

## بررسی تجربی اثر قطر لوله بر راندمان مخزن یخ با کاربرد در مراکز داده

مرتضی صالح کندزی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران،  
msaaleh@gmail.com

سید مجتبی موسوی ناینیان\*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران،  
mousavi.mojtaba@wtiau.ac.ir

### چکیده

با توجه به کاربرد روزافزون مراکز داده ها بویژه در صنعت مخابرات لازم است روش‌های بهینه ای برای خنک‌کاری این سیستم ها در نظر گرفته شود. یکی از عوامل مهم در این زمینه تاثیر قطر لوله های مسی مخزن یخ می‌باشد. با توجه به نبود کار تجربی مشابه در این زمینه، ساخت یک سیستم مخزن یخ در مقیاس کوچک انجام شد تا عملکرد سیستم طراحی شده بصورت تجربی اندازه گیری نماید. سیستم ذخیره سازی مورد بررسی از نوع استاتیک و غیرمستقیم است که تشکیل و ذوب کردن یخ بر روی سطح خارجی لوله انجام می‌پذیرد. انرژی سرمایشی موردنیاز، به شکل یخ، ذخیره شده و در زمان نیاز استفاده می‌شود. سیستم مخزن یخ تحت شرایط واقعی عملیات آزمایش شده تا تاثیر قطر لوله مسی بر عملکرد آن بررسی شود. تکرار پذیری قابل قبول نتایج آزمایش شده، صحت اطلاعات ارایه شده را تایید می‌نماید. نتایج بدست آمده بیانگر این مهم است که در سطح گرمایی یکسان لوله‌ها، با کاهش یک اندازه قطر لوله مسی، سرعت تشکیل یخ ۴٪ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مخزن یخ، مراکز داده، قطر لوله، راندمان.

### Experimental study on effect of pipe diameter in ice storage efficiency with application in Data Centers

M. Saleh Kandezi  
S. M. Musavi Naenian

Department of Mechanical Engineering, University of Azad Tehranharb, Tehran, Iran  
Department of Mechanical Engineering, University of Azad Tehranharb, Tehran, Iran

### Abstract

Due to the increasing use of data centers, especially in the telecommunications industry, it is necessary to consider optimal cooling systems for these systems. One of the important factors in this regard is the effect of the diameter of the copper banks of the ice bank. Due to the lack of similar empirical work in this field, a small-scale ice bank system was built to measure the performance of the designed system empirically. The investigated storage system is static and indirect, which involves the formation and melting of ice on the outer surface of the pipe. The required cooling energy is stored in ice, stored and used as needed. The ice bank system is tested under the actual operating conditions to determine the effect of copper tube diameter on its performance. Acceptable repeatability of the tested results confirms the accuracy of the information provided. The results indicate that, at a uniform thermal surface of the tubes, the rate of ice formation increased by 4% by decreasing the diameter of the copper tube diameter.

**Keywords:** Ice bank, Data center, Coil size, Efficiency.

### ۱- مقدمه

طراحی، ساخت و بهینه سازی سیستم‌های مخزن یخ در راستای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و سرمایه در سیستم‌های تهویه مطبوع و تاسیساتی که نیاز به برودت دارند حایز اهمیت است. سیستم مخزن یخ با تولید و ذخیره یخ مقدار زیادی انرژی برودتی را در خود ذخیره می‌کند تا در ساعات اوج مورد نیاز، برودت لازم را برای سیستم تامین نماید. مزایای استفاده از مخزن یخ عبارتند از:

