DOI : 10.22034/jrenew.2023.183872

سال یازدهم، شماره دوم، پاییز و زمستان 1403، ص ص 165- 155

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: 400/05/13

تاریخ پذیرش: 400/09/25

مروری بر پیشینه صنعت تبرید و راهکارهای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر

سید علیرضا زرآبادی[1]، مصطفی مافی[2*]

1- دانشجو، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

* قزوین، صندوق پستی: ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸، mostafa.mafi@gmail.com

چکیده

امروزه سیستم‌های برودتی نقش بسیار مهم و اساسی را در زندگی ما ایفا می‌کنند به گونه‌ای که جهان امروز را بدون تجهیزات سرمایشی نمی‌توان تصور کرد. گستره‌ی این لوازم هر روزه بیش‌تر شده و از تجهیزات نفت و گاز وسیستم‌های تهویه مطبوع تا نظام سلامت و اغذیه را شامل می‌شود. در حوزه صنعت غذا علاوه بر پیشرفت در حیطه یخچال های خانگی و سرد خانه های مواد غذایی مختلف شاهد گسترش روز افزون فروشگاه ها هستیم که از سیستم‌های برودتی برای خنک نگه داشتن مواد عذایی استفاده می‌شود. با افزایش این تعداد از تجهیزات برودتی و توجه به این امر که که این تجهیزات یکی از اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی الکتریکی می‌باشند. در سال های اخیر مطالعات گسترده ای جهت بهینه سازی این تجهیزات چه از نظر مصرف انرژی و چه از نظر کا هش آلایدگی های محیط زیستی ناشی از انتشار ماده مبرد های مختلف صورت گرفته است. در این مقاله نگاهی جامع به پیشینه تبرید از گذشته دور تا به حال صورت گرفته است. همچنین با در نظر گرفتن چشم‌انداز های دور و لزوم استفاده از انرژی های پاک راه‌کاری در جهت تامین بخشی از این میزان انرژی مصرفی توسط انرژی های تجدید پذیر ارائه شده است.

کلیدواژگان: تبرید ، تاریخچه ، یخچال ، صنعت غذا، انرژی های تجدید پذیر

An overview of the history of the refrigeration industry and strategies for the use of renewable energy sources

S.Alireza Zarabadi[1], Mostafa Mafi[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

* P.O.B. 3414896818, Qazvin, Iran, mostafa.mafi@gmail.com

Received: 4 Aug. 2021 Accepted: 16 Dec. 2021

Abstract

Nowadays, Refrigeration systems play a very important and essential role in humans' life, so that today's world cannot be imagined without refrigeration equipment. The range of these appliances is increasing daily, ranging from oil and gas equipment to air conditioning systems and health and nutrition. In the food industry, in addition to advances in the field of home refrigerators and cold storages for types of foods, we are seeing a growing expansion of stores and supermarkets that use refrigeration systems to keep food cool. Because refrigeration equipment is one of the major consumers of electrical energy, in recent years, extensive studies have been conducted to optimize refrigeration equipment both in terms of energy consumption and pollution of the environment caused by the leak of refrigerant used in these devices. This article provides a comprehensive look at the history of refrigeration from a long time ago up to now. In this article, a comprehensive study of the history of refrigeration from the distant past to the present is taken. Also, considering the Futurology in this field and the need to use clean and renewable energies, the result was that it was necessary to supply some of the energy consumed by these systems with renewable energy.

Keywords: refrigeration, history, refrigerator, food industry, renewable energy

1- مقدمه

قرن‌هاست که مردم می‌دانند تبخیر آب اثر خنک کننده ای را ایجاد می‌کند. در ابتدا، آنها هیچ تلاشی برای شناخت و درک این پدید نکردند ، اما می‌دانستند که هر بخشی از بدن که مرطوب شود، هنگام خشک شدن در هوا احساس سرما می‌کند. حداقل در اوایل قرن دوم، تبخیر در مصر برای خنک کردن شیشه های آب مورد استفاده قرار گرفت و در هند باستان برای ساختن یخ استفاده می‌شد [1].

تبرید را می‌توان به عنوان فرایند دستیابی به درجه حرارتی پایین تر از محیط اطراف و حفظ آن تعریف کرد که هدف آن سرد نمودن برخی محصولات یا فضاها تا دمای موردنیاز است. یکی از مهم ترین کاربردهای تبرید، حفاظت از محصولات غذایی فاسدشدنی با نگهداری آن ها در دماهای پایین می‌باشد. بسیاری بر این باورند که در قرن 11 کویل هایی جهت خنک کردن و تقطیر خارهای معطر جهت استحصال عطر توسط ابن سینا اختراع شده است. درگذشته، تبرید به روشهای طبیعی مانند استفاده از یخ یا سرمایش تبخیری انجام می‌شد در طول قرون گذشته ، برداشت فصلی از برف و یخ در اکثر فرهنگ های باستانی بود: چینی ها، عبری ها، یونانی ها، رومی ها، پارس ها. یخ و برف در غارها یا حفره هایی که با نی یا سایر عایق ها پوشیده شده بودند ، ذخیره می‌شدند. ایرانیان یخ ها را در چاله‌هایی به نام یخچال ذخیره می‌کردند [2]. به طور کلی یخ در آن دوران یخ به روش‌های زیر به دست می‌آمد:

-انتقال یخ از مناطق سردتر.

-برداشت یخ در فصل زمستان و ذخیره نمودن آن در یخچال برای استفاده در تابستان.

-استفاده از آب یخ زده در طول شب به دلیل تشعشع به استراتوسفر.

در زمان های در مناطق گوناگون از موادی مانند خاک اره و یا تراشه چوب به عنوان عایق در این خانه های یخ استفاده می‌شد که بعدها با چوب پنبه به عنوان عایق جایگزین شدند. در هند امپراطوران مغول در طول تابستان در شهرهای دهلی و آگرا به علت گرمای شدید علاقه بسیاری به یخ داشته اند که ظاهراً از روش یخ زدن آب در طول شب استفاده می‌نمودند [3]. در سال 1806 فردریک تئودور که بعدها به عنوان پادشاه یخ نامیده شد، شروع به تجارت درزمینه‌ی یخ های برشی از رودخانه هادسون و برکه ماساچوست و صادرات آن به کشورهای مختلف ازجمله هند نمود. در هند یخ تئودور ارزان تر از یخ محلی ساخته شده به روش یخ زدن شبانه بود. در آن زمان تجارت یخ در شمال آمریکا کسب وکاری رو به رشد به شمار می‌آمد. در ایالت های جنوبی آمریکا تجارت یخ به وسیله حمل ونقل با واگنهای قطاری با 30 سانتی متر عایق چوب پنبه انجام می‌گرفت. تجارت یخ در چندین کشور دیگر ازجمله بریتانیا، روسیه، کانادا، نروژ و فرانسه نیز محبوبیت داشت. در این کشورها یخ از مناطق سرد و یا در زمستان برداشت شده و در یخچال‌ها برای استفاده در تابستان ذخیره می‌گردید. تجارت یخ در سال 1872 به اوج خود رسید زمانی که آمریکا به تنهایی صادرکننده 225000 تن یخ به کشورهای مختلف، حتی چین و استرالیا بود. بااین حال با ظهور تبرید مصنوعی، تجارت یخ به تدریج کاهش یافت. تبریدی که این روزها شناخته شده است با استفاده از ابزار مصنوعی تولید می‌شود. بر اساس نحوه ی عملکرد، دستگاه های تبرید را می‌توان به دستگاه های تبرید تراکمی، تبخیری، جذبی، مغناطیسی، ترموالکتریکی، چرخه گازی، ترموآکوستیکی و ماشین چرخه هوا طبقه بندی نمود. اگرچه ایجاد مرزی روشن بین تبرید طبیعی و مصنوعی دشوار است، ولی بسیاری بر این توافق اند که اولین تلاش ها برای تولید مکانیکی برودت به تأثیر خنک‌کنندگی تبخیر آب بستگی داشت. در سال 1755، ویلیام کالن، یک پزشک اسکاتلندی، دمای کافی را برای ساختن یخ به دست آورد[4].

اساس تبرید مدرن توانایی بسیار زیاد مایعات در جذب گرما هنگام جوشش و تبخیر است. پروفسور ویلیام کالن از دانشگاه ادینبورگ این موضوع را در سال 1755 با قرار دادن مقداری آب در تماس حرارتی با اتر تحت مکش از پمپ خلأ (با استفاده از یک ظرف بسته با یک پمپ هوا) نشان داد. نرخ تبخیر اتر به علت استفاده از پمپ خلأ افزایش یافت و موجب یخ زدن آب گردید. در فشار بسیار کم مایع در دمای پایین به نقطه جوش رسیده و بخار می‌شود. گرمای لازم برای تغییر بخشی از آب از فاز مایع به بخار از بقیه آب گرفته شد و حداقل بخشی از آب باقیمانده به یخ تبدیل شد[5]. این فرایند شامل دو مفهوم ترمودینامیکی فشار بخار و گرمای نهان است. مایع در فشاری به نام فشار اشباع، که فقط به دما وابسته است، در حالت تعادل گرمایی با بخار خود است. به عنوان مثال اگر فشار دیگ زودپز افزایش یابد آب در دمای بالاتری به جوش می آید. مفهوم دوم این است که مایع برای تبخیر شدن، نیاز به گرمای نهان در طول فرآیند تبخیر دارد. اگر گرمای نهان از مایعی گرفته شود مایع سرد می‌شود. تا زمانی که پمپ خلأ، فشاری برابر با فشار اشباع در دمای مورد نظر را حفظ کند درجه حرارت اتر ثابت باقی خواهد ماند. این امر مستلزم حذف تمام بخارات ایجاد شده به دلیل تبخیر است. اگر درجه حرارت پایین تری مدنظر باشد، فشار اشباع کمتری توسط پمپ خلأ می بایست ایجاد شود. تجهیزی در دستگاه های مدرن تبرید که در آن سرما به این روش تولید می‌شود اواپراتور نامیده می‌شود.

