷} ژاپن بکار گرفته شده و به موازات آن از سیال ابرشاره هم برای کاهش دمای عنصر نیوبوم بهره گرفته شده است [۳۵].

به طور کلی، شتاب‌دهنده‌ها باید حداکثر تماس و نزدیکی را با He II داشته باشند، اما نمی‌توانند در سیال خنک‌کن غوطه‌ور باشند زیرا وجود ابرشاره‌ها بروی کیفیت میدان مغناطیسی شتاب‌دهنده تأثیر دارد؛ بنابراین برای

خنک‌کاری بهتر، ابرشاره باید نزدیک به شتاب‌دهنده‌های مغناطیسی باشد. پس باید تعادلی نسبی بین تبادل حرارت و کیفیت میدان مغناطیسی مورد نیاز وجود داشته باشد [۳۶]. البته روش‌های مختلفی برای خنک‌سازی با ابرشاره هلیوم در شتاب‌دهنده‌ها ارائه شده که هر یک از این روش‌ها، مزایا و کاستی‌های خاص خود را دارا هستند. نکته حائز اهمیت این است که در همه این ایده‌ها، یک حمام ابرشاره اشباع در نظر گرفته شده تا بتواند دمای هلیوم مایع را زیر دمای لاندا (λ) نگه‌داشته و با استفاده از کمپرسورهای میرد^{۲۸} این حمام ابرشاره را کنترل نمایند. کار این کمپرسورها، کاهش فشار گاز بالای سطح هلیوم اشباع است تا آن را به فاز مایع برگرداند و این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که دمای هلیوم تا دمای مطلوب کم شود [۳۷]. در CERN نیز ابرشاره‌ها منجر به کاهش دما و خنک‌کاری شدند و روشی که در شتاب‌دهنده بزرگ CERN مورد استفاده قرار گرفته نیز تبیین خواهد شد. برای درک بهتر از چگونگی تبادل حرارت و اینکه ابرشاره در کدام قسمت یک شتاب‌دهنده قرار دارد، نمای عرضی شتاب‌دهنده CERN در شکل ۱۴ نشان داده شده است؛ ابرشاره هلیوم از درون SS collars عبور کرده و موجب کاهش دمای شتاب‌دهنده خواهد شد (SS معرف فولاد ضدزنگ^{۲۹} است).



شکل ۱۴: نمای عرضی شتاب‌دهنده CERN بدون محافظ حرارتی و محفظه خلأ [۳۶].

به طور کلی، این روش‌ها را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد که به شرح ذیل هستند.

۱.۲.۳ انتقال حرارت هدایت آزاد با فشار استاتیکی

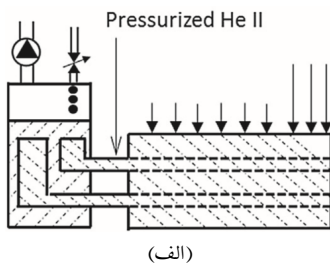
این روش ساده‌ترین راه است. انتقال حرارت هدایت به صورت آزاد توسط ابرشاره هلیوم اشباع که فشار استاتیکی ناشی از ارتفاع حمام را دارد، انجام خواهد شد [۳۸] (شکل ۱۵). همه فضای تحت بار حرارتی به حمام اشباع ابرشاره متصل است و نیز بیشترین بازده حرارتی را داراست منتهی به این دلیل که محدوده هلیوم گازی (که ابرشاره نیست) در فشارهای کم، بیشتر از فشارهای معمول (مانند ۵/۱ MPa) است، احتمال از کارافتادگی خنک‌کنندگی و به تبع آن افزایش دمای ابرسانا و از بین رفتن خاصیت ابرسانایی‌شان خواهد بود که کار شتاب‌دهنده‌ها را مختل می‌سازد. نام این رخداد را پتانسیل شکست الکتریکی^{۳۰} (PEB) گذاشته‌اند. نیازمندی به سطح

²⁰Infrared detectors ²¹Japan Torus-60 ²²Korea Superconducting Tokamak Advanced Research ²³International Thermonuclear Experimental Reactor ²⁴superconductivity ²⁵niobium ²⁶high energy accelerator ²⁷Tsukuba ²⁸cold compressor ²⁹Stainless Steel ³⁰potential electrical breakdown

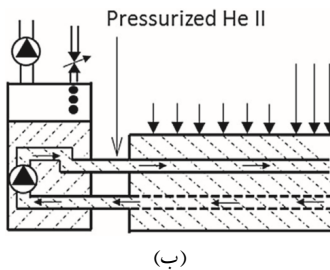
۳.۲.۳ انتقال حرارت در حمام اشباع و به دور از شتاب‌دهنده‌ها