۱- کاهش سرمایه گذاری اولیه: در طراحی های سنتی، ظرفیت کمپرسور و چگالنده و... برای تامین اوج ظرفیت مورد نیاز طراحی می‌شود، درحالیکه اگر از مخزن یخ در طراحی سیستم بهره گرفته شود، طراحی ظرفیت کمپرسور و چگالنده بر حسب ۵۰٪ تا ۶۰٪ میزان اوج ظرفیت مورد نیاز انجام می‌گردد زیرا سیستم قادر به فعالیت ۲۴ ساعته در طول شبانه روز و به تبع آن تولید و ذخیره برودت می‌باشد و لذا برودت مازاد مورد نیاز در طی روز، جهت تامین اوج ظرفیت، از محل ذخیره شبانه قابل تامین می‌باشد در نتیجه در صورت استفاده از مخزن یخ نیازی به کمپرسور و چگالنده بزرگ نیست و تجهیزات کوچکتر قادر به پاسخ گویی به نیاز ظرفیت خواهد بود. همچنین از آنجا که سیستم توسط آب سرد خروجی مخزن یخ (نزدیک صفر درجه) که

دارای دمای کمتری نسبت به آب سرد خروجی مبادله کن های لوله پوسته و یا صفحه ای میباشد تغذیه می‌گردد، لذا اختلاف دمای موجود بین آب سرد و محیط مورد نظر سرمایش بیشتر شده و برای تامین یک میزان برودت خاص، نیاز به تامین آب سرد کمتری می‌باشد در نتیجه پمپ و لوله کشی لازم دارای قطر و ظرفیت کمتری خواهند بود و به همین دلیل، افزایش اختلاف دما کویل سرمایشی کوچکتر و فن کوچکتر پاسخگوی نیاز خواهد بود. استفاده از کمپرسور و چگالنده کوچکتر علاوه بر کاهش قطر لوله و شیر آلات، نیاز به سیم کشی و تجهیزات الکترونیکی کوچکتری دارد و در صورت تامین برق پشتیبان نیاز به ژنراتور کوچکتری خواهد بود.

۲- کاهش هزینه مصرف انرژی: چون برودت در تمام طول شبانه روز تولید و ذخیره می‌شود، لذا در طی ساعات اوج مصرف برق، نیاز به مصرف زیاد جریان الکتریسیته نمی‌باشد و قسمت عمده ای از برودت مورد نیاز از محل ذخیره شبانه تامین می‌شود و لذا در صورت استفاده از کنتور برق زماندار که هزینه برق مصرفی در ساعات اوج مصرف را با تعرفه بسیار بیشتر از ساعت نیمه شب محاسبه می‌کند، هزینه برق مصرف شده کاهش چشمگیری می‌یابد زیرا تجهیزات برودتی شامل کمپرسور، چگالنده و غیره دارای ظرفیت و اندازه کوچکتری می‌باشند.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mousavi.mojtaba@wtiau.ac.ir

از آنجا که قسمت زیادی از برودت در شب تولید می‌شود که دمای محیط کمتر از روز می‌باشد، لذا بازده کمپرسور و چگالنده افزایش چشمگیری می‌یابد و مصرف برق در مقابل برودت تولید شده کاهش می‌یابد. کمپرسور، زمانی دارای بازده حداکثر است که ۱۰۰٪ زیر بار باشد و از آنجا که در سیستم‌های دارای مخزن یخ معمولاً کمپرسور تحت ۱۰۰٪ بار کار می‌کند لذا بازده کمپرسور در سیستم های دارای مخزن یخ بیشتر بوده و مصرف برق کمتری در مقابل تولید برودت مورد نیاز خواهد داشت. گفتنی است که در یک سیستم تهویه مطبوع سنتی به طور متوسط کمپرسور برای نزدیک به ۶ ماه از سال، حداکثر به میزان ۳۰٪ ظرفیت زیر بار می‌باشد و در نتیجه بازده بسیار پایین‌تری را دارا است.