2- آغاز تبرید مکانیکی

اگر این روند سرد شدن به صورت مداوم باشد، بخارات می‌بایست توسط تراکم به حالت مایع تقطیر شوند. فرایند تراکم نیاز به دفع حرارت به محیط اطراف دارد. در واقع می‌توان بخارات را در دمای اتمسفر با افزایش فشار متراکم نمود. فرایند تراکم در نیمه دوم قرن 18 شناخته شد. بنابراین یک کمپرسور جهت حفظ فشار بالا لازم است به طوری که بخارات را به توان در درجه حرارت بیشتر از محیط حفظ نمود. الیور ایوانس در کتاب خود "راهنمای تکمیلی مهندسین بخار جوان" که در سال 1805در فیلادلفیا منتشرشده است، به توصیف چرخه تبرید بسته برای تولید یخ به وسیله اتر تحت خلأ پرداخته است[6]. در سال 1834 ، جیکوب پرکینز دستگاه فشرده سازی بخار را با یک کمپرسور، کندانسور، اواپراتور و یک بخش مخروطی شکل بین کندانسور و اواپراتور ساخت و ثبت کرد [7]. از آن دستگاه برای تولید مقدار کمی یخ استفاده می‌شد اما از نظر تجاری مورد استفاده قرار نمی‌گرفت. بعد ها جان هگو طراحی مدل پرکنیز را با تغییراتی همراه ساخت. ماشین پرکنیز اولین سیستم فشرده سازی بخار استفاده شده برای سولفوریک (اتیل) یا متیل اتر بود. یک مهندس آمریکایی بنام الکساندر توئینگ (1801-1884) حق ثبت اختراع بریتانیا را در سال 1850 برای یک سیستم فشرده سازی بخار با استفاده از اتر، آمونیاک و دی اکسید کربن دریافت نمود [4]. دستگاه های برودتی بین سالهای 1850 و 1880 ظاهر شدند و آنها را می‌توان با توجه به ماده مبرد طبقه بندی کرد. ماشین هایی که از هوا به عنوان مبرد استفاده می‌کنند، ماشین های هوای فشرده یا ماشین های هوای سرد نامیده می‌شدند و در تاریخچه تبرید نقش مهمی داشتند. دکتر جان گوری ، یک آمریکایی بود

که یک ماشین واقعی هوای سرد تجاری تولید کرد و آن را در انگلستان در سال 1950 و در 1951 در آمریکا به عنوان اختراع ثبت کرد [8]. دستگاه های برودتی با استفاده از هوای سرد به عنوان مبرد به دو نوع چرخه بسته و چرخه باز تقسیم می‌شوند. در چرخه بسته، هوای محصور شده در دستگاه با فشار بالاتر از فشار اتمسفر به طور مکرر در طول فرایند کارکرد استفاده می‌شود. در چرخه باز، هوا با فشار اتمسفر به دستگاه کشیده می‌شود و هنگام خنک شدن، مستقیماً در فضای خنک کننده تخلیه می‌شود. کرک در سال 1862 یک دستگاه خنک‌کننده چرخه بسته را توسعه داد و فرانتز ویندوزهاوس یک دستگاه چرخه بسته را اختراع کرد و در سال 1870 آنرا در ایالات متحده به ثبت رساند. دستگاه های برودتی چرخه باز که به طور نظری توسط کلوین و رانکین در اوایل دهه 1850 بیان شده است توسط یک فرانسوی به نام پل گیفارد، در سال 1873 و توسط جوزف جی کلمن و جیمز بل در انگلیس در سال 1877 اختراع شد [9].

همانگونه که پیشتر اشاره شد یکی از اولین سیستم‌های تراکمی بخار توسط یک استاد آمریکایی ، الکساندر سی توینینگ، در سال 1853 اختراع و ثبت شد. وی با استفاده از این سیستم کارخانه تولید یخ را در کلیولند، اوهایو تأسیس کرد و می‌توانست نزدیک به یک تن در روز تولید کند. پس از آن تعدادی دیگر از مخترعین دستگاه های فشرده سازی بخار که از اتر یا ترکیبات آن استفاده می‌کردند، آزمایش کردند [10]. مواد جدید، به عنوان مثال، آمونیاک و دی اکسید کربن، که از آب و اتر مناسب تر بودند، توسط فارادی، تیلور و دیگران توسعه داده شده و در دسترس قرار گرفتند و نشان دادند که این مواد قابل مایع شدن هستند. کلوئت و مونگه so_2 را در سال 1780 به مایع تبدیل نمودند و ون ماروم و ون تروسویک آمونیاک را در سال 1887 به مایع تبدیل کردند. پیشینه نظری مورد نیاز برای تبرید مکانیکی توسط رامفورد و دیوی ارائه شده است که ماهیت گرما را توضیح داده بودند، و توسط کلوین، ژول و رانکین کارهایی را که کارنو آغاز کرده بود، ادامه داده شد و به صورت فرمول بندی در علم ترمودینامیک تدوین گشت [11]. سازنده ی عملی سیستم تبرید تراکمی بخار با استفاده از بخار اتر، الکل یا آمونیاک را می‌توان جمیز هریسون در سال 1856 نام برد. چارلز تیلر فرانسوی در سال 1864 اختراع سیستم تبرید دی متیل اتر که نقطه جوش آن 23/6- درجه سانتی گراد است را ثبت نمود. کارل ون لینده در مونیخ اقدام به معرفی کمپرسور دومرحله ای آمونیاک نمود. از آن به بعد آمونیاک به طور گسترده در کارخانه های بزرگ تبرید استفاده گردید. در سال 1860، تلیر یک دستگاه فشرده سازی آمونیاک را توسعه داد. در سال 1872، دیوید بویل تجهیزات مورد نیاز برای تولید یخ را ساخت و در سال 1872 آن را به عنوان اختراع در آمریکا به ثبت رسانید. با این وجود ، مهمترین چهره در توسعه ماشین های فشرده سازی آمونیاک لینده بود که در سال 1876 آن را اخراع کرد و در سال بعد در کارخانه نوشیدنی سازی تریست نصب شد. بعد ها، مدل لینده بسیار محبوب شد و با جزئیات مکانیکی بسیار عالی در نظر گرفته شد [12]. در سال 1860، یک مهندس فرانسوی، فردیناند پی ادموند کاره ، دستگاه جذبی آمونیاک را بر اساس میل شیمیایی آمونیاک برای آب اختراع کرد ، که یخ را در مقیاس محدود تولید می‌کرد که علیرغم محدودیت های خود، پیشرفت چشمگیری را نشان داد. دستگاه وی پمپ دستی داشت و می‌توانست مقدار کمی از آب را در حدود 5 دقیقه یخ بزند. سیستم وی مدتی در پاریس مورد استفاده گسترده قرار گرفت، اما مشکل اساسی داشت و این چالش مهم به این دلیل به وجود آمد که اسید سولفوریک به سرعت با آب رقیق می‌شود و خواص فیزیکی و ترمودینامیکی خود را از دست می‌دهد. واحد یخ ساز جذبی در مقیاس نسبتاً بزرگ در سال 1878 توسط وینند هاسون ساخته شد. این عمل به طور مداوم با کشیدن آب از اسید سولفوریک با گرمای اضافی برای افزایش وابستگی عمل می‌کرد [6]. با این حال استفاده از آمونیاک در دستگاه های تبرید تراکمی یک قدم قابل توجه روبه جلو بود. علاوه بر مزیت ترمودینامیکی، فشارهای لازم برای تولید آن آسان بود و ماشین آلات استفاده شده از آن می‌توانستند از نظر اندازه کوچک باشند. در اواخر سال 1860، ون در وید از فیلادلفیا ثبت اختراعی را برای واحد فشرده سازی که شامل یک مبرد متشکل از فرآورده های نفتی بود انجام داد. در سال 1875 ، پیکتت در دانشگاه ژنو یک دستگاه فشرده سازی را معرفی کرد که از اسید سولفوریک استفاده می‌کرد. در سال 1866، لاوه آمریکایی، تجهیزات برودتی که از دی اکسید کربن استفاده می‌کرد را توسعه داد. دستگاه های تراکمی با مبرد دی اکسید کربن به دلیل بی ضرر بودن گاز در تاسیساتی که امنیت اصلی ترین دغدغه آنها بود، اهمیت پیدا کردند گرچه تا سال1890 مورد استفاده گسترده قرار نگرفتند [12]. بین سالهای 1880 و 1890 ، تاسیسات فشرده سازی آمونیاک بسیار رایج شد. در سال 1890، سیستم تبرید مکانیکی ثابت کرده بود که برای صنعت مواد غذایی کاربردی و اقتصادی است. اروپایی ها بیش‌تر زمینه های نظری را برای توسعه یخچال مکانیکی فراهم می‌کردند، اما آمریکایی ها بین سالهای 1850 و 1880 به طور گسترده در بحث امور تجاری و ثبت اختراع فعالیت داشتند. تغییرات انقلابی یک قاعده نبود، اما پیشرفت های بسیاری در چندین کشور در طراحی و ساخت واحدهای یخچال و همچنین در اجزای اصلی آنها، کمپرسورها، کندانسورها و تبخیر کننده ها انجام شد [13،14]. وینهانس سیستم تراکم بخار بر پایه co_2 (کربن دی اکسید) را در سال 1886 در آلمان تولید کرد. دی اکسید کربن احتیاج به یک کمپرسور برای فشار حدود 80 اتمسفر دارد که ساخت آن را با پیچیدگی همراه می‌ساز. لینده در سال 1882 و لاو در سال 1887 در ایالات متحده آمریکا روی دستگاه های مشابه تلاش نمودند. سیستم co_2 سیستم بسیار ایمنی است و در سردخانه کشتی تا 1960 استفاده می‌گردید[4]. در فرانسه ، کری یک دستگاه فشرده سازی اتر را توسعه و نصب کرد و چارلز تلیر (که از پیشگامان یخچال مکانیکی بود) با استفاده از متیل اتر به عنوان مبرد، یک کارخانه ساخت. در آلمان، کارل لینده، با تأمین مالی برای نوشیدنی ها، یک واحد متیل اتر در سال 1874 تأسیس کرد. درست پیش از این، لینده با نشان دادن چگونگی محاسبه و افزایش راندمان ترمودینامیکی آن، راه را برای پیشرفت های مهم در ماشین های برودتی هموار کرده بود[5]. رائول پیکته از so2 (نقطه جوش نرمال $-10°C$) استفاده نمود. فشار آن به حدی پایین بود که از ورود هوا به داخل سیستم جلوگیری می‌نمود. پالمر در سال 1890 از C2H5Cl در کمپرسورهای دوار استفاده نمود. او آن را با C2H5Br برای کاهش قابلیت اشتعال مخلوط نمود. ادموند کوپلند وهری ادواردز ایزوبوتان را در سال 1920 در یخچال های کوچک استفاده نمودند که در سال 1930 جایگزین آن CH3Cl گردید. کریر دی کلرو اتیلن را در سال 1922 تا 1926 در کمپرسورهای سانتریفوژ استفاده نمود. به مرور زمان یخچال های خانگی به صورت مکانیکی شروع به صنعتی شدن و مکانیزه شدن نمودند.