در شکل ۱۷ انتقال حرارت در داخل حمام اشباع ابرشاره هلیم و به دور از شتاب‌دهنده‌ها صورت می‌گیرد. هرچند که بازده حرارتی این روش از روش‌هایی که تاکنون بیان شده، کمتر هستند، اما این ایده که تبادل حرارت در خارج از شتاب‌دهنده‌ها باشد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. زیرا خطر پدیده PEB و نیز نفوذ هوا به قسمت شتاب‌دهنده را از بین خواهد برد. اما این روش نیازمند به دو حمام ابرشاره است. از آن مهم‌تر این است که مبدل حرارتی مناسب (که در آن شرایط دمایی به خوبی عمل کند) باید تعبیه شود. این روش همانند قبل به دو صورت تقسیم شده است:

- هدایت آزاد (شکل ۱۷ الف) به طور عملی قابل اجرا نیست چون حمامی با حداقل ارتفاع ۷۰ متر نیاز دارد [۴۰] اما بزرگ‌ترین مزیت این ایده، جدا شدن کامل He II تحت فشار در حوالی شتاب‌دهنده از حمام ابرشاره است.
- همان گونه که در ایده قبل ذکر شد، با قرار دادن پمپ می‌توان سطح مقطع را بسیار کاهش داد ($6/3 \times 10^{-4} m^2$). اما این پمپ باید توانایی تولید جریانی با هد کم و دبی زیاد داشته باشد [۳۶]. شکل ۱۷ ب شمای کلی این روش را نشان داده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷: (الف) هدایت آزاد به همراه فشار استاتیک؛ (ب) هدایت اجباری [۳۶].

۴.۲.۳ انتقال حرارت هدایت بین حمام اشباع تحت فشار استاتیکی و شتاب‌دهنده بدون امتزاج

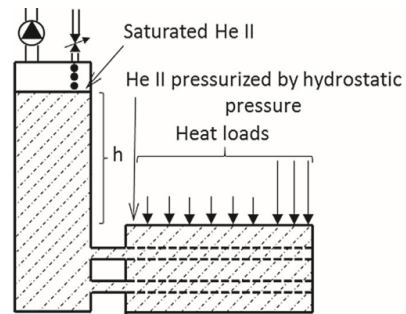
ایده بعدی انتقال حرارت هدایت بین حمام ابرشاره هلیم اشباع تحت فشار استاتیکی و شتاب‌دهنده بدون امتزاج است. این طرح تا حدودی به روشی که در شتاب‌دهنده CERN بکار گرفته شده شبیه است. در این روش خطر پدیده PEB وجود ندارد ولی به ارتفاع مناسبی از سیال ابرشاره هلیم نیاز است (در شکل ۱۸ ب می‌توان از شیر اختناق بهره برد، همانند آنچه که در گذشته ذکر شد). این طرح نیز به دو قسمت بدون پمپ (شکل ۱۸ الف) و با پمپ (شکل ۱۸ ب) تقسیم شده است. همانند قبل یکی از معایب طرح بدون پمپ نیاز آن به سطح مقطع نسبتاً بزرگ است و ایده به همراه پمپ، باید پمپی با هد کم

مقطع بزرگ نسبت به دیگر روش‌ها ($10^{-4} m^2 \times 134$) و نیز ارتفاع کافی حمام ابرشاره، از دیگر معایب این راه است.

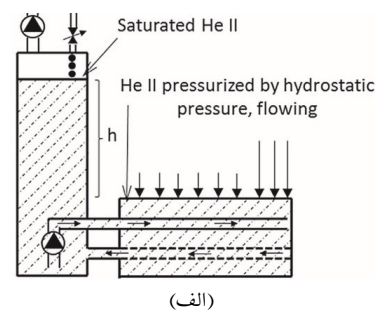
۲.۲.۳ انتقال حرارت هدایت اجباری توسط پمپ مبرد سرد

در این روش از جریان اجباری هلیم ابرشاره استفاده شده است. مزیت مهم این روش سطح مقطع بسیار کوچک ($6/3 \times 10^{-4} m^2$) مورد نیاز برای خنک‌کردن شتاب‌دهنده‌ها است. این امر سبب شده که در حال حاضر این روش خنک‌سازی در بسیاری از مراکز شتاب‌دهنده بهره گرفته شود. همانند پژوهشگاه فوق پیشرفته حوزه ذوب هسته اتمی ابرساناها کره جنوبی (KSTAR)، مرکز تحقیقات گسترده در حوزه همجوشی حرارتی هسته‌ای ژاپن (JT60-SA) و پروژه عظیم بین‌المللی ذوب هسته اتمی (ITER) [۳۹].

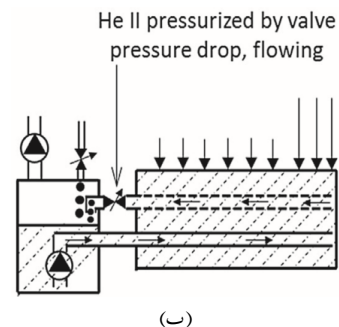
از معایب این روش می‌توان به پدیده PEB و نیاز به پمپی با هد بسیار کم و دبی زیاد اشاره نمود. دو رویکرد عمومی در این روش وجود دارد: شکل ۱۶ الف برای کنترل دمای اشباع از فشار استاتیک و در شکل ۱۶ ب از شیر اختناق برای کنترل دمای قسمت خنک‌کننده و نیز خروج مایع پمپ‌شده استفاده شده است که هر کدام از این راه‌ها ملاحظات خاص خود را دارند.



