مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1397، دوره 18، شماره 03، ص‌ص 323-331

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی اثر ارتعاشات مکانیکی بر نرخ تشکیل یخ در فرایند انجماد آب در سامانه ذخیره‌ساز یخ روی کویل

محمد حسن اوجاری[1]،حمید جان نثاری[2*]، عباس روحانی بسطامی[2]، پویان هاشمی طاری[2]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران صندوق پستی 167651719، h_jannesari@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 دی 1396

پذیرش: 28 بهمن 1396

ارائه در سایت: 11 اسفند 1396

کلید واژگان:

انجماد آب

ارتعاشات مکانیکی

سیستم ذخیره‌ساز یخ

چکیده

راه‌کارهای مختلفی برای حل مشکل همزمانی پیک بار برودتی و ساعات اوج مصرف انرژی الکتریکی ارائه گردیده است. یکی از این راه‌کارها ذخیره‌سازی بار سرمایشی به‌صورت یخ در زمان کم باری می‌باشد. از انواع پرکاربرد سامانه‌های ذخیره‌سازی، می‌توان به سیستم ذخیره‌ساز یخ روی کویل اشاره کرد. اما نرخ انتقال حرارت پایین در این سامانه به‌عنوان یک چالش مطرح می‌باشد. با توجه به ضریب انتقال حرارت پایین یخ، با شروع شکل‌گیری یخ از انتقال حرارت بین مبرد درون کویل و مخزن کاسته می‌شود. لذا یک ایده در مورد افزایش نرخ انتقال حرارت این است که شروع انجماد مدتی به تاخیر انداخته شود تا همچنان سازوکارهای انتقال حرارت جابجایی طبیعی در مجاورت کویل حفظ شود. در پژوهش پیش رو به‌منظور بررسی این ایده از ارتعاشات مکانیکی برای به تاخیر انداختن شروع انجماد در سامانه ذخیره‌ساز یخ روی کویل، بهره گرفته شده است. با انجام آزمایش‌هایی اثر فاصله عرضی و طولی قرارگیری ویبراتور بر مقدار تولید یخ، در داخل مخزن ذخیره‌ساز سرما بررسی شد. نتایج نشان داد قرار دادن ویبراتور در وسط کویل نسبت به دو سر آن، منجر به افزایش بیشتری در مقدار یخ تشکیل شده می‌گردد. مشخص شد اعمال ارتعاشات مکانیکی باعث به تاخیر افتادن انجماد و دمای زیر سرد پایین‌تر می‌شود. همچنین نشان داده شد میزان یخ تشکیل شده تابعی از دمای زیرسرد و زمان تاخیر انجماد می‌باشد. در انتها، مقدار مصرف انرژی ویبراتور و کاهش مصرف انرژی در زمان بیش‌باری محاسبه گردید.

Experimental study of the effect of mechanical vibration on the water solidification rate in ice-on-coil energy storage system

Mohammad hasan Ojari, Hamid Jannesari*, Abbas Rohani Bastami, Poyan hashemi

Department of Energy and Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 167651719, Tehran, Iran, h_jannesari@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 December 2017
Accepted 17 February 2018
Available Online 02 March 2018

Keywords:
Water Freezing
Mechanical Vibration
Ice On Coil Storage System

ABSTRACT

Various solutions have been suggested to overcome the issue when cooling peak hours and electric energy consumption coincide. One of the solutions is to store the cooling load at off-peak hours. One of the most conventional types of storage systems is the ice-on-coil storage system. The low heat transfer rate in this system is one of the challenges. Since the conduction heat transfer coefficient of ice is low, by starting the ice formation, the heat transfer between the refrigerant inside the coil and the reservoir's water will reduce. One idea to increase the heat transfer rate is to postpone the starting time of the freezing process to keep active the natural convection mechanism. In the present study, mechanical vibration has been used to linger freezing initiation in ice-on-coil energy storage system. The effect of longitudinal and lateral positioning of the probe, on the amount of temperature and initiation time of freezing as well as the amount and structure of formed ice has been investigated. The results revealed that placing the vibrator at the middle of coil over its two ends leads to further increase in the amount of formed ice. It is found that applying mechanical vibration can postpone the initiation time of the freezing process and decrease the subcooling temperature. Moreover, it is shown that the amount of ice formation is a function of subcooling temperature and initiation time of freezing. Finally, the energy consumption of the vibrator and the energy consumption reduction in peak-hour are calculated.

1- مقدمه

نیاز به انواع انرژی بویژه انرژی الکتریکی، هر روز در حال افزایش است و ادامه حیات جوامع صنعتی بدون وجود نیروی الکتریسیته به امری غیرممکن بدل گشته است. اما از یک سو به دلیل محدودیت منابع و ملاحظات زیست محیطی، احداث نیروگاه‌های جدید تولید برق با چالش‌های جدی مواجه است و از سوی دیگر به‌دلیل هزینه‌های بالا عملا امکان ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در مقیاس‌های بزرگ فراهم نمی‌باشد. این چالش‌ها دانشمندان و متخصصان را برآن داشته است تا با ارائه راه‌کارهای مختلف نسبت به حل این مشکل اقدام کنند. یکی از این راهکارها ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به‌صورت برودتی می‌باشد. نحوه کار این سامانه‌ها به نحوی است که در ساعاتی غیر از

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. h. Ojari, H. Jannesari, A. Rohani Bastami, P. hashemi, Experimental study of the effect of mechanical vibration on the water solidification rate in ice-on-coil energy storage system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 323-331, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]

پیک بار مصرفی شبکه، بار سرمایی موردنیاز را به‌صورت یخ یا آب سرد در مخازن بزرگی ذخیره کرده و در ساعات اوج بار، سرمای موردنیازِ ساختمان را تامین می‌کنند [1].

یکی از روش‌های ذخیره‌سازی یخ که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد ذخیره‌سازی یخ روی کویل است. استفاده از این روش با مشکلاتی همراه است. از جمله این مشکلات، نرخ انتقال حرارت پایین در این سامانه در مقایسه با سردکن‌های معمولی می‌باشد. یخ دارای ضریب هدایت حرارتی 2.2 W/mK بوده و در مقایسه با بسیاری از مواد دیگر از جمله فلزاتی مانند مس و آلومینوم که در ساخت کویل‌ها به کار می‌روند، یک عایق محسوب می‌شود. لذا بعد از تشکیل، مانند یک مقاومت حرارتی بر روی سطح کویل‌ها عمل کرده و مانع از انتقال حرارت موثر بین مبرد جریان یافته در داخل کویلا و آب در حال انجماد مخزن می‌شود.

تاکنون روش‌های مختلفی به‌منظور افزایش انتقال حرارت در مخازن ذخیره‌ساز سرما به کار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از سطوح گسترش یافته می‌باشد. در این زمینه، می‌توان به نتایج تحقیقات جان نثاری و همکاران [2] اشاره کرد که منجر به ارائه یک روش نوین جهت بهبود تولید یخ با استفاده از نصب رینگ نازک و فین بر روی سطح کویل‌ها گردید. در این پژوهش، آرایش و ضخامت رینگ و پره‌هایی با جنس و هندسه‌های مختلف به کمک شبیه‌سازی و آزمایش، بهینه‌سازی شد. آن‌ها نشان دادند میزان یخ تولیدی در مخزن در حالت رینگ نسبت به پره بیشتر است.

با توجه به این‌که قبل از شروع انجماد و تشکیل یخ بر روی سطح کویل، مکانیزم جابه‌جایی طبیعی فعال می‌باشد، به نظر می‌رسد چنان‌چه بتوان با روشی شروع انجماد را بدون تضعیف انتقال حرارت به‌صورت کنترل شده به تاخیر انداخت، در نهایت میزان حرارت منتقل شده و یخ تشکیل شده در مخزن افزایش یابد. این ایده در کار حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته است. یکی از روش‌های به تاخیر انداختن شروع انجماد، ایجاد ارتعاشات مکانیکی در داخل سیال و یا در سطوح انتقال حرارت می‌باشد.