3- یخچال های خانگی در گذر زمان

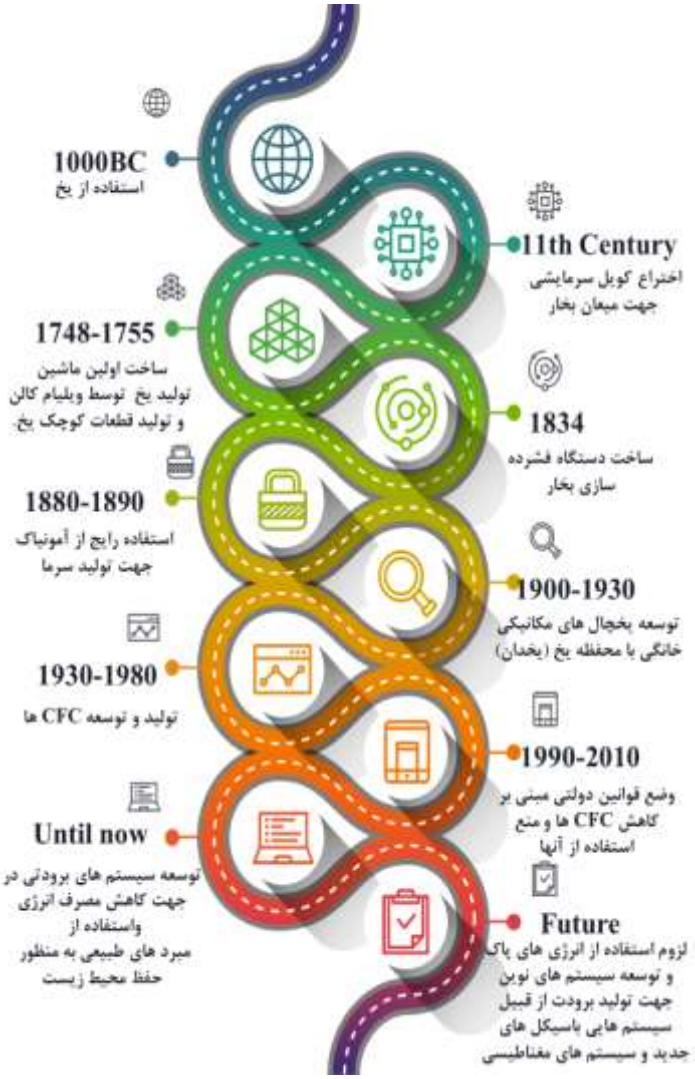
یخچال خانگی با استفاده از یخ طبیعی (جعبه یخ خانگی)در سال 1803 اختراع شد و برای تقریباً 150 سال بدون تغییر مورداستفاده قرار گرفت. جعبه یخ از چوب با عایق مناسب ساخته می‌شد. یخ بالای جعبه قرار داده می‌شد و با انتقال حرارت از یخ توسط همرفت طبیعی درجه حرارت پایین را فراهم می‌ساخت. یک لوله برای جمع آوری آب ناشی از ذوب یخ استفاده می‌گردید. در سال 1913 ، یخچال و فریزر برای مصارف خانگی توسط فرد دبلیو گرگ از فورت وین، ایندیانا، اختراع شد و شامل بخشی بود که در بالای یک جعبه یخ سوار بود [15،16].

اگرچه مفهوم این موضوع کاملاً ساده است، اما جعبه یخ معایب زیادی داشت. کاربر می‌بایست به محض آب شدن یخ جعبه را پر از یخ می‌نمود، و حداقل دمای تولید شده در داخل سیستم محدود بود. علاوه بر این، زمستان های گرم، منجر به کمبود شدید یخ طبیعی می‌شد. ازاین رو تلاش ها از سال 1887 به منظور پیشرفت یخچال ها با استفاده از دستگاه های مکانیکی آغاز گردید. یخچال های مکانیکی اولیه پرهزینه و تقریباً غیر خودکار و تا حدی غیرقابل اعتماد بودند. با این حال پیشرفت یخچال خانگی مکانیکی در مقیاس های بزرگ، با توسعه‌ی کمپرسورهای کوچک، کنترل خودکار مبرد، آب بندی بهتر شفت‌ها، تحولات در دستگاه های قدرت الکتریکی و موتورهای القایی صورت می‌پذیرفت. شرکت جنرال الکتریک اولین یخچال خانگی را در سال 1911 معرفی نمود که توسط فریجیدر در سال 1915 ادامه پیدا نمود. کلویناتور یخچال خانگی مکانیکی را در سال1918 در ایالت متحده آمریکا راه اندازی نمود. در سال 1925 در ایالت متحده آمریکا حدود 25 میلیون یخچال خانگی وجود داشت که تنها 75000 از آن مکانیکی بودند، بااین حال ساخت یخچال خانگی رشد بسیار سریعی داشت و تا سال 1949، سالانه حدود 7 میلیون یخچال خانگی در آمریکا تولید می‌شد. با افزایش حجم تولید، قیمت ها به شدت سقوط کرد و قیمت 600 دلار در سال 1920 به 155 دلار در سال 1940 تبدیل گردید. در یخچال های اولیه عمدتاً از دی اکسید گوگرد و گاهی از کلراید متیل و متیلن کلراید به عنوان مبرد استفاده می‌شد در دهه ی 1930 مبرد فرئون (R12) جایگزین آن ها شد. ساخت و توسعه CFC ها با تولید R12 در سال 1931 و در پی آن R11 در سال 1932 آغاز گردید و همچنین ظهور اولین HCFC با نام R22 در سال 1936 صورت گرفت [17]. در ابتدا این یخچال ها با کمپرسورهای نوع باز که موتور آن ها به وسیله تسمه با کمپرسور کوپل شده بود، ساخته می‌شدند. شرکت جنرال الکتریک در سال 1926 برای اولین بار یخچال هایی با کمپرسور بسته ساخت. خیلی سریع کمپرسورهای نوع باز به طور کامل به کمپرسورهای بسته تبدیل شدند. اولین یخچالی که به صورت گسترده توزیع شد ساخته شرکت جنرال الکتریک بود که در سال 1927 با کمپرسوری که گرمای زیادی تولید می‌کرد منتاژ و تولید شد [18]. در اولین یخچال ها کندانسور آبی استفاده می‌شد که پس از مدتی کندانسور هوایی جایگزین آن ها گردید. اگرچه توسعه یخچال های مکانیکی در ایالات متحده آمریکا بسیار سریع بود ولی در کشورهای دیگر به ندرت مورداستفاده قرار می‌گرفت. در سال 1930 فقط خانواده های ثروتمند از یخچال در اروپا استفاده می‌نمودند. سیستم‌های برودتی جذبی خانگی، بر اساس پیشنهاد پلاتن و مانترز برای اولین بار توسط شرکت الکترولوکس در سال 1931 در سوئد ساخته شد. در ژاپن اولین یخچال مکانیکی در سال 1924 تولید شد. اولین یخچال خانگی با دمای دوگانه (یخچال به همراه فریزر)در سال 1939 ساخته شد. استفاده از یخچال فریزرهای مکانیکی خانگی به سرعت در سراسر جهان پس از جنگ جهانی دوم رواج یافت. امروزه یخچال فریزر خانگی، نه تنها در کشورهای توسعه یافته، بلکه در کشورهای توسعه نیافته نیز به وسایل ضروری در آشپزخانه مبدل گردیده است. به جز تعداد بسیار کمی، تقریباً تمام یخچال های خانگی امروزی مکانیکی هستند که از کمپرسور بسته و کندانسور هوایی استفاده می‌کنند. مبرد یخچال های مدرن از نوع R134a (هیدرو فلئورو کربن) یا ایزو بوتان است. دستگاه های تبرید همچنین به منظور خنک کردن و رطوبت گیری در تابستان، برای راحتی اشخاص کاربرد دارد. اولین دستگاه های تهویه مطبوع برای محیط های صنعتی و همچنین راحتی افراد مورداستفاده قرار گرفت. ایستمن کداک اولین سیستم تهویه مطبوع را در سال 1891 در رچستر نیویورک برای ذخیره سازی فیلم های عکاسی استفاده نمود. در سال 1902 سیستم تهویه مطبوع در یک چاپخانه و در سال 1904 در صنعت مخابرات در هامبورگ نصب گردید. در حدود سالهای 1900، دستگاه های تهویه مطبوع به وفور در صنایع تنباکو و نساجی به کار رفتند. اولین سیستم تهویه هوای مطبوع خانگی در سال 1894 در خانه ای در فرانکفورت نصب شد. کتابخانه‌ای خصوصی در سنت لوئیس ایالت متحده آمریکا در سال 1895 و همچنین هتل مونت کارلو در سال 1901 از سیستم تهویه مطبوع استفاده نمودند. تلاش هایی نیز برای مطبوع ساختن هوای واگن های قطارهای راه آهن با استفاده از یخ صورت پذیرفت. توسعه گسترده تهویه مطبوع به دانشمند و صنعتگر آمریکایی ویلیس کریر نسبت داده شده است .کریر در سال 1902 بر روی کنترل رطوبت و در سال 1904 بر روی هواشوی (ایرواشر) مطالعه نمود. با توجه به تلاشهای وی درزمینه ی تهویه مطبوع و توسعه همزمان قطعات و سیستم‌های کنترلی مختلف تهویه مطبوع، به خصوص از سالهای 1923 به بعد، این سیستم‌ها به سرعت محبوب گردیدند [4].