شکل ۱۵: انتقال حرارت هدایت به روش آزاد [۳۶].



(الف)



(ب)

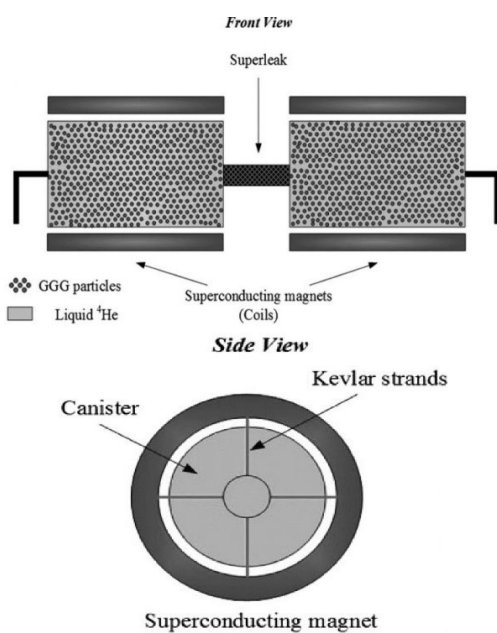
شکل ۱۶: (الف) هدایت اجباری به همراه فشار استاتیک؛ (ب) هدایت اجباری به همراه شیر اختناق [۳۶].

۳.۳ پمپ بدون حرکت مکانیکی

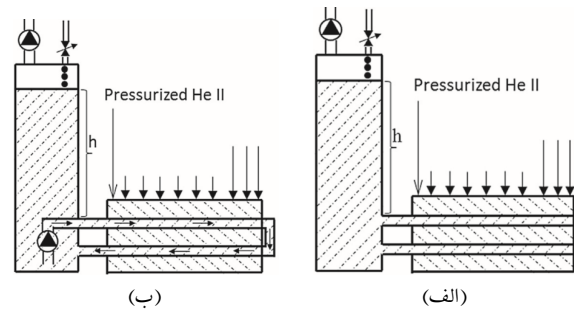
و دبی زیاد فراهم شود.

در بخش مربوط به استفاده از ابرشاره هلیم به عنوان میرد، نیاز به یک پمپ بود که در این دماها بتواند کار کند و بر حسب آن، پمپ‌های مختلفی در این زمینه ساخته شده است. در این راستا، پمپ نوین و منحصر به فردی طراحی شده که می‌تواند انقلابی در نوع خود باشد. در این پمپ به گونه‌ای از ابرشاره استفاده شده که بدون نیاز به حرکت یک پیستون در سیلندر، اختلاف فشار مطلوب را ایجاد کند. این پمپ که در زمینه خنک‌سازی دمای کلونین^{۳۱} (دمای نزدیک به صفر کلونین و کمتر از آن) قابل استفاده است که نام پمپ مغناطیسی ابرشاره^{۳۲} (SMP) را بر آن نامیده‌اند. در این پمپ، از ابرشاره ${}^4\text{He}$ یا مخلوطی از ابرشاره‌های ${}^4\text{He}$ و ${}^3\text{He}$ به عنوان سیال کارکن بکار گرفته شده است [۴۱]. این سیال میرد را درون یک قوطی فولادی ضدزنگی که از ماده متخلخل سنگ گالیوم گادولینیوم^{۳۳} (GGG) پر شده قرار داده و طی چهار مرحله، دو فرایند آدیاباتیک و دو فرایند هم‌دما، عملکردی مانند یک سیلندر پیستون خواهد داشت. این قوطی درون یک ابرسانای مغناطیسی قرار دارد که آن را در کنار قوطی دیگری با 180° درجه اختلاف (از لحاظ شرایط و مرحله‌ای که هر قوطی در آن قرار دارد) قرار داده و بین آن دو را با لوله‌ای عایق به نام superleak به یکدیگر متصل می‌کنند. شکل ۲۰ به طور شماتیک این پمپ را به تصویر کشیده است.

این پمپ در طی چهار فرایند کار می‌کند که تغییرات دما بر حسب زمان درون این پمپ در شکل ۲۱ نشان داده شده است همانطور که در شکل مشخص است فرایند یک به دو از نوع هم‌فشار آدیاباتیک و فرایند دو به سه هم‌دما هستند و فرایندهای سه به چهار و نیز چهار به یک نیز عکس این فرایندها خواهند بود [۴۱]؛ چون این پمپ پیوسته یک چرخه را طی می‌کند. شماتیک فرایندهای یک سیکل SMP در یکی از قوطی‌ها هنگام توضیح هر قسمت نشان داده شده است. هر یک از این فرایندها به طور جزئی به شرح ذیل صورت می‌پذیرد.