در زمینه ایجاد ارتعاشات فراصوت در ذرات آب حین انجماد، تاکنون تحقیقاتی به‌صورت تجربی انجام گرفته است. نتایج، حاکی از تغییر ساختار کریستالی یخ منجمد شده و همچنین تغییر در زمان شروع انجماد می‌باشد. دلوی اصفهان و همکاران [3] نشان دادند اعمال امواج فراصوتی بر روی یک نمونه آب در حال انجماد، باعث کوتاه‌تر شدن زمان شروع انجماد و همچنین افزایش تعداد هسته‌های یخ تشکیل شده می‌گردد. نتایج پژوهش حسینیان و همکاران [4]، حاکی از بهبود قابل توجه انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی است که بدنه پایینی و بالایی آن مرتعش شده باشد. آن‌ها نشان دادند چنانچه در یک فرکانس ثابت، دامنه ارتعاشات افزایش داده شود انتقال حرارت به‌صورت موثری بهبود می‌یابد. بررسی اثر پدیده رزونانس بر انتقال حرارت هم توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است [6,5]. مشخص شده است وقتی فرکانس ارتعاشات مجموعه سطوح انتقال حرارت و سیالی که درون آن قرار دارد به فرکانس رزونانس نزدیک می‌شود نرخ انتقال حرارت به مقدار بهینه رسیده و با دور شدن از فرکانس رزونانس، مقدار انتقال حرارت دوباره کاهش می‌یابد.

اثر اعمال ارتعاشات مکانیکی بر افزایش انتقال حرارت در یک لوله حاوی نانوسیال و آب خالص در پژوهش ژانگ و همکاران [7] مورد توجه قرار گرفت. در حالتی که درون لوله، آب خالص جریان داشت، اعمال ارتعاشات مکانیکی به لوله که انتقال حرارت از آن صورت می‌گیرد، می‌تواند باعث افزایش انتقال حرارت در لوله گردد. در پژوهش آن‌ها فرکانس در محدوده بین 1.8 و 2.2 هرتز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از وجود یک رابطه خطی بین افزایش فرکانس و افزایش انتقال حرارت داشت. مشخص شد افزایش در عدد رینولدز، در جریان نانوسیال درون لوله، باعث کاهش اثر اعمال ارتعاشات مکانیکی بر افزایش انتقال حرارت می‌گردد. آیراپتیان و همکاران [8] اثر اعمال ارتعاشات مکانیکی و امواج الکترومغناطیسی بر برخی خواص ترموشیمیایی آب را بررسی کردند. مشخص شد اعمال ارتعاشات مکانیکی یا امواج الکترومغناطیسی پیش از انجماد آب خالص، می‌تواند باعث تغییر در نمودار دما-زمان آب منجمد شده، بعد از قرار دادن آن در دمای اتاق شود. آن‌ها دلیل این اثر را تغییر در بعضی خواص ترموشیمیایی ذرات آب، ناشی از اعمال ارتعاشات مکانیکی اعلام کردند و نتیجه گرفتند اعمال ارتعاشات یا امواج مغناطیسی می‌تواند موجب تغییر دائمی در خواص آب گردد. از موارد این تغییرات می توان به شکسته شدن محدود پیوندهای هیدروژنی آب اشاره نمود.

اعمال ارتعاشات به سطوح انتقال حرارت ممکن است به تخریب ساختمان مبدل حرارتی منجر شود. ایجاد ارتعاش در سیال به جای ارتعاش سطوح انتقال حرارت می‌تواند در این زمینه راهگشا باشد. استفاده از این روش به خصوص وقتی اعداد رینولدز جریان پایین است یا سیال در حالت سکون قرار دارد بسیار مفید می‌باشد [9]. تحقیقات انجام شده در این زمینه بسیار محدود می‌باشد. آستوکو و همکاران [10] به شبیه‌سازی ارتعاش یک صفحه فلزی که زیر حجم مشخصی از آب قرار گرفته بود پرداختند. مشخص شد با وجود تاخیر نسبی در شروع انجماد آب بر روی صفحه فلزی، نرخ رشد کریستال‌های یخ در حالتی که صفحه فلزی مرتعش می‌شود بیشتر است. نتیجه مهمی که از پژوهش آن‌ها به‌دست آمد، این بود که چنانچه نسبت دامنه ارتعاش ذرات آب به ارتعاش صفحه، از حدی معین فراتر رود وقوع انجماد در زمان مورد بررسی آن‌ها رخ نخواهد داد.

در پژوهش پیش رو اثر به تاخیر انداختن شروع انجماد توسط ایجاد ارتعاشات مکانیکی در داخل مخزن ذخیره‌ساز یخ روی کویل به صورت تجربی بررسی شده است. هدف از به تاخیر انداختن شروع انجماد، فعال نگه داشتن مکانیزم جابه‌جایی طبیعی بین کویل و آب درون مخزن به منظور بهبود انتقال حرارت می‌باشد. به منظور ایجاد ارتعاشات در داخل آب مخزن از یک سیستم صوتی استفاده شده که ارتعاشات دیافراگم آن به کمک یک پراب به آب درون مخزن منتقل می‌گردد. در این پژوهش سعی شده پارامترهای مختلف ارتعاشی که می‌توانند بر میزان یخ تشکیل شده اثرگذار باشند بررسی گردد. لازم به ذکر است تاکنون تحقیق تجربی بر روی اعمال مستقیم ارتعاشات مکانیکی به آب در یک سیستم انجمادی صورت نگرفته است. هدف کلی از انجام این پژوهش بهبود تشکیل یخ در سیستم ذخیره‌ساز یخ روی کویل می‌باشد. همچنین با توجه به قابلیت انطباق بالای روش به کار گرفته شده در این تحقیق، می‌توان از آن جهت بهبود تولید یخ در انواع مخازنی استفاده کرد که در آن‌ها یخ تولید می‌گردد.

2- تئوری انجماد

انجماد آب در چندین مرحله انجام می‌شود. این مراحل در نمودار فازی تغییرات دما برحسب زمان در "شکل 1" نمایش داده شده‌اند. T_f در این نمودار بیانگر دمای ذوب (انجماد) فاز جامد آب می‌باشد. اولین رویداد، زیر سرد شدن نام دارد. در این مرحله آب مایع تا دمایی پایین‌تر از نقطه انجماد، در فاز جامد سرد می‌شود. این مرحله (A-B) ناپایدار و غیرِتعادلی است و در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]

حین آن به اندازه‌ای که برای شروع فرایند کریستال‌زایی لازم است از آب انرژی گرفته می‌شود. در این مرحله مولکول‌های آب در ساختارهای شش وجهی موسوم به هسته گرد هم می‌آیند. وقتی تعداد این هسته‌ها در واحد حجم به تعداد بحرانی می‌رسد، سیستم وارد مرحله کریستال‌زایی شده (B-C) و گرمای نهان خود را بسیار سریع‌تر از آن‌چه در مرحله قبل از آب جذب کرده بود آزاد می‌کند. این موضوع با افزایش ناگهانی دما همراه است. برای آب خالص در این مرحله دما تا دمای نقطه ذوب یخ بالا می‌رود. انجماد سریع، باعث تولید تعداد زیادی ساختار کریستالی بسیار کوچک می‌گردد. پس از طی این مرحله، مخلوط نیمه یخ زده تا زمانی که تمام آب منجمد شود، سردتر نمی‌شود. بنابراین در فاصله نقاط C تا D، دما در نمودار تقریبا مقدار ثابتی باقی مانده و سردتر نمی‌شود. پس از پایان انجماد، دما مجددا افت می‌کند و به دمای[1] محیط سردی می‌رسد که گرما توسط آن از آب جذب می شود [11]. به دمای نقطه B، دمای زیرسرد می‌گویند. همچنین برای آب خالص دمای نقطه C برابر با دمای ذوب فاز جامد آب می‌باشد.

در فرآیند انجماد، مرز فاز جامد و مایع "فصل مشترک[2]" نامیده می‌شود. در اغلب مواد خالص که تحت شرایط عادی و در دمای T_f منجمد می‌شوند این فصل مشترک در شروع انجماد به‌صورت مسطح و با ضخامت کم ظاهر می‌گردد. اما در شرایطی که شاهد پدیده زیر سرد می‌باشیم، ممکن است ضخامت آن متفاوت بوده و این ناحیه دارای ساختارهای میکروسکوپی ستونی و یا دندریتی و بی‌نظم باشد. حتی در حالت تشکیل یخ یکنواخت، ابتدا این ساختار شکل می‌گیرد اما ضخامت آن در این حالت در ابعاد میکروسکوپی است. نایت و همکارانش [12] گزارش کردند که در حالتی که آب زیر سرد باشد یخ در حال رشد از ساختارهای دندریتی شکل گرفته و این ساختارها به‌صورت صفحات کم ضخامت در آب ظاهر می‌شوند.