۳- افزایش قابلیت اطمینان سیستم: در سیستم های سنتی برای تامین ۱۰۰٪ اوج ظرفیت برودت لازم سالیانه معمولاً از دو کمپرسور که هر یک قادر به تامین ۵۰٪ بار برودتی مورد نیاز می‌باشند، استفاده می‌کنند تا در صورت ایجاد خلل و خرابی در یک کمپرسور، کمپرسور دیگر قادر به تامین ۵۰٪ برودت لازم باشد. اما در سیستم‌های دارای مخزن یخ چنانچه سیستم دارای دو کمپرسور باشد، هر یک از کمپرسورها ۳۰٪ برودت مورد نیاز را تامین کنند و الباقی ۴۰٪ برودت لازم توسط مخزن یخ تامین شود. لذا در صورت ایجاد خلل در یک کمپرسور، سیستم قادر به تامین ۷۰٪ برودت لازم با استفاده از مخزن یخ و یکی از دو کمپرسور می‌باشد. بر اساس اطلاعات هواشناسی ASHRAE برای یک سیستم متداول تهویه مطبوع، تامین ۷۰٪ اوج برودت نیاز سالیانه، سبب تامین نیاز برودتی مجموعه برای ۸۵٪ زمان در طول سال میگردد، لذا سیستم های دارای مخزن یخ قابلیت اطمینان بسیار بیشتری دارند. قابل ذکر است که در طراحی سیستمهای برودتی، میزان حداکثر برودت لازم (اوج مصرف سالیانه) جهت انتخاب ظرفیت تجهیزات ملاک طراحی و محاسبه قرار داده می‌شود و لذا تامین ۷۰٪ اوج مصرف سالیانه در بیشتر طول سال بطور کامل جوابگوی نیازهای برودتی سیستم می‌باشد.

۴- نیاز به نگهداری و تعمیر کمتر: مخزن یخ دارای قطعات متحرک و چرخنده بسیار کمتری نسبت به کمپرسور می‌باشد لذا استهلاک کمتری داشته و نیاز به تعمیر بسیار کمتری نسبت به کمپرسور دارد.

۵- حفظ محیط زیست: تولید برق در ساعات شبانه روز به علت بازده بیشتر نیروگاهها در شب، بر اساس آمارهای موجود، دارای حدود ۳۰٪ آلودگی کمتر نسبت به تولید برق در ساعات روز می‌باشد. لذا مصرف برق شبانه که توسط سیستم‌های دارای مخزن یخ اتفاق می‌افتد آلودگی کمتری برای محیط زیست در پی دارد. سیستم‌های دارای مخزن یخ نسبت به سیستم‌های سنتی میزان برق کمتری مصرف می‌کنند لذا سبب کاهش آلودگی محیط زیست ناشی از تولید برق می‌شوند. با استفاده از مخزن یخ در سیستم‌های فریونی، به علت کوچکتر شدن سیستم برودتی و مصرف کمتر مبرد در مدار برودتی، کاهش آلودگی محیط زیست ناشی از نشت مبردهای فریونی مخرب لایه ازن را سبب می‌شود.

سیستم ذخیره یخ شامل یک یا چندین کوپل است که در یک مخزن آب عایق بندی شده غوطه ور هستند. در مخازن یخ پیش ساخته، کوپل به همراه مخزن پیش ساخته و سایر متعلقات ارایه می‌گردد. در بعضی از سیستمهای برودتی بزرگ ممکن است مخازن بتونی یا فلزی

در محل ساخته شوند و تنها نیاز به کوپل تبخیرکن مخزن یخ باشد. [1,2,3]

دستگاههای مخزن یخ حتی در زمستان هم کاربرد قابل توجه دارد و یکی از موثرترین پارامترهای تعیین کننده راندمان آن قطر لوله ها می‌باشد. در سال ۱۹۹۳ اس. ال. فینر - ا. سی. کلینند یک مدل ساده ریاضی برای پیش بینی رفتار گذار یک مخزن یخ ارایه دادند [1]. این مدل پویا شامل چهار معادله دیفرانسیل معمولی است که موقعیت جبهه یخ، دمای آب، دمای تبخیر و تراکم مبرد را جهت شبیه سازی کارایی متغیر با زمان یک سیستم مخزن یخ R22 ارایه می‌دهد.