شکل ۲۰: شماتیک SMP [۴۲].



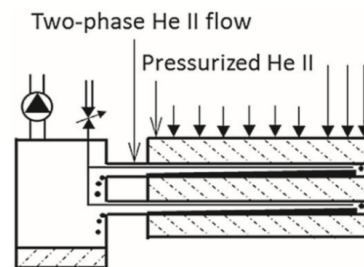
شکل ۱۸: (الف) هدایت آزاد؛ (ب) هدایت اجباری [۳۶].

۵.۲.۳ انتقال حرارت در حمام دوگانه هلیم دوفازی

آنچه که در CERN مورد استفاده قرار گرفته در شکل ۱۹ نمایش داده شده و می‌توان اذعان داشت که تاحدی ترکیبی از روش‌های توضیح داده شده قبلی است. تاکنون باید واضح شده باشد که مهم‌ترین فاکتورهای خنک‌کردن در شتاب‌دهنده‌ها مسئله PEB، سطح مقطع عرضی لوله حاوی ابرشاره و نیز بازده حرارتی هستند.

فشار هلیم تحت بار حرارتی پیوسته باید کنترل شود. هلیم مایع با فشار و دمای خاص در طول این لوله توزیع شده و بخشی از این هلیم به دلیل افزایش دما در اثر انتقال حرارت، تبخیر خواهد شد. چون هلیم تحت بار حرارتی و هلیم دوفازی از یکدیگر جدا شده‌اند خطر PEB را ندارد و به خاطر دوتایی بودن لوله، مقطع عرضی محدود خواهد شد؛ در ایده‌های قبل یک مسیر برای جریان رفت و دیگری برای جریان بازگشت تعبیه شده بود اما با راهکار پیشرو، هر مسیر مستقل از مسیر دیگر جریان رفت و برگشتی را توأمان دارد. در ضمن به دلیل استفاده از هلیم دوفازی، اختلاف دما دو نقطه در طول لوله کم شده و باعث افزایش راندمان حرارتی خواهد شد. کیفیت بخار هلیم در خروجی از شتاب‌دهنده نباید کمتر از $0.9/8$ باشد [۳۶] پس نزدیک به حالت اشباع است در حالی که انتقال حرارت در حالت اشباع باعث تغییر دما نمی‌شود. تنها اشکال این روش که در CERN استفاده شده، کنترل نسبتاً سخت آن است که به نسبت مزایای آن ارزش استفاده از آن را دارد.

نکته حائز اهمیت این است که هلیم با نیروی گرانش به مخزن ابرشاره باز می‌گردد. پس مسیر بازگشت جریان باید صاف و بعلاوه شیب منفی کوچکی داشته باشد.



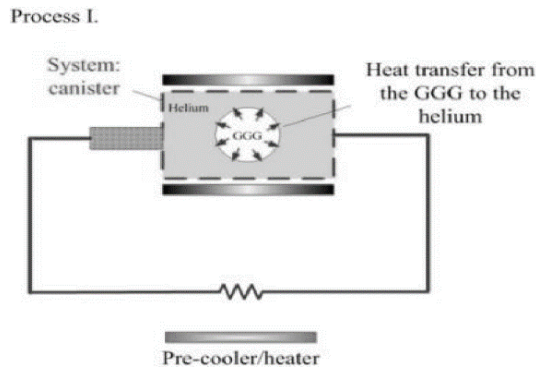
شکل ۱۹: حمام دوگانه هلیم دوفازی [۳۶].

³¹Sub-Kelvin Temperature

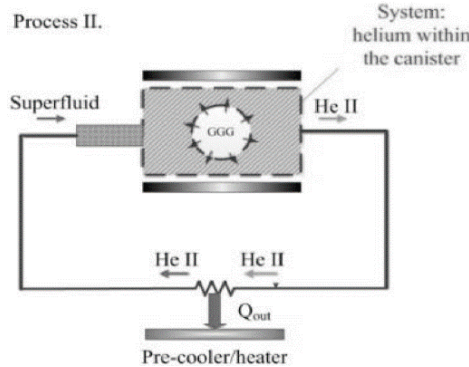
³²Superfluid Magnet Pump

³³Gadolinium Gallium Garnet

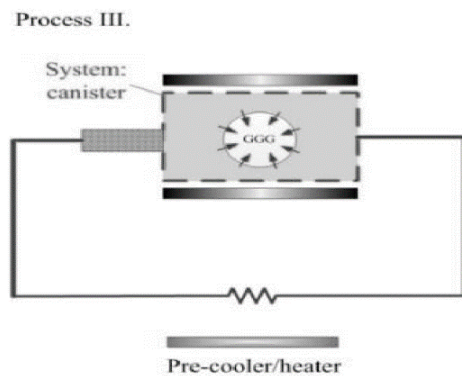
در این زمینه تهیه شده گویای این ویژگی است.