گیلیپن [13] اثر نرخ سرمایش بر روی تشکیل یخ دندریتی را در لوله‌ای بررسی کرد که آب درون آن در حالت سکون قرار داشت. وی متوجه شد بعد از این‌که دمای آب خالص در مرحله کریستال‌زایی به دمای نقطه ذوب (صفر درجه سانتی‌گراد) افزایش پیدا می‌کند، تشکیل یخ دندریتی کاملا متوقف شده و یخ لایه‌ای بر روی سطح داخلی لوله شروع به رشد و گسترش می‌کند. او مشاهده کرد مدت زمان لازم برای تکمیل فرایند تشکیل یخ دندریتی در سطح داخلی لوله تنها در حدود 30 ثانیه می‌باشد. طبق بررسی‌های گیلیپن مدت زمان انسداد مقطع داخلی لوله در اثر رشد یخ دندریتی در مقایسه با رشد یخ یکنواخت شعاعی تنها ٪5 می‌باشد. همچنین مشخص شد احتمال تشکیل یخ دندریتی تابعی از ساکن بودن آب درون لوله است.

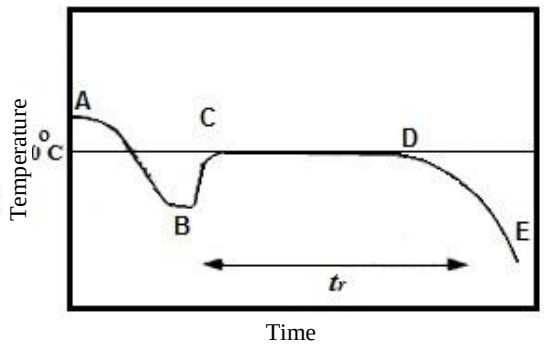


Fig. 1 phase diagram of water freezing steps [11]

شکل 1 نمودار فازی مراحل انجماد آب [11]

[1] Ambient temperature
[2] interface

3- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

3-1- تجهیزات آزمایشگاهی

سامانه مورد استفاده در کار حاضر، شامل یک چرخه اولیه و یک چرخه ثانویه است (شکل 2). چرخه اولیه سرمایش لازم را تامین کرده و شامل یک کمپرسور تراکمی می‌باشد که با گاز R-12 کار می‌کند. خنک‌کاری کندانسور این دستگاه توسط آب شهر به‌صورت سیکل باز انجام می‌گیرد. تنظیم و اندازه‌گیری دبی آب خنک‌کننده کندانسور به کمک شیر و روتامتر فراهم می‌شود. با عبور سیال انتقال حرارت (آب و اتیلن‌گلیکول) از مجاورت اواپراتور این سیکل، دمای آن می‌تواند تا ºC 14- سرد شود.

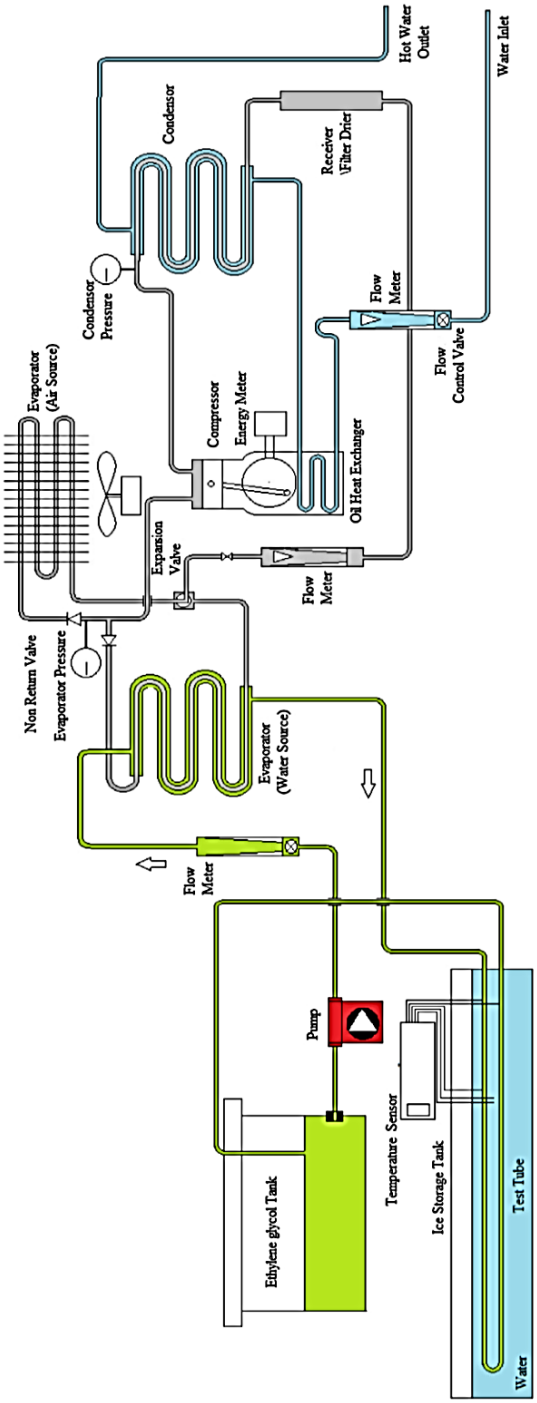


Fig. 2 Ice storage system and cooling machine (compression chiller)

شکل 2 سامانه ذخیره‌ساز یخ ودستگاه سردکن (چیلر تراکمی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]

چرخه ثانویه شامل مخزن ذخیره‌ساز یخ، پمپ و لوله‌کشی‌های رابط می‌باشد. ابعاد مخزن ذخیره‌ساز 24×16×71cm بوده و به‌منظور سرمایش آب درون آن، از کویل‌های رفت و برگشتی مسی که با یک زانویی U شکل به هم متصل شده‌اند استفاده می‌شود. طول مجموع کویل‌ها 1.2 m متر و قطر آن‌ها 2 cm می‌باشد. درون کویل‌ها محلول آب و ضد یخ با نسبت ترکیبِ 60 درصد آب و 40 درصد ضدیخ گردش می‌کند و گرما را از آب درون مخزن می‌گیرد. برای تامین سیال انتقال حرارت کافی، از یک مخزن پشتیبان آب و ضدیخ با حجم 10 لیتر استفاده می‌شود. یک پمپ سانتریفیوژ 50 واتی سیال را از درون مخزن کمکی به داخل اواپراتور دستگاه سردکن هدایت کرده و بعد از سرمایش، آن را در داخل کویل‌های مخزن ذخیره‌ساز سرما به جریان می‌اندازد. سیال در خروجی مخزن ذخیره‌ساز سرما مجددا به مخزن پشتیبان بازگشته و این سیکل به‌طور مداوم تکرار می‌گردد. امکان اندازه‌گیری دبی مبرد به کمک بشر مدرج فراهم می‌باشد. به‌منظور کاهش اتلافات حرارتی بین مخزن و محیط اطراف، سطح بیرونی مخزن با صفحات یونولیتی به ضخامت 5 سانتی‌متر عایق شده است.

به‌منظور سنجش درجه حرارت سیال انتقال حرارت در ورودی/خروجی مخزن ذخیره‌ساز سرما از دو سنسور دمایی استفاده شده است. همچنین یک سنسور دمایی، درجه حرارت آب را در مجاورت کویل بالایی در داخل مخزن ذخیره‌ساز یخ، اندازه‌گیری می‌کند. سنسور دیگری نیز دمای آب در فاصله‌ای دور از کویل‌های مخزن را می‌سنجد. این سنسورها به یک دیتالاگر مدل TES-1384 متصل شده‌اند که دمای گزارش شده توسط آن‌ها را با فاصله زمانی یک دقیقه ذخیره می‌کند، موقعیت سنسورها در "شکل 3" نمایش داده شده است.

برای تولید ارتعاشات درون آب از یک بلندگوی 4 اهمی متصل به یک آمپلی‌فایر استفاده شده است. یک میله فلزی بر روی دیافراگم بلندگو نصب شده که با ارتعاش دیافراگم، میله هم مرتعش می‌گردد. سر دیگر میله، دارای کلاهک فلزی است و ارتعاشات توسط این کلاهک به آب منتقل گردد. فرکانس و توان اعمالی ارتعاشات توسط رایانه متصل به آمپلی‌فایر کنترل می‌گردد. همچنین برای تنظیم توان بلندگو، اختلاف پتانسیل و جریان عبوری از دو قطب بلندگو در هر حالت از آزمایش اندازه‌گیری شده است. در "شکل 4" سیستم یکپارچه ارتعاشات نمایش داده شده است.