4- صنعت سرد خانه و توسعه آن

با توسعه سیستم‌های برودتی از جمله سیستم‌های برودتی خانگی (یخچال ها) موضوع حمل و نقل محصولات مختلف از یک نقطه به نقطه دیگر به چالشی تازه مبدل شد. جابجایی مواد غذایی فاسد شدنی حتی در فاصله کوتاهی از محل تولید تا نقطه مصرف آن نیاز به غلبه بر موانع بسیاری دارد. میزان این موانع توضیح می دهد که چرا فناوری های زنجیره سرما با سرعت زیادی توسعه می‌یابند. لازم به ذکر است که امکان خنک کنندگی برای بسیاری از غذاهای قابل فساد تا اواخر دهه 1920 وجود نداشت. حفظ محصولات غذایی و انتقال آنها به عوامل بسیاری بستگی داشت ولی اگر محصولی با کیفیت لازم به دست مشتری نمی‌رسید، مصرف کنندگان غالباً تکنولوژی یخچال را سرزنش می‌کردند و این مسئله ارزش کل زنجیره سرما را زیر سوال می‌برد. برای جلوگیری از این وضعیت، همه افراد درگیر ایجاد زنجیره سرما تولیدکنندگان مواد غذایی، حمل و نقل، شرکت های ذخیره سازی و تولیدکنندگان تجهیزات انگیزه بسیاری برای همکاری با یکدیگر داشتند. وقتی یخچال و فریزر به نفع مصرف‌کنندگان بود، برای همه آن ها سودآور شد. با وجود این انگیزه، بسیاری از شرکت های مرتبط با صنعت تبرید نتوانستند قبل از ایجاد پیوندهای مختلف زنجیره سرمای توسعه یافته به شکل های مدرن خود ، درآمد کسب کنند. آنچه در تئوری ایده خوبی برای فرانسیس بیکن در سال 1924 به نظر می‌رسید، همیشه در عمل سودآور نبود. بعضی اوقات مصرف کنندگان در حالی که منتظر

کمال یک فناوری خاص هستند، بی تاب می‌شوند. بعضی اوقات کارآفرینان نمی‌توانستند بازارهایی را برای محصولات جدید ایجاد کنند که بیش‌تر مصرف-کنندگان مایل نبودند و یا نمی‌توانستند از پس آن برآیند. بعضی اوقات تقاضا برای یک کالای خاص بسیار فراتر از فناوری موجود برای حفظ و حمل و نقل آن رفته است. این مشکلات حتی با افزایش تقاضا برای تبرید به طور کلی سرعت تغییرات تکنولوژی را کندتر کرد. علیرغم چنین مشکلاتی، زنجیره مدرن سرما بین سال 1806 و عصر حاضر پدیدار شد. این روند طولانی و پیچیده در طی چهار مرحله جدا از هم قرار گرفت. این روند زمانی شروع شد که مردم برای اولین بار یاد گرفتند که سرما تولید کنند. احاطه چیزی با یخ باعث سردتر شدن آن می‌شود. هنگامی که دانشمندان توانستند سرمای مصنوعی ایجاد کنند، حفظ و حمل و نقل مواد غذایی قابل فساد نیز ممکن شد. با این حال زمان بیشتری لازم بود تا اینکه تجهیزات تبرید مکانیکی مقرون به صرفه و کارآمد شوند. این امر به صنعت یخ اجازه داد تا به خوبی در عصر تبرید مکانیکی زنده بماند. هنگامی که تلاش برای ایجاد سرما موفقیت آمیز شد، مردم شروع به یادگیری مدیریت سرما نیز کردند و مرحله دوم زنجیره سرما به وجود آمد. این به معنای تحویل سرما در یک فضای خاص برای مدت طولانی است. اگر یکبار مواد غذایی قابل فاسد شدن خراب شود ، برای همیشه فاسد می‌شود. این توضیح می‌دهد که چرا پس از ایجاد یخچال و فریزر مصنوعی، اعتماد به نفس این فناوری به اولویت مهندس یخچال و فریزر تبدیل شد. مهندسان برودت همچنین برای کوچک کردن دستگاه های برودتی بسیار سخت کار کرده اند تا هم از نظر قیمت مناسب و هم راحت تر باشند. اولین دستگاه های برودتی قابل فروش، وزن های زیادی(چند تن) داشتند. یخچال مکانیکی زیرساخت های زنجیره سرما را قبل از اینکه یخچال و فریزر تبدیل به یک محصول مصرفی شود، تشکیل داد. به عنوان مثال، توسعه یخچال و فریزر مکانیکی برای کشتی ها، تجارت بین قاره ای را در کلیه محصولات فاسد شدنی، خصوصاً گوشت امکان پذیر کرد. کوچک کردن دستگاه های برودتی برای اهداف کشتی یا مصارف دیگر چندین دهه طول کشید. توسعه برودت مکانیکی مبتنی بر حمل و نقل تا قرن بیستم به طول انجامید. تولید یخچال و فریزر قابل اطمینان خانگی تقریباً مدتی به طول انجامید زیرا مهندسان مجبور بودند برای تولید سرما، کل فن‌آوری را بازآفرینی کنند. با دسترسی بیش‌تر مردم به یخچال، مصرف-کنندگان از راحتی قابل توجهی به واسطه این محصولات بهره‌مند شدند. اگر برودت محصولات فساد پذیر در هر مرحله در طول زنجیره سرما هزینه زیادی داشت یا اینکه تجهیزات در هر یک از این مراحل غیرقابل اطمینان باشد، توسعه زنجیره سرما می‌توانست متوقف شود. هرچه توانایی مدیریت سرما امکان پذیر شد، مردم یاد گرفتند که دما را با دقت کنترل کنند. این نمایانگر مرحله سوم ایجاد زنجیره سرما است. غذاهای مختلف در دماهای مختلف بهترین حالت را حفظ می‌کنند و اگر همه آنها را در یک درجه حرارت نگه‌داری شوند بعضی از آنها طعم کمتری نسبت به ایده آل می‌گیرند. دارندگان یخدان در اواسط قرن نوزدهم تا اوایل قرن بیستم با این مشکل روبرو شدند، زیرا هیچ راهی برای کنترل دمای یک بلوک یخ وجود نداشت. سردخانه ها ، ایستگاه های راه در امتداد زنجیره سرما، با همین مشکل مواجه هستند زیرا که حجم و تنوع کالاهای حمل شده در زنجیره های سرما بعد از 1900 گسترش یافته است. آلودگی که ممکن است در صورت ذخیره محصولاتی مانند ماهی و تخم مرغ در کنار هم اتفاق بیفتد نیز یکی دیگر از مسائل مشکل ساز است زیرا غذاهایی که در همان درجه حرارت قرار دارند می‌توانند با سرعت های مختلف از بین بروند. پس از حل این مشکلات، استفاده از سیستم‌های برودتی به طرز چشمگیری گسترش یافت. با دستیابی به این اهداف، بسیاری از مشاغل مرتبط با زنجیره سرما شروع به توسعه و گسترش آن کردند. هر دو نوع رشد نشانگر مرحله آخر در ایجاد زنجیره سرما است و حتی امروز نیز ادامه دارد. سیستم‌های برودتی و سرد خانه ها در سالهای اخیر، تقریباً همیشه در حال توسعه هستند. امروزه، هر کالای قابل فساد می‌تواند از یک نقطه به جهان دیگر سفر کند و تنها صدمه ای که بر اثر آن وارد می‌شود، ناشی از اثرات اجتناب ناپذیر حفظ درجه حرارت پایین بر طعم و مزه است. این صنعت امروزه بسیار لازم و ضروری بوده و سود زیادی را برای صاحبان خود دارد. نتیجه آن گسترش زنجیره های سرما در سراسر جهان از نظر ابعاد و تعداد است [19].