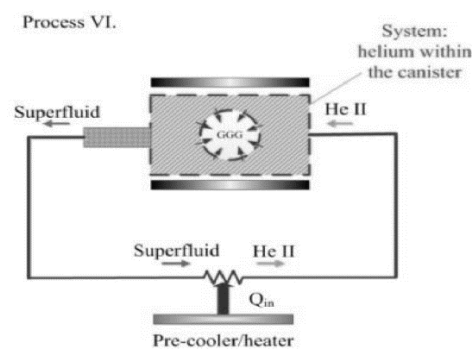
شکل ۲۲: فرایند مغناطیسی کردن به طور آدیاباتیک [۴۳].



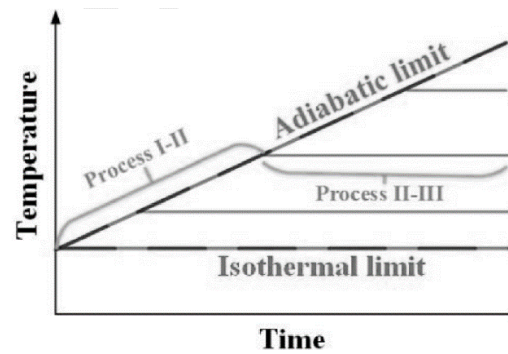
شکل ۲۳: فرایند مغناطیسی کردن به طور هم‌دم [۴۳].



شکل ۲۴: فرایند مغناطیس‌زدایی به طور آدیاباتیک [۴۳].



شکل ۲۵: فرایند مغناطیس‌زدایی به طور هم‌دم [۴۳].



شکل ۲۱: تغییرات دما در طی زمان درون یک پمپ مغناطیسی ابرشاره [۴۱].

۱.۳.۳ مغناطیسی کردن آدیاباتیک^{۳۴}

در حالت ۱ دما (T) و چگالی شار مغناطیسی (B) کمینه هستند. جریان به ابرسانای مغناطیسی وارد شده و باعث افزایش چگالی شار مغناطیسی می‌شود. سپس این میدان افزایش یافته تا چگالی شار به مقدار ماکزیمم تعیین شده برسد. همانطور که در شکل ۲۲ نشان داده شده این کار باعث افزایش دمای ماده پارامغناطیسی داخل قوطی GGG می‌شود. در انتهای این مرحله دما و چگالی شار به مقدار حداکثر خواهند رسید.

۲.۳.۳ مغناطیسی کردن هم‌دم^{۳۵}

افزایش دمای ذکرشده در مرحله قبل در GGG باعث انتقال انرژی (یا آنتروپی) به سیالی که با آن در تماس است (ابرشاره هلیوم) می‌شود. این انرژی از طریق مؤلفه عادی ابرشاره به منبع ابرشاره منتقل و برای جبران این کمبود و نیز هم‌دم ماندن دو قوطی پر از ابرشاره، ابرشاره از قوطی کناری که در مرحله چهارم است منتقل می‌شود (شکل ۲۳)؛ گویا هیچ دبی‌ای خارج و وارد نشده و تنها انرژی تولید و سپس خارج شده است. در ضمن دما و چگالی شار نیز در این مرحله ثابت مانده است.

۳.۳.۳ مغناطیس‌زدایی آدیاباتیک^{۳۶}

در حالت سوم جریان و در نتیجه میدان کاهش می‌یابد و بدین ترتیب همانند آنچه که در شکل ۲۴ نمایش داده شده، دمای ماده متخلخل GGG کم خواهد شد. دما و چگالی شار در این مرحله به حداقل مقدار خود خواهند رسید.

۴.۳.۳ مغناطیس‌زدایی هم‌دم^{۳۷}

این کاهش دما باعث می‌شود که دمای ابرشاره کم شود اما برای ثابت ماندن دما، از منبع ابرشاره، ابرشاره وارد قوطی شده و ابرشاره سردشده به قوطی کناری که در مرحله دو است منتقل می‌شود. در اینصورت دما ثابت مانده و نیز دبی خالص صفر است. شکل ۲۵ بیانگر این توضیحات است.

با کمی دقت می‌توان دریافت که برای ساخت این پمپ از عکس ویژگی ترمومکانیکی استفاده شده است، به عبارت دیگر، با استفاده از اختلاف دما در ابرشاره، می‌توان اختلاف فشار مطلوب را تولید کرد. نکته قابل توجه در این پمپ، قدرت قابل ملاحظه و بیشتر آن در برابر دیگر پمپ‌های مورد استفاده در دماهای نزدیک صفر کلوین است. جدول ۲ برای مقایسه چند پمپ معروف

³⁴adiabatic magnetization ³⁵isothermal magnetization ³⁶Adiabatic Demagnetization ³⁷Isothermal Demagnetization