3-2- روش انجام آزمایش

به‌منظور ایجاد شرایط ابتدایی یکسان، ارتفاع و دمای آب مخزن ذخیره‌ساز یخ در شروع تمام آزمایش‌ها به ترتیب 17cm و 22 ºC تنظیم شد. محلول سیال انتقال حرارت شامل 40 درصد ضدیخ و 60 درصد آب می‌باشد. همچنین دبی

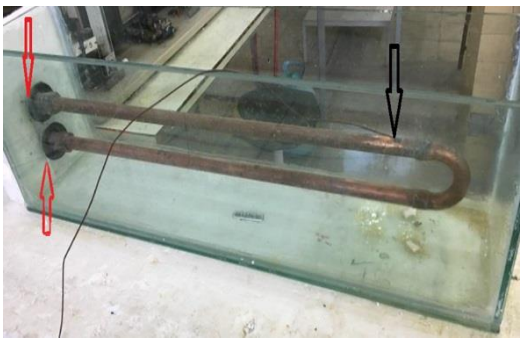


Fig. 3 cooling storage reservoir (arrows shows sensors positions)

شکل 3 مخزن ذخیره سازسرما. موقعیت سنسورها با فلش مشخص شده‌اند

Fig. 4 vibration transfer mechanism

شکل 4 مکانیزم انتقال ارتعاشات

جرمی محلول آب و ضدیخ در شروع آزمایش برای تمام حالت‌ها برابر با 31 گرم بر ثانیه می‌باشد. به‌وسیله روتامتر تعبیه شده، دبی آب خنک‌کن کندانسور در طول مدت انجام تمام آزمایش‌ها، 18cc/sec تنظیم شده است. مخزن پشتیبان حاوی 10 Lit محلول آب و ضدیخ است. بعد از تنظیم شرایط ابتدایی آزمایش، دستگاه سرد کن شروع به کار می‌کند و بلافاصله بعد از آن، دیتالاگر با فاصله زمانی 1 دقیقه شروع به ثبت داده‌های دمایی گزارش شده توسط 4 سنسور می‌نماید. مدت زمان کل آزمایش 280 دقیقه، از زمان شروع به کار دستگاه سردکن می‌باشد. بعد از اتمام آزمایش بلافاصله به‌وسیله یک شیلنگ خلا آب باقی‌مانده در مخزن ذخیره‌ساز یخ به‌طور کامل تخلیه می‌گردد. بعد از ذوب شدن یخ‌های تشکیل شده در مخزن، میزان آب ناشی از ذوب یخ‌ها که در کف مخزن جمع شده است به کمک یک بشر با دقت 5 میلی‌لیتر اندازه‌گیری می‌شود.

به منظور اندازه‌گیری حرارت منتقل شده از مخزن ذخیره‌ساز یخ، دبی مبرد در 40 دقیقه ابتدایی آزمایش هر 10 دقیقه و درزمان‌های بعدی تا پایان آزمایش،هر 20 دقیقه یکبار اندازه‌گیری شده است. سپس به کمک رابطه (1) میزان انتقال حرارت از مخزن ذخیره‌ساز سرما به‌دست آمده است.

$$Q=\dot{m}\times C\times(T_2-T_1) \quad (1)$$

در رابطه (1)، T_1 و T_2 به‌ترتیب دماهای ثبت شده ضدیخ ورودی و خروجی از مخزن ذخیره‌ساز سرما می‌باشند. این دماها از لحظه شروع آزمایش با فاصله زمانی یک دقیقه ثبت شده‌اند. با توجه به درصد ترکیب حجمی مبرد (40 درصد ضد یخ و 60 درصد آب) ظرفیت حرارتی ویژه مبرد برابر با 3.47 J/g ºC در نظر گرفته شده است. خطای دماسنج‌های مورد استفاده در حدود 0.1 ºC می‌باشد. همچنین، میزان یخ تشکیل شده در انتهای آزمایش توسط بشری با دقت 5 میلی‌لیتر اندازه‌گیری شده است. بر این اساس، میزان انتشار خطا در محاسبه حرارت منتقل شده از مخزن ذخیره‌ساز سرما محاسبه گردید و مشخص شد بیشینه خطای ممکن برای محاسبه حرارت منتقل شده از مخزن ذخیره‌ساز سرما برابر با 9 kJ می‌باشد.

4- نتایج

در پژوهش پیش‌رو ارتعاشات مکانیکی با فرکانس 70 هرتز به ویبراتور اعمال شد. همچنین، به‌جای اندازه‌گیری مستقیم دامنه ارتعاش از توان الکتریکی مصرف شده جهت ایجاد ارتعاش استفاده شده است و در طی تست‌های مختلف توان الکتریکی بر روی 0.19 وات ثابت نگه داشته شده است. لازم به توضیح است که توان مصرفی نسبت به دامنه ارتعاش، معیار بهتری از میزان انرژی مکانیکی منتقل شده به سیال است و اندازه‌گیری آن کاربردی‌تر است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]

همچنین اثر اندازه سطح مقطع مؤثر جسم مرتعش که در انتقال ارتعاش به مایع دارای اهمیت است بر روی توان اثرگذار است در حالی که در دامنه به تنهایی دیده نمی‌شود. علاوه بر این، دامنه ارتعاش می تواند برحسب جابجایی، سرعت یا شتاب بیان شود که انتخاب هر یک مباحث خاصی را به دنبال دارد. در مجموع با لحاظ این نکات نویسندگان به این جمع‌بندی رسیدند که توان مصرفی می‌تواند ملاک بهتری نسبت به دامنه ارتعاش باشد. از طرف دیگر باید در نظر داشت که از توان به‌صورت مقایسه ای استفاده شده است و رابطه مستقیمی بین دامنه و توان وجود دارد. بنابراین استفاده از توان یا دامنه تغییری در نتایج کلی به‌دست آمده ایجاد نخواهد کرد.

اثر تغییر موقعیت طولی و عرضی پراب ویبراتور در این آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور مقایسه، آزمایشی بدون اعمال ارتعاشات مکانیکی انجام شد که مشاهده شد مقدار یخ تولید شده برابر 1550 میلی‌لیتر و دمای زیر سرد 1.5- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به‌منظور کاهش میزان احتمال خطا، آزمایش در حالت نرمال بدون ارتعاشات 2 بار تکرار شد و هر بار نتیجه مشابهی از لحاظ میزان تولید یخ به‌دست آمد.

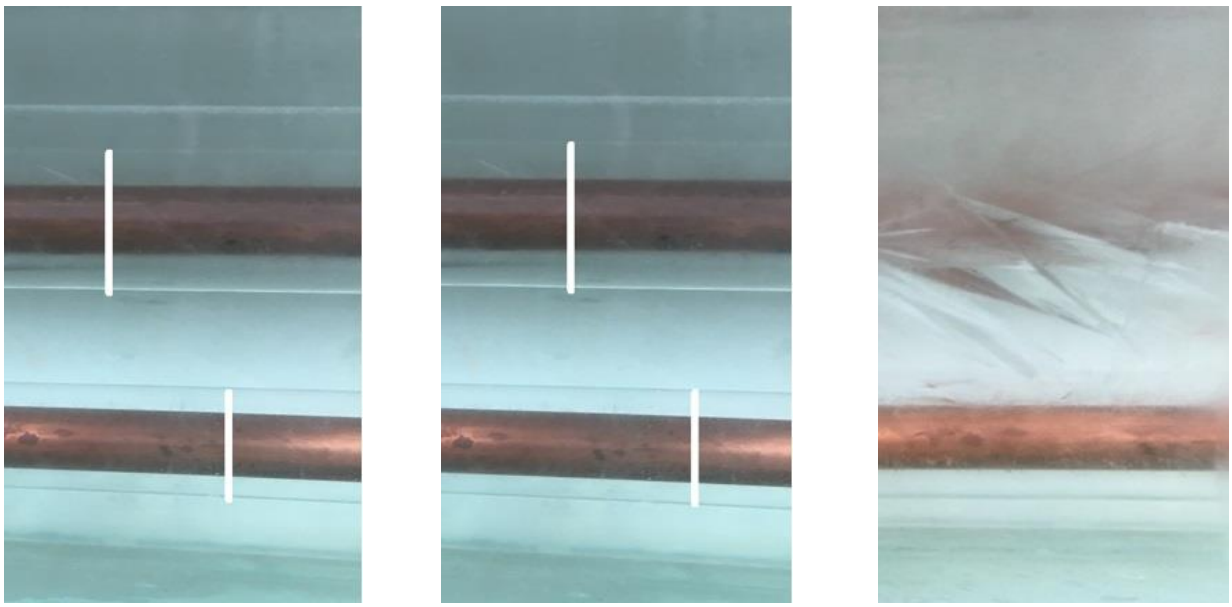
به‌منظور محاسبه انتقال حرارت دمای سیال در ورود و خروج اندازه‌گیری شد. دمای سیال مبرد متغیر می‌باشد و از دمای محیط در لحظات ابتدایی شروع آزمایش تا حدود 14- درجه سانتی‌گراد در دقایق انتهایی آزمایش کاهش می‌یابد. دلیل متغیر بودن دمای مخلوط آب وضدیخ، بسته بودن سیکل سرمایش مبرد است. در واقع، گذشت زمان و کاهش دمای سیال انتقال حرارت موجود در مخزن پشتیبان، باعث سردتر شدن دمای آب و ضدیخ بعد از هر بار عبور از اواپراتور می‌گردد. در ابعاد تجاری هم مساله به همین صورت می‌باشد.