در سال های اخیر مطالعات گسترده ای پیرامون سرد خانه ها، سیستم‌های برودتی استفاده شده در آنها، نوع مبرد ها ی به کار برده شده و همچنین مبرد های طبیعی که به علت قوانینی جهت حمایت از محیط زیست اجرایی گشته اند از جمله منع استفاده از CFC ها به علت تخریب لایه اوزون صورت گرفته است. همچنین در سیستم‌های آبشاری برای ساخت سرد خانه های دو منظوره مطالعاتی پیرامون تاثیر ترکیب مختلف از جمله آمونیاک و کربن دی اکسید و ... صورت گرفته است. مضاف بر موارد گفته شده در حوزه تکنولوژی های جایگزین سیستم تراکمی به عنوان مثال برای سیستم جذبی به مطالعه مروری

رامانا و تالپادا وهمچنین مطالعه مروری شیرینگ و همکاران اشاره کرد [20،21]. در سیستم‌های سرمایشی ترمو الکتریکی می‌توان به مطالعه مروری لیفت و ما استناد داشت [22] و یا در سیستم‌های ساده با سیکل هوا می‌توان به مطالعه جیجل رجوع کرد [23]. در نهایت یکی دیگر از سیستم‌های جایگزین سیستم‌های تبرید مغناطیسی می‌باشد که در این راستا مطالعه ی مروری تیشین و همکاران جامع و مناسب می‌باشد [24]. شکل 1 شماتیکی از تاریخچه تبرید از گذشته تا حال را با دورنمایی از آینده به نشان می‌دهد.

شکل 1 شماتیکی از توسعه تبرید از گذشته تا به حال و ارائه مسیر آینده تکنولوژی در این صنعت براساس این مطالعه

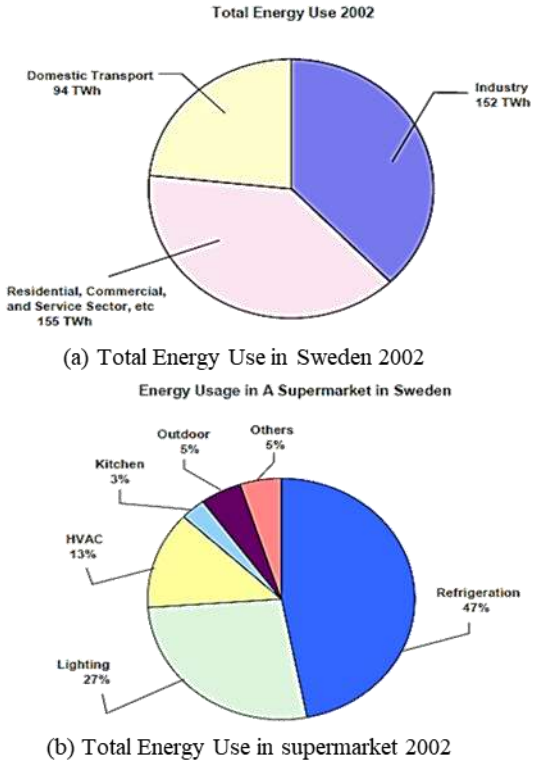
5- صنعت برودت و مصرف انرژی

به طور کلی در حوزه صنعت تبرید و به ویژه تبرید تراکمی علاوه بر مقالات، موسسات و سازمان استاندارد کشور های مختلف درباره سیستم برودتی وملزومات آن گزارش هایی ارائه کرده اند. رابرت کرامر و همکاران مشخصات و هزینه های سرد خانه های کوچک به همراه بار حرارتی آنها در ماه های مشخصی محاسبه و گزارش کردند [25]. موسسه ICE-E در سال 2014 در حوزه سرد خانه ها و نگهداری محصولات، اطلاعات 329 سردخانه را مستخرج کرده با هدف کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گاز های گلخانه ای و نتایج خود را در قالب گزارشی در سال 2014 ارائه کردند [26]. موسسه سرمایش، گرمایش و تهویه مطبوع استرالیا در سال 2007 گزارشی پیرامون مبرد های طبیعی جایگزین از جمله آمونیاک و کربن دی اکسید تهیه کرده است و همچنین در این گزارش به معرفی و بررسی تکنولوژی های روز سیستم های برودتی از جمله سیستم‌هایی با مبرد ثانویه کربن دی اکسید پرداخته شده است. این گزارش شامل معرفی تکنولوژی هایی می‌شود که منجر به کاهش فلوئورو کربن ها می‌شوند، است. همچنین در انتهای گزارش به بررسی و مطالعه موردی از کاربرد های عملی مبرد های طبیعی و نتایج آن پرداخته شده است [27]. هو و همکاران به ارائه مدلی جهت ارزیابی اثرات کربن اعم از گرمایش زمین و انتشار گازهای گلخانه ای در سیستم‌های تبرید جهت انتقال مواد غذایی پرداختند. آنها در این مدل تمامی اثرات ناشی از تجهیزات برودتی و مبرد ها را در نظر گرفته اند. در مدل آنها ارزیابی سه مبرد مختلف در شرایط دماهای محیطی مختلف، دماهای تبرید مختلف صورت گرفته است [28]. کارسون و همکاران به مطالعه مروری در حوزه زنجیره سرمایشی در کشور نیوزلند داشتند. آنها بیان داشتند که حدود 45 درصد از کل صادرات نیوزلند مربوط به محصولات غذایی و محصولات جانبی آن بوده که حدود 60 درصد از این میزان محصولات به صورت منجمد ارسال می‌گردد. بیشترین حجم و میزان به ترتیب شامل :صنایع لبنی، صنایع گوشت قرمز، صنعت کشاورزی، صنعت محصولات دریایی است. همچنین آنها در این راستا در زنجیره سرمایشی نیوزلند با تمرکز بر تجهیزات و فرایند هایی با هدف افزایش طول عمر محصولات و بهبود کارایی انرژی در سیستم‌های برودتی آن به مطالعه پرداخته‌اند. همچنین آنها به استاندارد های تبرید و نگهداری مواد مختلف اعم از گوشت قرمز ، لبنیات و گوشت ماکیان که در این کشور مقرر شده است پرداخته‌اند [29]. لافر و همکاران به مدل سازی یک سرد خانه در جنوب تونس پرداختند. آنها به توسعه تئوریک یک سردخانه جهت نگهداری خرما پرداختند. بهبود عملکرد از طریق بهبود عایق موجود در دیواره و یا کنترل شرایط کارکردی صورت گرفت [30]. سالین در سال 2018 گزارشی پیرامون ظرفیت کل سردخانه های جهان در سال 2018 و رشد آن نسبت به سال 2016 ارائه کرده است. کشور هند بیشترین حجم سردخانه را در بین کشورهای بانک اطلاعاتی GCCA به خود اختصاص داده است. ایالات متحده امریکا و چین در مقام دوم و سوم هستند. در این گزارش آمار کشورهای مختلف به صورت مترمکعب بیان شده است [31]. پاردشی و همکاران یک سرد خانه برای مواد فساد پذیر با جزییاتی از قبیل موقعیت، نوع مبرد در آن طراحی کردند. بارهای حرارتی اعم از بار حرارتی کل، بار ناشی از افراد، بار حرارتی ناشی از تجهیزات الکتریکی ر لحاظ کردند. همچنین آنها تاثیرات عوامل مختلف اعم از سرعت انجماد، رطوبت و ... بر کیفیت گوشت قرمز را بیان داشتند [32]. اوانس و همکاران سرد خانه ها را به سه دسته سرد، منجمد و ترکیبی تقسیم بندی کرده‌اند. آنها اثر میزان حجم را در هر سه مدل محاسبه کرده اند [33]. ساکار به طراحی سردخانه‌ی 1000 تنی سیب زمینی با اعمال استاندارد های برودتی و در نظر گرفتن فاکتور های مؤثر در بار های حرارتی پرداخته است [34]. بانتونگ و همکاران به مطالعه طراحی سردخانه برای میوه و سبزیجات پرداخته‌اند . آنها آن دسته از میوه و سبزیجاتی را که می‌توانند در کنار هم نگهداری شوند را گزارش و دمای مناسب نگهداری را مشخص کرده‌اند. همچنین سردخانه های میوه و سبزیجات را در شش طبقه تقسیم بندی کرده‌اند. آنها به مقدار حداقل عایق کاری جهت نگهداری مواد پرداخته‌اند. همچنین بخشی از مطالعات خود را به سیستم‌های برودتی و مبرد های مختلف با دما های نگهداری اختصاص داده‌اند [35]. در سال 2017 گزارشی مبتنی بر توسعه تبرید مواد غذایی با رویکرد توسعه ذخیره انرژی کرایوژنیکی در انبار ها و سرد خانه ها به منظور ادغام انرژی های تجدیدپذیر در تبرید مواد غذایی با هدف پایداری شبکه برق زیر نظر اتحادیه اروپا منتشر گردید [33]. استنکاو و همکاران مطالعاتی پیرامون ترکیب سیستم‌های برودتی صنایع غذایی که بیشترین میزان مصرف انرژی را دارند با تکنولوژی ذخیره سازی انرژی کرایوژنیکی و انرژی تجدید پذیر جهت تبدیل این مصرفکنندگان اصلی برق به یک مرکز انرژی هوشمند انجام دادند [36]. یکی از اصلی ترین و مهم ترین عوامل در مصرف انرژی برق در صنایع غذایی سیستم‌های سرمایشی و تهویه مطبوع و به ویژه تجهیزات برودتی می‌باشند. هاروی و همکاران مروری بر بهترین فناوری ها جهت باز یافت هدر رفت انرژی در صنعت غذا از انتقال حرارت از منبع گرفته تا تکنولوژی های نو در راستای تامین انرژی و برودت در این صنعت انجام داده‌اند. آنها به بررسی منابع تلفات حرارتی در صنایع غذایی و نوشیدنی ها و پتانسیل های موجود در این منابع پرداختند [37]. کامتون و همکاران در صنعت غذا در جهت کاهش میزان مصرف انرژی و میزان مصرف آب در شمال غربی اقیانوس آرام مطالعه کرده‌اند. آنها با توجه به این که سیستم‌های سرمایش و گرمایش بیش‌ترین میزان مصرف انرژی در این صنایع را دارا می‌باشند روش ها و تکنولوژی های نوین را جهت کاهش مصرف آب و انرژی در صنایع غذایی با تمرکز بر ایالت های ایداهو، ارگان و واشنگتن ارائه دادند. همچنین میزان مصرف انرژی به درصد در هر بخش از کارخانجات صنایع غذایی اعم از لبنی، سبزی و میوه ارائه کردند [38]. جونز و همکاران مروری بر مطالعات مربوط به مصرف انرژی، شاخص های انرژی و بهره‌وری انرژی داشته‌اند. آنها عمده موارد مقرون به صرفه ای که منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود را تشریح کردند. همچنین به عنوان مطالعه‌ی