معادل بالایی (۱۰۰۰ الی $\frac{W}{m \cdot K}$ ۱۰۰۰۰) هستند؛ لذا می‌توان از آن به عنوان مبرد در خنک‌کننده‌ها استفاده کرد همان طوری که از ابرشاره هلیوم در خنک‌کاری ابرسانای طراحی شده در CERN استفاده می‌شود. دمای عملکردی ابرشاره‌ها معمولاً در دمایی نزدیک به صفر مطلق است که به عنوان بزرگترین محدودیت در بکارگیری آنها در صنایع مختلف است ولی تلاش‌های زیادی برای افزایش دمای عملکردی ابرشاره‌ها با حفظ قابلیت‌های آن در حال انجام است و با توجه به اینکه تلاش‌ها برای بکارگیری ابرساناها در دمای اتاق به نتیجه مثبت نرسیده است لذا امیدها برای دست یابی به چنین امری در ابرسیالات هم بسیار پررنگ شده است. در این صورت، می‌توان از خاصیت ابرشارگی برای خنک‌کاری سیستم‌های مختلف استفاده کرد و ساخت مبدل‌های حرارتی با بازده نزدیک به ۱۰۰٪ دور از ذهن نخواهد بود. علاوه بر این، ابرشاره‌ها توانایی انتقال نیرو از یک نقطه از سیال به نقطه دیگر بدون هیچ اتلافی را دارند که همین امر می‌تواند در ساخت پمپ‌های نسل آینده بکار گرفته شود. لذا در این تحقیق سعی شده که دورنمای آینده در مهندسی مکانیک سیالات با حضور ابرسیالات به تصویر کشیده شود. در این قسمت با ارائه یک جدول (جدول ۳) چکیده‌ای از مطالب بیان شده، ارائه شده است.

جدول ۲: مقایسه عملکرد پمپ‌های مختلف در صنعت Sub-Kelvin [۴۴].

	ADR تک مرحله‌ای [۴۷]	ADR دومرحله‌ای [۴۶]	ADR ^{۳۸} پیوسته [۴۵]	SMP
قدرت خنک‌کاری در ۰/۱ K	۱۰ μW	۲ μW	۳۲ μW	$\approx 40 \mu W$
مدت زمان کاری	۲۰ ساعت	۲۰ ساعت	نامحدود	نامحدود
جرم	۱۵ kg	۱۰ kg	۸ kg	$\approx 5 \text{ kg}$

شاید این نمونه فقط برای دماهای پایین کاربرد داشته باشد اما این پمپ و الگوبرداری از آن می‌تواند صنعت پمپ را متحول سازد. پمپی که نیاز به نیروی مکانیکی و حرکت‌های مکانیکی ندارد.

۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ویژگی‌های خاصیت ابرشارگی در سیالات پرداخته و سپس در مورد کاربردهای ابرسیالات در صنایع مختلف بحث و بررسی شده است. از ویژگی‌های مهم ابرسیالات این است که دارای هدایت حرارتی

جدول ۳: جمع‌بندی و چکیده مطالب بیان شده

دومین عنصر فراوان، بی‌رنگ و بدون بو، سمی. دو ایزوتوپ پایدار از هفت ایزوتوپ، ${}^4\text{He}$ پایدارترین ایزوتوپ هلیوم، مایع شدن در ۲/۱۷ درجه کلوین (دمای بحرانی یا λ). تئوری حاکم: مدل دوشاره‌ای (دو مؤلفه‌ای: عادی و ابرشاره)	هلیوم و ویژگی‌های عادی آن
نمودار فازی؛ نداشتن نقطه سه‌گانه به دلیل بالا بودن رسانش گرمایی که اجازه تشکیل هیچ حبابی را در هنگام جوشش نمی‌دهد.	ویژگی‌های منحصر به فرد هلیوم مایع
ابرسیانایی گرمایی در دمای بحرانی تقریباً ۱۰۰۰ برابر مس به دلیل نداشتن گرادیان دمای موضعی و ظرفیت گرمایی بسیار زیاد در این دما.	
ویسکوزیته یا گرانیروی: در لوله‌های موئین بسیار باریک مقدار ویسکوزیته تقریباً صفر است. حرکت جسمی درون سیال در زیر دمای بحرانی: اصطکاک و اتلاف بسیار کم	
کارکرد ترمودینامیکی: توانایی ایجاد اختلاف دما بین دو ظرف هلیوم مایع متصل، به وسیله یک superleak در اثر اختلاف فشار. مؤلفه ابرشاره لزجت ندارد.	
اثر فیلم: تمایل شدید سیال برای رسیدن به حداقل انرژی پتانسیل	
اثر فواره: واکنش ابرشاره در برابر انرژی ذخیره شده گرمایی در هلیوم به صورت ناگهانی	
صوت دوم: رفتار هلیوم مایع در برابر ایجاد تغییر دما در درون آن. نام‌های دیگر: موج گرمایی و موج آنتروپی	
صوت سوم: رفتار هلیوم مایع در برابر ایجاد تغییر دما به روی سطح آن یا یک فیلم نازک از هلیوم مایع	
اشکارسازی: فراهم نمودن فضای بسیار مناسب جهت مشاهده حرکات ماده درون خود (سیال پس‌زمینه) مانند حرکات غیریکنواخت، حرکات براونی و یا تصادفی، به دلیل آنتالپی تبخیر و فشار بخار اشباع کم.	
تبرید در دماهای پایین: خنک‌کاری شتاب‌دهنده‌ها و رآکتورهای ذوب هسته اتمی مانند KEK، CERN، KASTAR و در این قسمت روش‌هایی از خنک‌کاری در این حوزه (صنعت دمای کلوین) بحث شده است. علت: نیاز خنک‌کاری ابرساناها در دماهای نزدیک به صفر کلوین.	
پمپ فاقد حرکت مکانیکی: با استفاده از اثر ترمودینامیکی در طی چهار فرایند ترمودینامیکی سیال در دماهای نزدیک به صفر کلوین را با قدرت بیشتر نسبت به پمپ‌های دیگر در این حوزه، پمپ می‌کند.	