4-1- بررسی اثر فاصله عرضی ویبراتور از کویل

در این بخش با انجام آزمایش‌هایی اثر فاصله عرضی قرارگیری ویبراتور بر مقدار تولید یخ، در داخل مخزن ذخیره‌ساز سرما بررسی شد. به این منظور ویبراتور در فواصل 21 ، 31 و 40 میلی‌متری کویل قرار داده شد. در همه حالت‌ها فاصله طولی ویبراتور از ورودی کویل برابر 8 سانتی‌متری قرار داده شد.

با توجه به تصاویر ثبت شده، مشخص شد برای فاصله 21 میلی‌متری، یخ دندریتی تشکیل می‌گردد ولی در فواصل 31 و 40 میلی‌متر، رشد یخ در اطراف کویل‌ها به‌صورت یکنواخت و شعاعی بوده و اثری از شکل‌گیری یخ با ساختار دندریتی مشاهده نگردید. میزان یخ تشکیل شده در فاصله 21 میلی-متری 1700 میلی‌لیتر و در فواصل 31 و 40 میلی‌متری، 1578 و 1500 میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد. این مساله نشان می‌دهد فاصله عرضی قرارگیری پراب نسبت به کویل بر تشکیل یخ، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. ساختار یخ تشکیل شده پس از گذشت 1800 ثانیه از شروع انجماد در "شکل 5" نمایش داده شده است. همچنین در "شکل 6" نمودارهای دمای ثبت شده توسط حسگر واقع در مجاورت کویل بالایی و در "شکل 7" نمودار حرارت منتقل شده به ازای هر 20 دقیقه نمایش داده شده است.

مطابق "شکل 6"، در حالت فاصله 21 میلی‌متری، انجماد با بیشترین تاخیر مواجه شده و شروع آن پس از گذشت 217 دقیقه از آغاز آزمایش رخ داده است. کمترین دمای زیر سرد در میان فاصله‌های بررسی شده که معادل -4.4°C است نیز در این حالت اتفاق افتاده است. اما در مقایسه میان دو فاصله 40 و 31 میلی‌متری مشخص می‌گردد که انجماد در هر دو حالت در یک زمان (170 دقیقه بعد از شروع آزمایش) اتفاق افتاده و تنها دمای زیرسرد در آن‌ها به میزان 0.6 درجه متفاوت می‌باشد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد با کاهش دامنه ارتعاشات ذرات آب ناشی از افزایش فاصله پراب ویبراتور از کویل، اثر ارتعاشات مکانیکی بر فرایند انجماد آب کاهش یافته است. در "شکل 7" میزان حرارت منتقل شده توسط محلول آب و ضدیخ از مخزن در هر 20 دقیقه گزارش شده است. دلایل کاهش انتقال حرارت با گذشت زمان، یکی کاهش اختلاف دمای بین سیال انتقال حرارت (آب وضد یخ) و آب درون مخزن ذخیره‌ساز یخ و دیگری، کاهش دبی مخلوط آب و



فاصله عرضی 21 میلی‌متر فاصله عرضی 31 میلی‌متر فاصله عرضی 40 میلی‌متر

Fig. 5 Results related to the effect of lateral distance position of the vibrator from coils in the reservoir after 1800 sec after start of solidification

شکل 5 نتایج بررسی اثر موقعیت عرضی ویبراتور نسبت به کویل بر تشکیل یخ پس از گذشت 1800 ثانیه از شروع انجماد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]

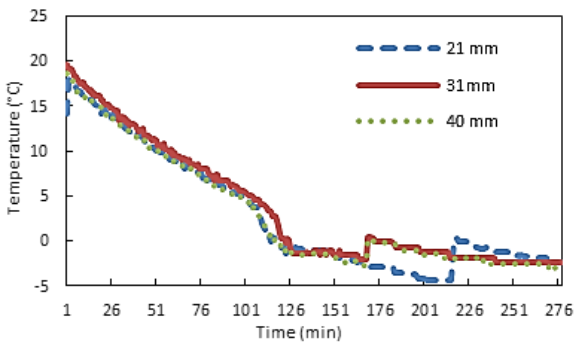


Fig. 6 The temperature recorded by the sensor located on the adjacent coil surface for three different lateral distances of the vibrator

شکل 6 دمای ثبت شده توسط حسگر واقع در سطح مجاور کویل بالا برای سه فاصله عرضی متفاوت ویبراتور نسبت به کویل

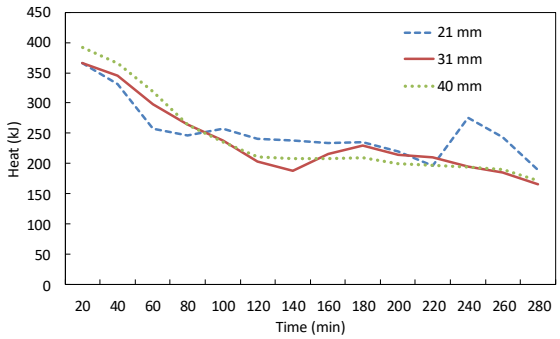


Fig. 7 Total heat transferred from the reservoir every 20 minutes for three different cross-sections of the vibrator

شکل7 مجموع حرارت منتقل شده از مخزن در هر 20 دقیقه برای سه فاصله عرضی متفاوت ویبراتور

ضدیخ، به دلیل افزایش لزجت در اثر کاهش دما می‌باشد. با توجه به نمودار در هر سه حالت، میزان حرارت منتقل شده در فاصله زمانی 20 دقیقه بعد از شروع انجماد افزایش یافته است. دلیل این موضوع آزاد شدن گرمای نهان انجماد و افزایش دمای مخزن می‌باشد. در فاصله 21mm این افزایش دما محسوس‌تر بوده است که متناظر با شکل‌گیری مقادیر قابل‌توجهی یخ با ساختار دندریتی می‌باشد. در جدول 1 پارامترهای انجمادی سه فاصله عرضی بررسی شده به‌طور خلاصه نمایش داده شده‌اند.

با وجود زمان شروع یکسان انجماد در هر دو فاصله 31 و 40 میلی‌متری (170 دقیقه پس از شروع آزمایش)، میزان یخ تشکیل شده در فاصله 31 میلی‌متری نسبت به فاصله 40 میلی‌متری، 78 میلی‌لیتر بیشتر می‌باشد. علت

جدول 1 اثر فاصله عرضی ویبراتور از کویل بر کمیتهای مربوط به انجماد پس از گذشت 280 دقیقه از شروع آزمایش

Table 1 the effect of lateral position of the vibrator from the coil on the solidification parameters after 280 min from beginning of experiment

نوع اثر / فاصله عرضی ویبراتور از کویل (mm)	21	31	40
میزان یخ تشکیل شده(ml)	1700	1578	1500
حرارت منتقل شده (kJ)	3513.7	3306	3348
زمان طی شده برای شروع انجماد(min)	217	170	170
دمای زیر سرد ماقبل کریستال زایی (°C)	-4.4	-2.7	-2.1
افزایش دمای هنگام انجماد (°C)	4.7	3	2.5
درصد تغییر یخ تشکیل شده نسبت به حالت بدون ارتعاشات (٪)	9	1	-3

این موضوع می‌تواند پایین‌تر بودن دمای زیر سرد قبل از شروع انجماد در فاصله 31 میلی‌متری در مقایسه با فاصله 40 میلی‌متری باشد. پایین‌تر بودن دمای زیر سردِ قبل از شروع انجماد سبب می‌گردد تا تشکیل یخ در مخزن نیاز به تامین برودت کمتری داشته باشد و از آن‌جا که برودت تامین شده توسط مبرد، در هر دو آزمایش یکسان است دمای زیر سرد کمتر، منجر به شکل‌گیری مقادیر بیشتری از یخ شده است.