موردی یک کارخانه تولید سوسیس در کشور پرتغال را انتخاب کردند و میزان مصرف انرژی در بخش های مختلف آن را محاسبه کردند. آنها در این مقاله بیان کردند که برای کارخانه مذکور بیش‌ترین سهم مصرف کننده انرژی مربوط به سیستم‌های سرمایشی است که که سهم آن 48.5 ٪ می‌باشد [39]. هموند و همکاران به ممیزی انرژی 38 سردخانه در سراسر اروپا پرداخته اند. کاهش مصرف در تمام موارد قابل دسترس بود ولی میزان آن بسیار متفاوت گزارش شده است و بیان شد که مقدار زیادی وابستگی میان مصرف انرژی و کنترل سیستم های تبرید وجود دارد. آنها مشخصات از قبیل موقعیت سردخانه و نوع ماده مبرد و ... را گزارش کردند [40]. اوانس و همکاران به بررسی تحلیلی میانگین مصرف انرژی در قاره های اروپا، اسیا، امریکا و استرالیا پرداختند. آنها میزان مصرف را با توجه به محدودیت های دمایی محاسبه نمودند. همچنین نتایج به دست آمده را به صورت مدل ریاضی به صورت مصرف انرژی بر حسب کیلووات ساعت در سال به صورت تابعی از حجم فضای مورد نیاز بر حسب متر مکعب ارائه کردند [33]. فوستر و همکاران مدل ریاضی ای را با هدف تخمین میزان مصرف انرژی سردخانه ها ارائه کردند. آنها نتایج تجربی را با مدل ارائه شده مقایسه و نتایج را بیان داشتند. یکی از اهداف مدل آنها بررسی اثر سناریو های مختلف به کار رفته در سردخانه و اثرات محیط زیستی بود [41]. اوانس به محاسبه بار گرمایی سردخانه غذا پرداخته است او تاثیر میزان ضخامت عایق در کاهش مصرف انرژی را بررسی کرده است. همچنین میزان مصرف انرژی در سه مدل مختلف سردخانه را گزارش کرده است [42]. سیستم‌های تولید برودت گستره بسیار وسیعی را شامل می‌شوند و از میان آنها می‌توان به سیستم برودت تراکمی، جذبی، ترموآکوستیک و ترموالکتریک اشاره کرد. تارتیبو به مطالعه مروری پیرامون سیستم‌های برودتی کارآمد از جمله سیستم‌های ترموآکوستیک و پیشینه پژوهش آن پرداختند او همچنین به ارائه راهکار برای بهبود این چرخه ها نیز پرداخته است [43]. گلدیشمن کتابی پیرامون تبرید ترموالکتریکی به چاپ رساننید و مطالب مرتبط با پارامتر های ترموالکتریک و ... را در این کتاب شرح و بسط داده است [44]. وانگ و همکاران به مطالعه مروری بر سیستم‌های برودتی با مبرد ثانویه پرداخته اند. همچنین میزان مصرف انرژی سیکل های مختلف سیستم مبرد ثانویه را مقایسه نمودند. آنها مبرد های مختلف براساس سمی بودن و میزان تخریب محیط زیست دسته بندی کردند [45]. پیرسون در یک مقاله مروری پیرامون تبرید باسیال عامل آمونیک پرداخته است و در آن به مزایای استفاده از این ماد مبرد در صنایع غذایی و تجهیزات تبرید پرداخته است [46]. بلستد و همکاران کاربرد های کربن دی اکسید را به عنوان ماده مبرد در سیستم برودتی سرد خانه ها ارائه کردند [47]. ژانگ و همکاران به بررسی تجربی سیستم تبرید آبشاری ماده مبرد های کربن دی اکسید و پروپیلن(R1270/CO2) پرداختند آنها داده های خود را در قالب جدولی در مقایسه با داده های مطالعات ارائه کردند [48].

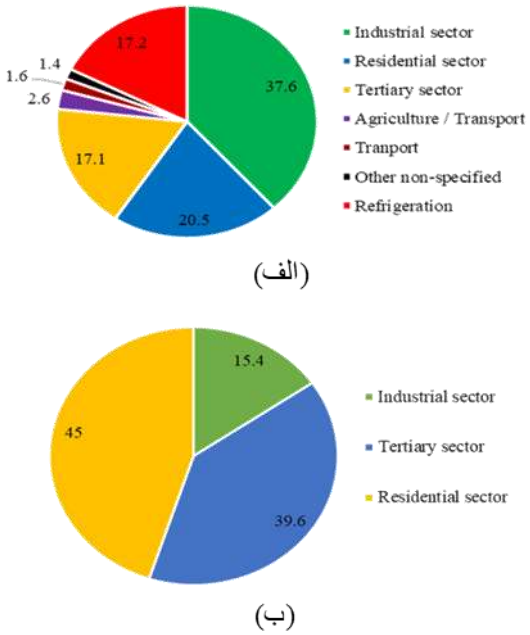
یکی از علت های اصلی مطالعات گسترده در جهت کاهش مصرف انرژی و ایجاد راهکارهایی جهت بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی این مسئله می‌باشد. تجهیزات برودتی به عنوان مثال سیستم‌های مورد استفاده در سرد خانه ها، سوپر مارکت ها فروشگاه های بزرگ در جهت تامین سرما و برودت مورد نیاز مواد غذایی و همچنین سیستم‌های برودتی در تهویه مطبوع مسکونی و صنعتی و حتی بهداشتی یکی از اصلی ترین مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی می‌باشند.

شکل 2 دورنمایی از یک نمونه کشور اروپایی در مسئله تولید انرژی، بیش ترین سهم مصرف و جایگاه برودت و تجهیزات برودتی در مجموعه صنایع را به خوبی نشان می‌دهد. با نگاهی کلی به این نمودار ها متوجه اهمیت سیستم‌های برودتی و لزوم بهبود آنها می‌شویم [49]. همچنین مطالعات آریس و لاندویس نشان می‌دهد که در کشور سوئد مصرف انرژی سیستم برودتی انواع سوپر مارکت ها بین 35 تا 50 درصد از کل مصرف انرژی سیستم‌های برودتی را شامل می‌شود [50]. موسسه بین‌المللی برودت International Institute of Refrigeration (IIR) و آژانس بین‌المللی انرژی، تخمینی از میزان مصرف انرژی سیستم‌های برودتی و دیگر مصرف کنندگان انرژی الکتریکی ارائه داده اند [51،52]. در ایران اطلاعات دقیق و قابل استنادی مبنی بر میزان مصرف انرژی، سهم هر بخش از جمله صنایع مختلف و بخش خانگی و دیگر قسمت ها در مصرف انرژی الکتریکی وجود ندارد. اما بر حسب اطلاعات پراکنده سهم سیستم‌های برودتی اعم از خانگی، صنایع مختلف و سیستم‌های تهویه مطبوع، بسیار قابل توجه بوده و این سیستم‌ها را به عنوان یکی از اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی به حساب می‌آورد.



شکل 2 سهم مصرف کنندگان انرژی در کشور سوئد[49]

شکل 3 توزیع بار برودتی و همچنین مقایسه میزان مصرف انرژی در این حوزه یعنی برودت با دیگر بخش ها را طبق اسناد موسسه بین المللی IIR به نمایش می‌گذارد.