در سال ۱۹۹۶ مدل سازی یک سامانه ذخیره انرژی یخ-بر-کوپل توسط ا. ج. دلبلیو. لی - ج. دلبلیو. جونز [2] انجام شد. مدل های ارایه شده برای هر دو حالت شارژ و تخلیه برای سیستم ذخیره انرژی گرمایی یخ روی کوپل (TES) نشان داد که پیش بینی های مدل حدود ۵٪ تا ۱۲٪ با مقادیر تجربی انحراف دارند. همچنین در حالت تخلیه، دمای آب در مخزن در حدود ۵٪ با مقادیر تجربی اختلاف دارد.

در سال ۱۹۹۶ کارایی آزمایشگاهی یک سامانه ذخیره انرژی گرمایی یخ-بر-کوپل برای مصارف خانگی توسط ا. ج. دلبلیو. لی - ج. دلبلیو. جونز [3] انجام شد. یک سیستم TES در طیف وسیعی از شرایط داخلی و خارجی برای تعیین پارامترهای مانند سرعت ساخت یخ، قدرت کمپرسور، نرخ سرمایش، نرخ گرمایش، نسبت کارایی انرژی و فاکتور مصرف قدرت آزمایش شد. نتایج نشان می‌دهد اگر چه میزان ساخت یخ، خطی به نظر می‌رسد، اما نظریه پیش بینی می‌کند که نرخ یخ سازی لحظه ای در طول زمان با شیب کمی کاهش می‌یابد. بار خنک کنندگی در مبادله کن گرمایی داخل ساختمان در دمای داخلی بالاتر افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، نرخ ذوب یخ با افزایش دمای داخلی افزایش می‌یابد لذا نسبت بهره وری انرژی سیستم با کاهش دمای هوای آزاد افزایش می‌یابد و اقتصادی تر است که این سیستم در دمای محیط پایین تر کار کند.

در سال ۱۹۹۹ مدل سازی ریاضی سامانه های ذخیره انرژی گرمایی برای صنعت غذا توسط ا. لوپز - جی. لاکارا [4] انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل های ساده برای پیش بینی رفتار دینامیکی سیستم های مخزن یخ تحت بارهای متغیر گرمایی کافی است.

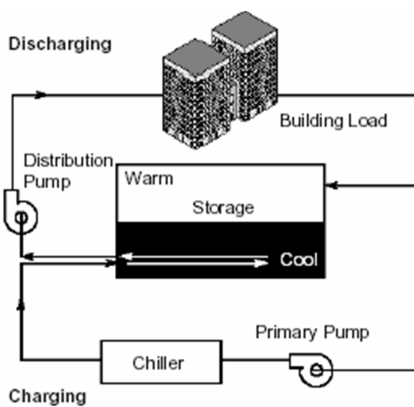
سال ۲۰۰۱ یک مدل رایانه ای ذخیره انرژی یخی توسط سی. چایچانا - دلبلیو. دلبلیو. اس. چارترز - ال. آیه [5] ارایه شد. نتایج نشان می‌دهد سیستم ذخیره ساز انرژی یخی می‌تواند تا ۵۵٪ از هزینه برق مورد نیاز برای خنک کنندگی در هر ماه در مقایسه با سیستم متعارف، صرفه جویی کند.

در سال ۲۰۰۷ یک مطالعه تجربی بر تشکیل یخ پیرامون لوله‌های طویل افقی توسط ا. حبیب الله بدر [6] انجام شد. مطالعه تجربی پیرامون نرخ رشد یخ در خارج از لوله های مسی سرد نشان می‌دهد، در طول مراحل اولیه فرآیند خنک سازی، جریان جابجایی طبیعی درون توده آب با توسعه یک لایه طبقه بندی شده در نزدیکی نقطه انجماد شناور بر روی آب متراکم در ۴ درجه سلسیوس ایجاد شده و سپس رفته رفته جابجایی طبیعی کاهش و نرخ رشد یخ افزایش می‌یابد. همچنین یخ زایی در نزدیکی طول ورودی شروع شده و در هر دو جهت محوری و شعاعی صورت می‌گیرد. اختلالات جریان داخلی خنک کننده و ایجاد چرخ های محلی درون خم هایی که باعث رشد یخ