در توضیح علت کاهش اثر ارتعاشات در اثر افزایش فاصله عرضی القاگر ویبراتور از کویل باید گفت شدت (دامنه) یک موج با عبور آن از محیط مادی کاهش می‌یابد. به بیانی دیگر، هنگام عبور یک موج از یک ماده طبیعی، اثر تفرق و جذب موج مشاهده می‌گردد. تغییرات دامنه موج فشاری (صوتی) درون آب در یک محیط مادی مشخص با دامنه اولیه موج و فاصله‌ای که طی می‌کند از رابطه زیر محاسبه می‌شود [14]:

$$A_{(x)}=A_0\times\exp(-\alpha x) \qquad (2)$$

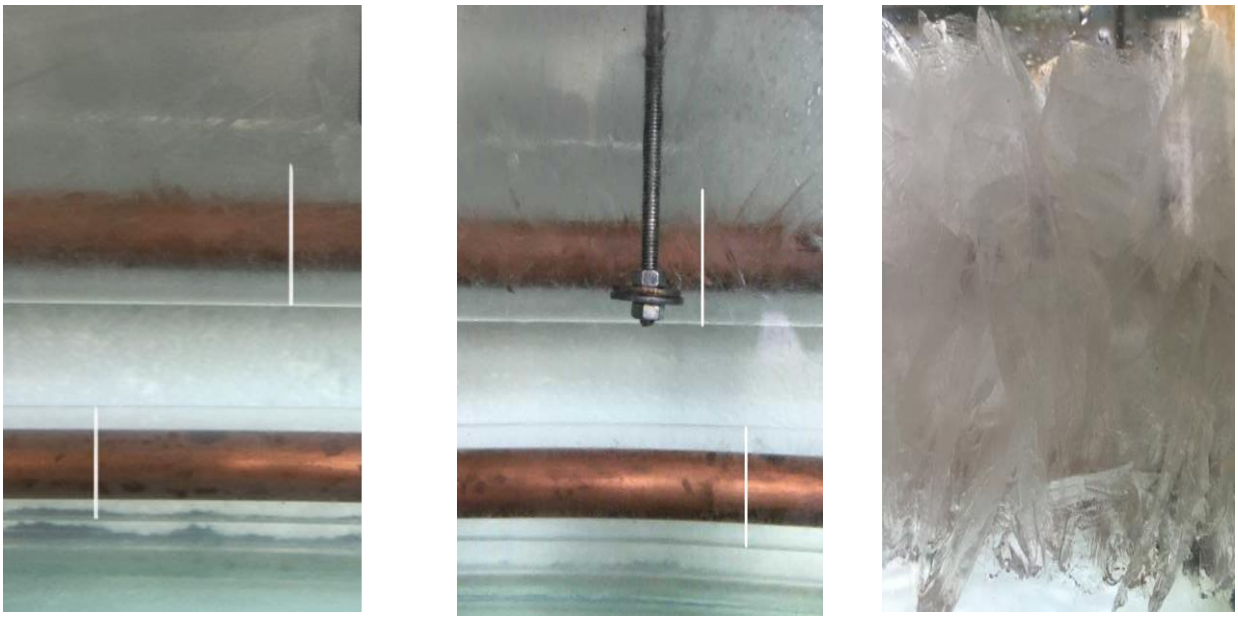
در این رابطه A_0 دامنه موج اصلی شکل گرفته در مبدا موج می‌باشد. α ضریب جذب (میرایی) دامنه بوده و همیشه مقادیری مثبت ومتغیر دارد و x نیز مسافت طی شده موج از مبدا ایجاد آن می‌باشد. همان‌طور که در رابطه (2) مشاهده می‌شود دامنه موج محلی با افزایش فاصله از منبع موج کاهش می‌یابد و تاثیرگذاری موج مکانیکی بر روند انجماد کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که با توان و فرکانس در نظر گرفته شده در کار حاضر، فاصله ویبراتور از کویل بیشتر یا برابر با چهار سانتی‌متر باشد وجود ویبراتور تاثیری بر فرآیند انجماد نخواهد داشت.

4-2- فاصله مناسب طولی ویبراتور از کویل

به‌منظور یافتن فاصله طولی مناسب ویبراتور از ورودی کویل، ویبراتور در حالت‌های مختلف، در مجاورت ورودی کویل به مخزن (5 سانتی‌متری از ورودی کویل به مخزن)، در ناحیه میانی کویل (فاصله 32 سانتی‌متری از ورودی کویل به مخزن) و در مجاورت زانویی قرار داده شد. با توجه به نتایج بخش 4-1 فاصله عرضی ویبراتور از کویل، در هر سه آزمایش برابر با 21 میلی‌متر قرار داده شد. ساختار یخ تشکیل شده در این حالت‌ها پس از گذشت 1800 ثانیه از شروع انجماد در "شکل 8" نمایش داده شده است. در هر کدام از تصاویر ثبت شده در "شکل 8" که مرتبط با تغییر موقعیت طولی القاگر ویبراتور در مخزن است، مقادیر متفاوتی یخ با ساختار دندریتی تشکیل شده است. در تصاویر مرتبط با قرار دادن القاگر ویبراتور در نقاط ابتدایی و میانی مخزن مشاهده می‌شود که گستردگی یخ دندریتی عموما در ناحیه بالای مخزن می‌باشد. این در حالی است که در حالتی که القاگر ویبراتور در مجاورت زانویی U شکل قرار گرفته، یخ با ساختار دندریتی به نقاط مختلف مخزن گسترش یافته است. شروع انجماد در این حالت پس از گذشت 252 دقیقه از آغاز آزمایش رخ داد. لازم به ذکر است تصاویر مربوط به ساختار یخ تشکیل شده، بلافاصله بعد از تخلیه آب باقی مانده از درون مخزن ذخیره‌ساز یخ ثبت شده‌اند.

همان‌طور که در نمودار "شکل 9" مشاهده می‌شود، در وسط کویل نسبت به دو سر کویل زمان شروع انجماد کمتر و قدر مطلق دمای زیر سرد آن کوچکتر است. در توجیه این پدیده باید گفت از یک المان سطح که در نقطه میانی مخزن قرار دارد انتقال حرارت کمتری نسبت به نقاط ابتدایی و انتهایی کویل صورت می‌پذیرد زیرا در ورودی به دلیل سرد بودن سیال انتقال حرارت و در زانویی به‌دلیل آشفتگی جریان انتقال حرارت بیشتر است. همان‌گونه که در "شکل 10" که مربوط به انجماد در حالت بدون ارتعاشات

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]



ویبراتور در مجاورت زانویی — ویبراتور در فاصله 32 سانتی‌متری از ورودی کویل — ویبراتور در مجاورت ورودی کویل به مخزن

Fig. 8 images related to the effect of longitudinal position of the vibrator from coils in the reservoir on the solidification

شکل 8 تصاویر مرتبط با اثر تغییر موقعیت طولی ویبراتور در درون مخزن بر انجماد

است مشاهده می‌شود حین فرآیند انجماد ضخامت یخ در زانویی از دیگر نقاط بیشتر است که این مساله، بالاتر بودن نرخ انتقال حرارت در این ناحیه را تایید می‌کند. وقتی در قسمتی از کویل انتقال حرارت کمتری صورت می‌گیرد در اطراف آن تعداد کمتری هسته‌های کریستالی تشکیل می‌گردد. از آن‌جا که برای شروع انجماد در سیستم، باید تعداد اولیه هسته‌ها به یک تعداد بحرانی برسند [11]. قرار دادن یک عامل خارجی مانند ویبراتور در مجاورت مکان‌هایی که انتقال حرارت بیشتر و به تبع آن هسته‌زایی گسترده‌تری در آن‌ها صورت می‌گیرد، باعث تاخیر بیشتر در شروع انجماد و دمای زیر سرد پایین‌تر می‌گردد.