turbulence. in *Quantized vortex dynamics and superfluid turbulence*, pp. 3–14. Springer Berlin Heidelberg, sep 2001.

- [4] Wang, B and Gan, ZH. A critical review of liquid helium temperature high frequency pulse tube cryocoolers for space applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 61:43–70, aug 2013.
- [5] Kapitza, Pyotr. Viscosity of liquid helium below the λ -point. *Nature*, 141(3558):74–74, 1938.
- [1] Janssen, PJC. letter extract, read by m. mathieu. *Comptes Rendue Académie des Sciences (Paris)*, 67:494, 1868.
- [2] Kresin, Vladimir Z and Wolf, Stuart A. *Fundamentals of superconductivity*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] Barenghi, Carlo F. Introduction to superfluid vortices and

³⁸Adiabatic Demagnetization Refrigerator

- [22] Mirsharifi, S and Pakpour, F. *Superconductivity Study in Liquid Helium-4 Using the Nonlinear Schrödinger Equation*. Ph.D. thesis, Arak University of Technology (in Persian), (2017).
- [23] Koh, Shun-ichiro. Nonclassical rotational behavior at the vicinity of the λ point. *Physical Review B*, 74(5):054501, 2006.
- [24] Kramer, David. Erratic helium prices create research havoc. *Physics today*, 70(1):26, 2017.
- [25] Annett, James F. *Superconductivity, Superfluids and Condensates*. Ph.D. thesis, 2004.
- [26] Donnelly, Russell J. HELIUM FOUNTAIN photographed in the 1970s. 1995.
- [27] Peshkov, V. Determination of the velocity of propagation of the second sound in helium ii. *J. Phys. USSR*, 10(1):389–398, 1946.
- [28] London, Fritz. *Superfluids: Macroscopic theory of superconductivity. v. 2 Macroscopic theory of superfluid helium*, vol. 1. Dover Publications, 1961.
- [29] Shapiro, Kenneth A and Rudnick, Isadore. Experimental determination of the fourth sound velocity in helium ii. *Physical Review*, 137(5A):A1383, 1965.
- [30] Sajjadi, Seyed, Buelna, Xavier, and Eloranta, Jussi. Application of time-resolved shadowgraph imaging and computer analysis to study micrometer-scale response of superfluid helium. *Review of Scientific Instruments*, 89(1):013102, 2018.
- [31] Feynman, RP, Leighton, RB, Sands, M, and Treiman, SB. *The Feynman Lectures on Physics Mainly Electromagnetism and Matter*. 1963.
- [32] Harris, Glen I, Baker, Christopher, Sachkou, Yauhen, Duan, Zhenglu, Harris, G I, Mcauslan, D L, Baker, C, Sachkou, Y, Sheridan, E, Duan, Z, and Bowen, W P. Optomechanics with Superfluid Helium-4. in *2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, pp. 1–2, 2015.
- [33] Minowa, Yosuke, Oguni, Yuya, and Ashida, Masaaki. Fabrication of semiconductor microspheres with laser ablation in superfluid helium. in *Optical Manipulation Conference*, vol. 10252, p. 102520N. International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [34] Bruening, Oliver Sim, Potter, K, Rossi, L, Gröbner, Oswald, Taylor, T, Linnecar, Trevor Paul R, Tsemelis, E, Schindl, Karlheinz, Weisse, E, Cappi, R, et al. Lhc luminosity and energy upgrade: A feasibility study. tech. rep., 2002.
- [35] Kumar, A, Nakai, H, Nakanishi, K, Shimizu, H, Kojima, Y, Hara, K, and Honma, T. Performance analysis for 2k heat exchanger for superfluid cryogenic system at kek. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 502, p. 012051. IOP Publishing, 2019.
- [36] Rousset, B and Millet, F. Evaluation of superfluid helium cooling schemes and application for hl-lhc recombination dipole d2. *Cryogenics*, 95:36–46, 2018.
- [37] Ueresin, C, Decker, L, and Treite, P. Modeling and commissioning of a cold compressor string for the superfluid cryogenic plant at fermilab's cryo-module test facility. *Phys. Procedia*, 67:282–287, 2015.
- [6] Corcovilos, Theodore Allen. *Fluid phase thermodynamics: I) nucleate pool boiling of oxygen under magnetically enhanced gravity and II) superconducting cavity resonators for high-stability frequency references and precision density measurements of helium-4 gas*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, 2008.
- [7] Schmitt, Andreas. Introduction to superfluidity: Field-theoretical approach and applications. *Lecture Notes in Physics*, 888:1–163, 2015.
- [8] London, Fritz. The λ -phenomenon of liquid helium and the bose-einstein degeneracy. *Nature*, 141(3571):643–644, 1938.
- [9] Balibar, Sebastien. Laszlo tiza and the two-fluid model of superfluidity. *Comptes Rendus Physique*, 18(9-10):586–591, 2017.
- [10] Landau, L. Theory of the superfluidity of helium ii. *Physical Review*, 60(4):356, 1941.
- [11] Eyring, Henry. Superfluids. volume ii: macroscopic theory of superfluid helium, 1955.
- [12] Baym, Gordon, Pethick, Christopher, and Pines, David. Superfluidity in neutron stars. *Nature*, 224(5220):673–674, 1969.
- [13] Reid, RC, Prausnitz, JM, and Sherwood, TK. The properties of gases and liquids, 3rd edn mcgraw-hill. *New York*, 1977.
- [14] Weisend, JG. Handbook of cryogenic engineering. 1998.
- [15] Peng, Feng, Sun, Ying, Pickard, Chris J, Needs, Richard J, Wu, Qiang, and Ma, Yanming. Hydrogen clathrate structures in rare earth hydrides at high pressures: possible route to room-temperature superconductivity. *Physical review letters*, 119(10):107001, 2017.
- [16] Lerario, Giovanni, Fieramosca, Antonio, Barachati, Fábio, Ballarini, Dario, Daskalakis, Konstantinos S, Dominici, Lorenzo, De Giorgi, Milena, Maier, Stefan A, Gigli, Giuseppe, Kéna-Cohen, Stéphane, et al. Room-temperature superfluidity in a polariton condensate. *Nature Physics*, 13(9):837–841, 2017.
- [17] Kürti, N, Rollin, BV, and Simon, F. Preliminary experiments on temperature equilibria at very low temperatures. *Physica*, 3(1-4):266–274, 1936.
- [18] Keesom, WH and Saris, BF. Further measurements on the heat conductivity of liquid helium ii. *Physica*, 7(3):241–252, 1940.
- [19] Norozi derazkolai, Farshad and Zomorodian, Mohammad Ebrahim. *Investigation of Liquid Helium Properties and Superconductivity*. Ph.D. thesis, 1997.
- [20] Reid, RC, Prausnitz, JM, and Sherwood, TK. The properties of gases and liquids, 3rd edn mcgraw-hill. *New York*, 1977.
- [21] Purushothaman, Sivaji. *Superfluid helium and cryogenic noble gases as stopping media for ion catchers*. University Library Groningen][Host], 2008.