شکل 3 (الف) مقایسه سهم مصرف انرژی سیستم های برودتی و دیگر مصرف کنندگان
(ب) توزیع مصرف انرژی سیستم های برودتی در بخش های مختلف

6- نقش انرژی های تجدیدپذیر در صنعت برودت

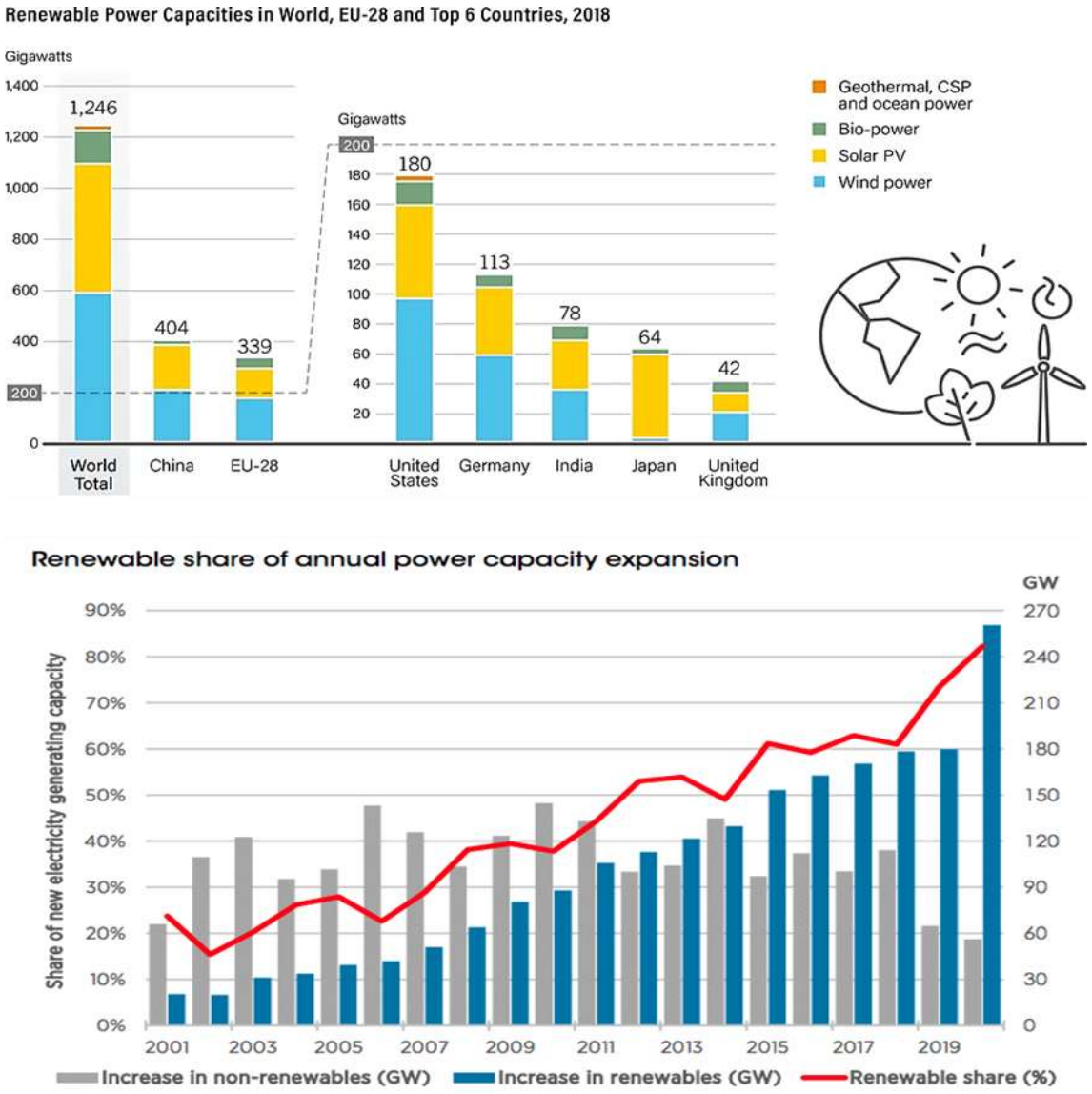
آریدهی و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر انرژی های نو بر روی بهبود عملکرد سیستم‌های تبرید پرداختند. در این پژوهش بازده انرژی و کیفیت سرمایش سیستم‌های تبرید خانگی، تهویه مطبوع و مخازن سرمایش بررسی شد. در نتیجه این پژوهش مشاهده شد عملکرد این نوع سیستم ها در مدیریت انرژی تا ۹۵ درصد در مقایسه با سیستم‌های تبرید سنتی بهبود می‌یابد. در این پژوهش مشاهده شد با کاهش مصرف الکتریسیته بازده انرژی افزایش می‌یابد. همچنین در نتیجه این پژوهش مشاهده می‌شود سیستم‌های خورشیدی دارای بازده اقتصادی بالایی از نظر انرژی و اقتصادی می‌باشند بنابراین انرژی خورشیدی کاربرد مناسبی در سیستم‌های برودتی هیبریدی دارند [53]. منگ و همکاران در پژوهشی به بررسی سیستم‌های هیبریدی جذبی تراکمی ترکیب با انرژی خورشیدی پرداختند. آن ها دریافتند در این نوع سیستم می‌توان به دمای پایین تر از 10- درجه در اواپراتور رسید. همچنین در این سیستم مصرف انرژی 67/1٪ کاهش می‌یابد [54]. کایرونی و نهدی در پژوهشی به مطالعه سیستم‌های تبرید جذبی و تراکمی با استفاده از انرژی زمین گرمایی پرداختند. اثر انرژی زمین گرمایی باعث بهبود ۳۷ تا ۵۴ درصدی COP می‌شود [55]. یکی دیگر از انواع سیستم های تبرید تراکمی سیستم های اجکتوری می‌باشند که به کمک نازل اجکتور راندمان سیستم را بهبود می‌بخشند. در بسیاری از مطالعات این سیستم ها را با سیستم های خورشیدی تلفیق کرده‌اند تا از انرژی خورشیدی نیز بهره برده و سیستم را ارتقا دهند. چسی و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر ترکیب چرخه اجکتور خورشیدی و سیستم‌های تبرید تراکمی و مقایسه آن با سیستم‌های تبرید تراکمی مرسوم پرداختند. در نتیجه این مطالعه مشاهده شد، میزان COP حدود 15 درصد از ۵.۰ به ۵.۷۷ افزایش یافت. ابعاد کلکتور خورشیدی ۱۰۰ متر مربع و محفظه گرمایش آب ۵ متر مکعب و قطر دهانه اجکتور 6.5 میلیمتر بود [56]. سان در پژوهشی به بررسی ترکیب سیستم‌های اجکتوری با انرژی خورشیدی و سیستم تبرید تراکمی بخار پرداخت. ترکیب این دو سیستم باعث می‌شود هم از مزایای هر دو سیستم برخوردار شویم و هم معایب هر سیستم جداگانه از بین برود. این پژوهش نشان داد که عملکرد سیستم به طور بالقوه افزایش می‌یابد. ترکیب این دو سیستم باعث بهبود ۵۰ درصدی بازدهی انرژی می‌شود. این نوع سیستم دوستدار محیط زیست می‌باشد و به لایه اوزون آسیبی وارد نمی‌کند. از آب در چرخه انژکتور و از مبرد R134-a در چرخه تراکمی استفاده شده است. ترکیب این دو سیستم باعث افزایش ذخیره انرژی و باعث کاهش ۵۰ درصدی گازهای گلخانه ای می‌شود [57]. سوراج و گنجیر در پژوهشی اثر انرژی زمین گرمایی بر روی سیستم‌های تبرید جذبی تبخیری بررسی کردند. از بین تمام منابع انرژی تجدید پذیر، انرژی زمین گرمایی دارای بالاترین مقدار ظرفیت انرژی، قابل اطمینان ترین، دارای کمترین میزان آلودگی و بهترین منبع انرژی در سیستم-های تبرید می‌باشد. همچنین آنها دریافتند این سیستم می‌تواند در فشار کم اواپراتور کار کند بدون اینکه روی سیستم تاثیر بگذارد. همچنین این سیستم هیچ تأثیری در کاهش بار سرمایش سیستم ندارد [58]. العلی پژوهشی در زمینه ترکیب انرژی خورشیدی و سیستم تبرید تراکمی انجام داد. در نتیجه این پژوهش، مشاهده شد ۲۴/۵ ٪در هزینه صرفه جویی می‌شود [59].

برآورد مطالعات از گذشته تا امروز لزوم تامین مصرف انرژی را برای این صنعت یعنی برودت الزامی نشان می‌دهد. از طرف دیگر حفظ محیط زیست و کاهش آلایندگی امری حیاتی برای بشر احتساب می‌شود در نتیجه باید بخشی از این انرژی را از طریق انرژی های پاک و تجدید پذیر تامین کنیم. شکل 4 صورت هایی از انرژی های تجدید پذیر را نشان می‌دهد.

شکل 4 انواع انرژی های تجدید پذیر

نزدیک مواجه نگردد. شکل 5 ظرفیت انواع انرژی های تجدید پذیر در جهان را نمایش داده و توسعه این سیستم‌ها را در گذر زمان نشان می‌دهد. همان طور

7- جمع بندی



شکل 5 انرژی های تجدید پذیر ظرفیت ها و رشد و تو سعه آن در سال های اخیر

در این مطالعه به پیشینه تبرید الزامات و توسعه این صنعت اشاره گردید. همچنین بیان شد که با توجه به توسعه روزبه روز این سیستم ها تامین انرژی آنها با توجه به این که یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان انرژی هستند باید جدی گرفته شود. از طرف دیگر با توجه به این که مصرف انرژی مسئله ای بسیار اساسی در کشور ها به ویژه کشور های در حال توسعه مانند ایران است لزوم تامین انرژی از طریق انرژی های تجدید پذیر پاک علاوه بر کاهش آلودگی های ناشی از سوخت های فسیلی، کشور را از بحران کمبود برق گذر خواهد داد. در نتیجه لازم است تا مطالعات کاربردی در جهت احداث و توسعه این سیستم ها هر چه سریع تر انجام پذیرد تا کشور با بحران منابع انرژی در آینده که از شکل مشخص است رشد و توسعه این سیستم‌ها با سرعت بالایی در حال افزایش است که می‌تواند بخش قابل توجهی از انرژی مصرفی مورد نیاز را تامین کند.

8- مراجع

[1] J. L. M, The Technical Arts and Sciences of the Ancients, *Nature*, 1930, doi: 10.1038/126949b0.

[2] P. Dhankhar, A Study on Refrigeration, *International Journal of Science and Research. ISSN*, vol. 3, no. 5, pp. 1212–1220, 2014.