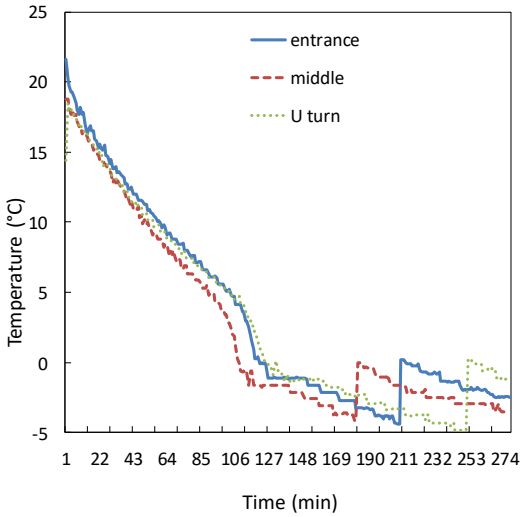


Fig. 9 The temperature recorded by the sensor located on the adjacent coil surface for three different position of the vibrator probe

شکل 9 دمای ثبت شده توسط حسگر واقع در سطح مجاور کویل بالا برای سه موقعیت متفاوت ویبراتور درون مخزن

Fig. 10 During the freezing process, the thickness of the ice in the knee is greater than the other points

شکل 10 حین فرآیند انجماد ضخامت یخ در زانویی از دیگر نقاط بیشتر است

وقتی ویبراتور در مجاور زانویی قرار گرفت، بیشترین تاخیر در شروع انجماد (252 دقیقه پس از شروع آزمایش) و همچنین پایین‌ترین دمای زیر سرد قبل از شروع کریستال‌زایی مشاهده شد که این مساله می‌تواند به بیشتر بودن انتقال حرارت در زانویی نسبت داده شود. تقریبا تمامی حجم یخ تشکیل شده در این حالت دارای ساختار دندریتی بود که با حجم زیاد در نقاط مختلف مخزن گسترش یافته بود. با این وجود، حجم یخ خالص تشکیل شده نسبت به سایر حالات مورد بررسی در این بخش کاهش یافت. علت این موضوع بیش از حد به تاخیر افتادن انجماد و عدم تامین فرصت کافی برای رشد یخ شعاعی در ناحیه اطراف کویل می‌باشد که بر خلاف یخ دندریتی، به تدریج و به آهستگی رشد پیدا می‌کند.

نمودار انتقال حرارت برای این سری از آزمایش‌ها، در "شکل 11" ترسیم شده است. هر کدام از نقاط نمودار، معرف حرارت منتقل شده توسط مخلوط آب و ضدیخ در مدت 20 دقیقه می‌باشند. مشاهده می‌گردد مشابه با حالت‌هایی که فاصله عرضی پراب ویبراتور از کویل تغییر می‌کرد، قبل از شروع فرایند انجماد، نرخ انتقال حرارت از مخزن به تدریج کاسته شده است. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، دلیل این کاهش انتقال حرارت، کاهش اختلاف دما بین مخلوط آب و ضد یخ و آب درون مخزن از یک سو و از سویی دیگر کاهش دبی آب و ضدیخ به دلیل افزایش لزجت آن در اثر کاهش دمای پیوسته آن می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]

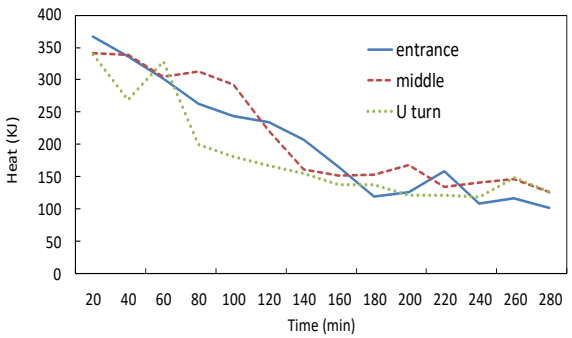


Fig. 11 Total heat transferred from the reservoir every 20 minutes for three different position of the vibrator probe

شکل11 مجموع حرارت منتقل شده از مخزن در هر 20 دقیقه برای سه فاصله عرضی متفاوت ویبراتور

بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت در میان سه حالت بررسی شده، مربوط به حالتی است که ویبراتور در کنار زانویی قرار گرفت. در این حالت اختلاف انتقال حرارت یک دقیقه قبل و بعد از شروع کریستال‌زایی برابر 10.84 kJ/min می‌باشد. این عدد برای حالت‌هایی که ویبراتور در مجاورت میانه کویل و ورودی کویل به مخزن قرار داشت به ترتیب برابر 6.57 kJ /min و 4.46 kJ /min محاسبه شد. در حالت ویبراتور در مجاورت زانویی، انجماد به مدت زیادی به تاخیر افتاد و همچنین، دمای زیر سرد کاهش یافت. کاهش دمای آب مخزن و پراکندگی هسته‌ها باعث شد تا امکان تشکیل یخ در حجم بزرگی از مخزن فراهم گردد. اگرچه مقدار خالص یخ تشکیل شده در این حالت حتی نسبت به حالت بدون ارتعاشات کمتر است، ولی نرخ انتقال حرارتِ بعد از شروع انجماد در این حالت، نسبت به دو موقعیت دیگر ویبراتور بیشتر است.

نتایج به‌دست آمده از این سه آزمایش به‌طور خلاصه در جدول 2 نمایش داده شده است.

با توجه به بهبود تولید یخ در شرایطی که ویبراتور در میانه مخزن قرار داده شد نتیجه‌گیری می‌شود که در مخزنی با هندسه و شرایط مورد بررسی، قرار دادن ویبراتور در نقاطی که انتقال حرارت در آن‌ها بیشینه است به‌منظور افزایش تولید یخ مناسب نیست.

جدول 2 اثر فاصله طولی ویبراتور در مخزن بر کمیت‌های مربوط به انجماد پس از 280 دقیقه از شروع آزمایش

Table 2 The effect of longitudinal position of the vibrator inside the storage tank on the solidification parameters after 280 min from beginning of experiment

نوع اثر	در ورودی	در میانه کویل	در مجاور زانویی
میزان یخ تشکیل شده (ml)	1680	1743	1300
حرارت منتقل شده (kJ)	2852	2989.133	2530
زمان طی شده شروع انجماد (از لحظه آغاز آزمایش برحسب دقیقه)	210	182	252
دمای زیر سرد ماقبل کریستال زایی (^{O}C)	-4.4	-4.1	-4.8
افزایش دمای هنگام انجماد (^{O}C)	4.6	4.1	5.1
درصد تغییر یخ تشکیل شده نسبت به حالت بدون ارتعاشات (٪)	8	12	-16

5- مقدار مصرف انرژی ویبراتور و انتقال انرژی به زمان کم‌باری

اضافه کردن ویبراتور به عنوان مصرف‌کننده، علاوه بر هزینه اولیه، منجر به اضافه شدن هزینه مصرفی می‌گردد که با تعرفه کم‌باری محاسبه می‌شود و در عوض، با کاستن از مقدار مصرف انرژی الکتریکی برای تامین سرمایش در زمان پیک مصرف، برای مصرف کننده هزینه کمتری به ارمغان می‌آورد. همچنین با پیک‌سایی شبکه برای دولت و محیط زیست هم منافعی حاصل خواهد شد. تحلیل دقیق اقتصادی استفاده از فناوری مورد اشاره در تحقیق حاضر، می‌تواند در تحقیق دیگری مورد بررسی قرار گیرد. اما صرفا برای دستیابی به یک دید اولیه، مقدار مصرف ویبراتور و مقدار کاهش انرژی الکتریکی مصرفی در اثر استفاده از ویبراتور در ادامه محاسبه و ارزیابی می‌شوند.

مقدار مصرف انرژی الکتریسیته توسط ویبراتور در زمان کم‌باری: توان اعمالی به ویبراتور در آزمایش‌ها 0.19 وات بوده است. زمان کل آزمایش‌ها برابر با 280 دقیقه است ولی زمان لازم برای شروع انجماد در تمام حالت‌ها بیش از 120 دقیقه می‌باشد. لذا، ویبراتور حداکثر لازم است طی 160 کار کند که تنها به 1.82 کیلو ژول انرژی نیاز دارد که کمتر از 0.5 وات ساعت است .