- [43] Jahromi, Amir Eshraghniaye, Miller, Franklin, and Nellis, Gregory. Modeling and development of a superfluid magnetic pump with no moving parts. in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1434, pp. 223–230. American Institute of Physics, 2012.
- [44] Jahromi, Amir E and Miller, Franklin K. A sub-kelvin superfluid pulse tube refrigerator driven by paramagnetic fountain effect pump. *Cryogenics*, 62:202–205, 2014.
- [45] Castillo, L De, Frossati, G, Lacaze, A, and Thoulouze, D. Improved heat exchange in dilution refrigerators by use of continuous plastic exchangers. *preprint presented at LT13, Boulder, Colorado*, 1972.
- [46] Patel, AB and Brisson, JG. Design, construction, and performance of plastic heat exchangers for sub-kelvin use. *Cryogenics*, 40(2):91–98, 2000.
- [47] Phillips, C and Brisson, JG. Preliminary experimental results using a three-stage superfluid stirling refrigerator. in *Cryocoolers 12*, pp. 681–686. Springer, 2003.
- [38] Claudet, G, Disdier, F, Lebrun, Ph, Weymuth, P, and Morpurgo, M. Preliminary study of a superfluid helium cryogenic system for the large hadron collider. tech. rep., CM-P00063498, 1985.
- [39] Gondrand, C, Durand, F, Delcayre, F, Crispel, S, and Bagger, GM Gistau. Overview of air liquide refrigeration systems between 1.8 k and 200 k. in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1573, pp. 949–956. American Institute of Physics, 2014.
- [40] Claudet, Gérard and Aymar, Robert. Tore supra and he ii cooling of large high field magnets. in *Advances in cryogenic engineering*, pp. 55–67. Springer, 1990.
- [41] Jahromi, Amir E and Miller, Franklin K. Development of a proof of concept low temperature 4he superfluid magnetic pump. *Cryogenics*, 82:68–82, 2017.
- [42] Jahromi, Amir E and Miller, Franklin K. Novel 4he circulator for cooling of large space superconducting magnets. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 30(3):553–557, 2016.