[3] R. Thevenot, J. C. Fidler, and I. I. of Refrigeration, *A history of refrigeration throughout the world*. Paris : International Institute of Refrigeration, 1979.

in the south of Tunisia: A detailed energy and thermodynamic analysis, *Journal of Cleaner Production.*, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.219.
[31] V. Salin, 2018 Global Cold Storage Capacity Report, Texas A&M University, 2018.
[32] A. D. Watpade and S. V Pardeshi, Design of Merchandise Cold Storage Facility for Meat Products to Promote Make in India Initiative, *Imperial journal of interdisciplinary research.*, no. 4, 2017.
[33] P. G. Sustainability, Developing Cryogenic Energy Storage at Refrigerated Warehouses as an Interactive Hub to Integrate Renewable Energy in Industrial Food Refrigeration and to Enhance Power Grid Sustainability, 2017.
[34] P. Sakare, Design of Cold Storage Structure For Thousand Tonne Potatoes, *International Journal of Agriculture and Food Science Technology.*, 2014.
[35] M. A. Rahman *et al.*, Design of cold storage for fruits and vegetables, *Res. Gate*, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.14335.82082.
[36] K. Fikiin *et al.*, Refrigerated warehouses as intelligent hubs to integrate renewable energy in industrial food refrigeration and to enhance power grid sustainability *Trends in Food Science & Technology.*, 2017, doi: 10.1016/j.tifs.2016.11.011.
[37] R. Law, A. Harvey, and D. Reay, Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry, *Applied Thermal Engineering.*, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.024.
[38] M. Compton, S. Willis, B. Rezaie, and K. Humes, Food processing industry energy and water consumption in the Pacific northwest, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018, doi: 10.1016/j.ifset.2018.04.001.
[39] J. Nunes, P. D. Silva, L. P. Andrade, and P. D. Gaspar, Key points on the energy sustainable development of the food industry – Case study of the Portuguese sausages industry, *Renewable & Sustainable Energy Reviews.*, vol. 57, pp. 393–411, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.019.
[40] J. A. Evans *et al.*, Assessment of methods to reduce the energy consumption of food cold stores, *Applied Thermal Engineering.*, vol. 62,no.2,pp.697–705,Jan.2014,doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.10.023.
[41] J. A. Evans *et al.*, Methods to assess energy usage in food cold stores, in *Refrigeration Science and Technology*, 2014.
[42] J. Evans, Cold storage of food: Review of available information on energy consumption and energy savings options, *Univ. Bristol, UK*, vol. 44, no. 0, pp. 1–25, 2007.
[43] L. K. Tartibu, Developing more efficient travelling-wave thermo-acoustic refrigerators: A review, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 31, pp. 102–114, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.seta.2018.12.004.
[44] H. J. Goldsmid, *Thermoelectric Refrigeration*. 1964.
[45] K. Wang, M. Eisele, Y. Hwang, and R. Radermacher, Review of secondary loop refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration*. 2010, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.09.018.
[46] A. Pearson, Refrigeration with ammonia, *International Journal of Refrigeration*. 2008, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.11.011.
[47] M. DR Michael Bellstedt, Ph.D.Eng, MIEAust, MAIRAH, D. F. E. P. D. E. M. A. M. I. S. S., and M. Jensen, B. Sc. Eng. MIE Aust, Application of CO2 (R744) Refrigerant in Industrial Cold Storage Refrigeration Plant, vol. 2, pp. 1–13.
[48] Y. Zhang, Y. He, Y. Wang, X. Wu, M. Jia, and Y. Gong, Experimental Investigation of the Performance of an R1270/CO2 Cascade Refrigerant System, *International Journal of Refrigeration.*, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.02.017.
[49] J. Arias, Energy Usage in Supermarkets: Modelling and Field Measurements, KTH University, 2005.
[50] J. Arias and P. Lundqvist, Field Experiences in three supermarkets in Sweden, in *Workshop Annex*, 2000, vol. 26.
[51] D. Coulomb, J. L. Dupon, and A. Pichard, 29th informatory note on refrigeration technologies. The role of refrigeration in the global economy, *Note e Note IIR Inf.*, 2015.
[52] IEA, Electricity/Heat in World in 2009. Retrieved March 19, 2015 from http://www.iea.org/ statistics/topics/Electricity/.
[4] I. T. Kharagpur, *40 Lessons on Refrigeration and Air Conditioning*. 2008.
[5] J. C. Goosman, History of refrigeration, *Ice Refrig.*, vol. 67, p. 111, 1924.
[6] O. Evans, *The Abortion of the Young Steam Engineer's Guide: Containing an Investigation of the Principles, Construction and Powers of Steam Engines.... Illustrated with Five Engravings*. Philadelphia: Fry and KAMMERER, 1805.
[7] J. T. Critchell, J. Raymond, and others, History of the frozen meat trade, 1912.
[8] DOI, Report of the Commissioner of Patents for the Year 1951, 1952.
[9] H. B. Roelker, The Allen dense air refrigerating machine, *Trans. Am. Soc. Refrig. Eng. Pap.*, no. 21, pp. 52–63, 1906.
[10] W. R. Woolrich, Mechanical Refrigeration-Its American Birthright, *Refrig. Eng.*, vol. 53, pp. 196–199, 1947.
[11] M. W. Travers, Liquefaction of Gases, *Encycl. Br. Chicago*, vol. 14, pp. 172–173, 1946.
[12] J. H. AWBERY, CARL VON LINDE A Pioneer of 'Deep' Refrigeration, *Nature*, vol. 149, no. 3788, pp. 630–631, Jun. 1942, doi: 10.1038/149630a0.
[13] I. Dincer, *Heat transfer in food cooling applications*. Washington, DC: Taylor & Francis, 1997.
[14] I. Dincer, *Refrigeration Systems and Applications*, Third. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
[15] D. R. Heldman and C. I. Moraru, *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering*. Crc Press, 2010.
[16] W. F. W, Refrigerating Apparatus., U.S. Patent, US1126605A, 1915.
[17] J. M. Calm, Refrigerant safety, *ASHRAE Journal*, vol. 36, no. 7, pp. 17–27, 1994.
[18] W. L. Holladay, The General Electric monitor top refrigerator, *ASHRAE Journal-American Soc. Heat. Refrig. Airconditioning Eng.*, vol. 36, no. 9, pp. 49–55, 1994.
[19] J. Rees, *Refrigeration nation: A history of ice, appliances, and enterprise in America*. 2014.
[20] P. Srikhirin, S. Aphornratana, and S. Chungpaibulpatana, A review of absorption refrigeration technologies,*Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, vol. 5, pp. 343–372, 2001, doi: 10.1016/S1364-0321(01)00003-X.
[21] J. S. Talpada and P. V. Ramana, A review on performance improvement of an absorption refrigeration system by modification of basic cycle, *International Journal of Ambient Energy*. 2019, doi: 10.1080/01430750.2017.1423379.
[22] S. B. Riffat and X. Ma, Thermoelectrics: A review of present and potential applications, *Applied Thermal Engineering*. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7.
[23] A. J. Gigiel, Air cycle refrigeration, in *Fuel and Energy Abstracts*, 1996, vol. 4, no. 37, p. 293.
[24] R. Gimaev, Y. Spichkin, B. Kovalev, K. Kamilov, V. Zverev, and A. Tishin, Review on magnetic refrigeration devices based on HTSC materials, *International Journal of Refrigeration*. 2019, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.01.024.
[25] J. V. Robert Kraemer, Andrew Plouff, *Design of a Small-Scale , Low-Cost Cold Storage System*. 2013, p. 94.
[26] M. J. Evans, Improving Cold storage Equipment in Europe ICE-E, 2012.
[27] A. P. and S. W. Claire Heaney, Rick Swinard, Natural Refrigerants: Hydrocarbons, 2007.
[28] X. Wu, S. Hu, and S. Mo, Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems, *Journal of Cleaner Production.*,2013,doi: 10.1016/j.*jclepro*.2013.04.045.
[29] J. K. Carson and A. R. East, The cold chain in New Zealand – A review, *International Journal of Refrigeration.*, 2018, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.09.019.
[30] A. Hmida, N. Chekir, A. Laafer, M. E. A. Slimani, and A. Ben Brahim, Modeling of cold room driven by an absorption refrigerator

[53] Aridhi, E., Abbes, M. and Mami, A., 2016. Solutions based on renewable energy and technology to improve the performance of refrigeration systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(6), p.065906
[54] Meng, X., Zheng, D., Wang, J. and Li, X., 2013. Energy saving mechanism analysis of the absorption–compression hybrid refrigeration cycle. *Renewable Energy*, 57, pp.43-50
[55] Kairouani, L. and Nehdi, E., 2006. Cooling performance and energy saving of a compression–absorption refrigeration system assisted by geothermal energy. *Applied thermal engineering*, 26(2-3), pp.288-294
[56] Chesi, A., Ferrara, G., Ferrari, L. and Tarani, F., 2013. Analysis of a solar assisted vapour compression cooling system. *Renewable energy*, 49, pp.48-52
[57] Sun, D.W., 1997. Solar powered combined ejector-vapour compression cycle for air conditioning and refrigeration. *Energy Conversion and Management*, 38(5), pp.479-491
[58] Sursuje S, Gandgil C. Geothermal Vapour Absorption Refrigeration System.*International Journalof Scientific* and Engineering Research2013;4:162–5.
[59] Al-Alili, A., Hwang, Y., Radermacher, R. and Kubo, I., 2010. Optimization of a solar powered absorption cycle under Abu Dhabi's weather conditions. *Solar Energy*, 84(12), pp.2034-2040