مقدار مصرف الکتریسیته جهت تولید اضافه یخ تشکیل شده: بر اثر استفاده از ویبراتور، میزان افزایش یخ تشکیل شده در حالت ویبراتور در میانه کویل برابر 193 میلی‌لیتر یخ می‌باشد. با توجه به خنک بودن دمای محیط در شب، ضریب کارایی سامانه چیلر در شب بیشتر است. با در نظر گرفتن مقدار COPبرای یک چیلر تراکمی برابر با 3، سرمایشی که از مقدار یخ ذخیره شده حاصل می‌شود برابر است با:

$$Q_l=m_{ice}L_f+ m_{ice}c\Delta T \quad (3)$$

در این رابطه m_{ice} برابر با جرم یخ، L_f برابر با گرمای نهان ذوب، c برابر با گرمای ویژه آب و ΔT برابر با اختلاف دمای نقطه ذوب و حداکثر دمای قابل استفاده برای چرخش در کویل‌ها تبادل‌کننده حرارت با هوای محیط می‌باشد. در صورتی‌که اختلاف دما 14 ºC در نظر گرفته شود مقدار سرمایش حاصل برابر با 21 وات ساعت خواهد بود. لذا انرژی الکتریکی موردنیاز با فرض بازدهی صددرصد تجهیزات الکتریکی، W، برابر است با:

$$W=Q_l/COP=7 \quad (4)$$

بنابراین، اضافه کردن پراب ارتعاشی باعث می‌شود که مقدار 0.5 وات انرژی الکتریکی بیشتر مصرف شود ولی در عوض حداقل مقدار 7 وات مصرف انرژی الکتریکی از اوج مصرف به زمان کم‌باری منتقل شود. لذا با اضافه شدن 1 واحد مصرف برق در زمان کم‌باری می‌توان 14 واحد از مصرف انرژی در اوج مصرف کاست .

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر ارتعاشات مکانیکی بر روی انجماد آب در درون یک سیستم ذخیره‌ساز یخ روی کویل مورد توجه قرار گرفت و اثر موقعیت قرارگیری پراب ویبراتور در نقاط مختلف مخزن بررسی شد. فرکانس ارتعاشات در تمام آزمایش‌ها برابر با 70 هرتز و توان اعمالی به ویبراتور، برابر با 0.19 وات قرار داده شد.

- با انجام آزمایش‌هایی اثر فاصله عرضی قرارگیری ویبراتور بر مقدار تولید یخ، در داخل مخزن ذخیره‌ساز سرما بررسی شد. مشخص شد ساختار یخ تشکیل شده تنها در حالتی که فاصله بین کویل و پراب به اندازه کافی کم باشد (در حدود 21 میلی‌متر) به‌صورت یخ با ساختار دندریتی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]

می‌باشد و در صورتی‌که با توان و فرکانس در نظر گرفته شده در کار حاضر، فاصله ویبراتور از کویل بیشتر یا برابر با چهار سانتی‌متر باشد تقریبا وجود ویبراتور تاثیری بر فرآیند انجماد نخواهد داشت.

- مشخص شد با افزایش فاصله عرضی ویبراتور از کویل، دمای زیر سرد هم به دمای ذوب یخ نزدیکتر می‌شود و شروع انجماد پس از طی مدت زمان کمتری رخ می‌دهد.
- به منظور بررسی رابطه بین موقعیت افقی قرارگیری پراب و دمای زیرسرد، تاخیر شروع انجماد و میزان یخ تشکیل شده در پایان آزمایش، پراب ویبراتور در سه موقعیت مجزا در مخزن قرار داده شد. انتخاب نقاط براساس متفاوت بودن نرخ انتقال حرارت بین کویل و سیال مجاور، صورت گرفت. نتایج نشان داد قرار دادن ویبراتور در وسط کویل نسبت به دو سر آن، منجر به افزایش بیشتری در مقدار یخ تشکیل شده می‌گردد.
- به‌دلیل سردتر بودن سیال انتقال حرارت در ورودی کویل و اختلاط جریان آب و ضدیخ درونِ کویل در زانویی، انتقال حرارت در این دو ناحیه بیشتر است و به تبع آن نرخ تشکیل هسته‌های کریستالی نیز بیشتر است. لذا، قرار دادن یک عامل خارجی مانند ویبراتور در این دو ناحیه، باعث پراکندگی بیشتر هسته‌ها و در نتیجه تاخیر بیشتر شروع انجماد و دمای زیرسرد پایین‌تر می‌گردد.
- آزمایش‌های انجام گرفته در این بخش مشخص کرد میزان یخ تشکیل شده به دمای زیرسرد و میزان تاخیر در شروع انجماد نیز بستگی است. در تاخیرهای زیاد شروع انجماد (مشابه وقتی که پراب ویبراتور در مجاورت زانویی قرار گرفت)، به‌دلیل کاهش زمان برای تشکیل یخ شعاعی (که برخلاف یخ دندریتی به آهستگی رشد می‌کند)، حتی ممکن است مقدار خالص یخ تشکیل شده نسبت به حالت نرمال بدون ارتعاشات نیز کمتر شود.
- عواملی مانند اتلافات حرارتی بین مخزن و محیط پیرامونی و همچنین کاهش انتقال حرارت در اثر کاهش اختلاف دما بین سیال انتقال حرارت و آب مخزن ذخیره‌ساز می‌تواند از دلایلی باشد که به تاخیر انداختن بیش از حد شروع انجماد را به امری نامطلوب تبدیل می‌کند.

7- مراجع

[1] Y. H. Yau, B. Rismanchi, A review on cool thermal storage technologies and operating strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 787-797, 1//, 2012.

[2] H. Jannesari, N. Abdollahi, Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems, *Applied Energy*, Vol. 189, No. Supplement C, pp. 369-384, 2017/03/01/, 2017.

[3] M. Dalvi-Isfahan, N. Hamdami, E. Xanthakis, A. Le-Bail, Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields, *Journal of Food Engineering*, Vol. 195, pp. 222-234, 2017/02/01/, 2017.

[4] A. Hosseinian, A. H. Meghdadi Isfahani, E. Shirani, Experimental investigation of surface vibration effects on increasing the stability and heat transfer coeffcient of MWCNTs-water nanofluid in a flexible double pipe heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 90, No. Supplement C, pp. 275-285, 2018/01/01/, 2018.

[5] A. Ciocănea, D. L. Burețea, The Influence of flow tube vibrations over the efficiency of solar water heating collectors, *Energy Procedia*, Vol. 112, No. Supplement C, pp. 330-335, 2017/03/01/, 2017.

[6] W. Liu, Z. Yang, B. Zhang, P. Lv, Experimental study on the effects of mechanical vibration on the heat transfer characteristics of tubular laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, No. Part A, pp. 169-179, 2017/12/01/, 2017.

[7] L. Zhang, J. Lv, M. Bai, D. Guo, Effect of Vibration on Forced Convection Heat Transfer for SiO2–Water Nanofluids, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 36, No. 5, pp. 452-461, 2015/03/24, 2015.

[8] S. N. Ayrapetyan, A. M. Amyan, G. S. Ayrapetyan, *The Effects of Static Magnetic Fields, Low Frequency Electromagnetic Fields and Mechanical Vibration on some Physicochemical Properties of Water*, in: G. H. Pollack, I. L. Cameron, D. N. Wheatley, *Water and the Cell*, Eds., pp. 151-164, Dordrecht: Springer Netherlands, 2006.

[9] D. D. Ganji, A. Malvandi, *1 - Introduction to Heat Transfer Enhancement*, in: *Heat Transfer Enhancement Using Nanofluid Flow in Microchannels*, Eds., pp. 1-12: William Andrew Publishing, 2016.

[10] A. Okuda, T. Nagasawa, S. Okawa, A. Saito, Research on Solidification of Water on Surface, *Proceedings of 14th International Conference on the Properties of Water and Steam*, Kyoto, Japan, August 29 - September 3, 2004.

[11] M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah, Freezing phenomena in ice–water systems, *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 14, pp. 1773-1789, 2002/09/01/, 2002.

[12] C. A. Knight, N. Fletcher, The freezing of supercooled liquids, *American Journal of Physics*, Vol. 36, No. 5, pp. 466-467, 1968.

[13] R. R. Gilpin, The effect of cooling rate on the formation of dendritic ice in a pipe with no main flow, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, No. 3, pp. 419-424, 1977.

[14] T. H. Neighbors Iii, *Chapter 4 - Absorption of Sound in Seawater*, *Applied Underwater Acoustics*, Eds., pp. 273-295: Elsevier, 2017.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-07]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.34.5]