حاصل از این تحقیق برای دستگاه با ابعاد واقعی نیز حاکم خواهد بود. شکل ۱ مدار ساخته شده برای آزمایش مخزن یخ در مقیاس آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. جهت تولید ۲۰ کیلوگرم آب صفر درجه از ۲۰ لیتر آب در دمای محیط در مدت ۸۰۰ ثانیه نیاز به توانی معادل ذیل است:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(\text{BTU/hr}) &= m(\text{lb/hr}) * C_p(\text{BTU/lb}^\circ\text{F}) * \Delta t(\text{F}) \\ T_1 &= 30^\circ\text{C} = 86^\circ\text{F} \\ T_2 &= 0^\circ\text{C} = 32^\circ\text{F} \\ \text{BTU/hr} &= (20/0.45)/(800/3600) * 1 * (86-32) = 10800 \end{aligned} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن تلفات معادل ۱۰٪ مطابق عدد ارایه شده توسط شرکت سازنده مخزن یخ اصلی، نیاز برودتی معادل ۱۲۰۰۰ BTU/hr می‌باشد.



شکل ۱- سیستم ذخیره سازی انرژی با یخ

با توجه به اینکه در کمپرسور  $\text{COP}=4$  (منطبق با اطلاعات مخزن یخ اصلی) می‌باشد و با توجه به رابطه :

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap.}}}{W_{\text{compressor}}} \quad (2)$$

توان کمپرسور حدود ۳۰۰۰ BTU/hr میشود.



شکل ۲- کمپرسور انتخابی مخزن یخ

در مرحله بعد انتخاب چگالنده بر اساس قدرت کمپرسور و بار برودتی معادل ۱۵۰۰۰ BTU/hr می‌شود و به کمک کاتالوگ قابل انتخاب میشود. (شکل ۳ و ۲)

می‌شوند ممکن است سبب بزرگ شدن قطر یخ جذب شده بر روی سطح خم لوله‌ها گردد.

در سال ۲۰۱۲ مقایسه نتایج واقعی با نتایج شبیه سازی مخزن یخ توسط ادل ام. دانلی [7] انجام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مخازن یخ سبب کاهش تقاضا در شبکه برق در زمان اوج مصرف می‌شوند فلذا اجازه می‌دهند که منابع بادی بیشتری به شبکه تولید و توزیع برق اضافه شود.

در سال ۲۰۱۴ کارآمدی انرژی سیستم های تهویه مطبوع با ذخیره ساز انرژی سرمایشی یخی توسط الساندرو بقی، لوکا سچیناتو، میکو رامپاتزو، فرانچسکو سمینی [8] مورد مطالعه قرار گرفت. در سیستمهای تهویه مطبوع با ظرفیت خنک کنندگی متوسط و بالا، مصرف و تقاضای انرژی را می‌توان با کمک سیستم های ذخیره انرژی گرمایی (TES) کنترل کرد که این موضوع می‌تواند هزینه های انرژی مصرفی، اندازه تجهیزات و انتشار آلاینده را کاهش دهد.

در سال ۲۰۱۵ ذخیره ساز انرژی گرمایی یخی (ITES) برای استفاده در سامانه تهویه مطبوع در حالت های عملیاتی بار کامل و جزئی توسط سپهر صناعی و محمد حکمتیان [9] مطالعه شد. در این تحقیق یک سیستم تهویه مطبوع مجهز به سیستم ذخیره ساز از نظر انرژی، انرژی، اقتصادی و محیط زیست در دو حالت عملیاتی بار کامل و جزئی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۶ ارزیابی ذخیره سازی انرژی گرمایی یخ برای ساختمان های تجاری در شهرهای برزیل توسط برونو آرکوری، کاتالینا اسپاتارو، مارک برت [10] انجام شد. در این تحقیق جنبه های اقتصادی ذخیره سازی انرژی گرمایی یخ (ITES) به عنوان یک فناوری که می‌تواند برای تغییر بار خنک کننده ساختمان به زمان غیر اوج استفاده شود، مورد مطالعه قرار گرفته است.

یکی از عوامل مهم در تعیین میزان ایجاد یخ در مخازن یخ، قطر لوله های مسی می‌باشد. با توجه به نبود کار تجربی مشابه در این زمینه، ساخت یک سیستم مخزن یخ در مقیاس کوچک انجام شد تا عملکرد سیستم طراحی شده بصورت تجربی اندازه گیری نماید. سیستم ذخیره سازی مورد بررسی از نوع استاتیک و غیرمستقیم است که تشکیل و ذوب کردن یخ بر روی سطح خارجی لوله انجام می‌پذیرد. انرژی سرمایشی مورد نیاز، به صورت یخ، ذخیره شده و در زمان نیاز استفاده می‌شود. سیستم مخزن یخ تحت شرایط واقعی عملیات آزمایش شده تا تاثیر قطر لوله مسی بر عملکرد آن بررسی شود.

در این تحقیق هدف بهینه سازی یک مرکز داده مخابراتی با کاربرد در صنایع نظامی استفاده است. در این مرکز داده با توجه به اینکه در اغلب ساعات شبانه روز در اوج بار است فقط روش جایجا نمودن اوج بار، کارایی زیادی ندارد لذا می‌بایستی دنبال روشی برای بالا بردن راندمان تجهیزات ذخیره ساز مورد نظر بود. در این تحقیق، تجهیزات نمونه در مقیاس آزمایشگاهی منطبق با مشخصات مخزن یخ اصلی، ساخته شده است و اثر قطر لوله بر عملکرد مخزن یخ مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مشخصات نمونه آزمایشگاهی سیستم ذخیره ساز

در نمونه آزمایشگاهی ساخته شده نوع پیچش کویل ها و روش ذخیره یخ با نمونه واقعی موجود در محل یکسان است و لذا نتایج



شکل ۴- کویل مسی محفظه مخزن یخ

و برای اجزای دستگاه ساخته شده شاسی فولادی در نظر گرفته شد و نهایتاً جانمایی تجهیزات بصورت زیر مطابق شکل ۵ بصورت زیر انجام شد:



شکل ۵- جانمایی اجزای مخزن یخ

سپس اقدام به شارژ مبرد و تست شد. مطابق شکل ۶ ترمومترها نصب و مطابق شکل ۷ و ۸ مراحل یخ زدگی اولیه آزمایش شد.



شکل ۳- چگالنده انتخابی مخزن یخ

جهت ساخت کویل تبخیرکن نیاز به سطح تماس بر اساس روابط زیر است. مقدار  $L$  معادل عدد ارایه شده توسط شرکت سازنده مخزن یخ اصلی در نظر گرفته شده است:

$$Q = UA(T_2 - T_1)$$

$$Q = 12000 \text{ BTU/hr}, U = 100 \text{ BTU/hr ft}^2 \quad (3)$$

$$T_2 = 32^\circ \text{ F}, T_1 = 86^\circ \text{ F}, A = 2.2 \text{ ft}^2$$

جدول ۱- مشخصات فنی لوله های مسی

Standard size, inches	Outside diameter		Internal diameter		Flow area	
	in	ft	in	ft	ft <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>
1/4	0.375	0.0254	0.305	0.00051	0.0734	
3/8	0.500	0.0335	0.402	0.00088	0.1267	
1/2	0.625	0.0439	0.527	0.00152	0.2189	
5/8	0.750	0.0543	0.652	0.00232	0.3341	
3/4	0.875	0.0621	0.745	0.00303	0.4363	
1	1.125	0.0829	0.995	0.00540	0.7776	
1 1/4	1.375	0.1038	1.246	0.00845	1.217	
1 1/2	1.625	0.1234	1.481	0.01196	1.722	
2	2.125	0.1633	1.960	0.02093	3.014	
2 1/2	2.625	0.2029	2.435	0.03234	4.657	
3	3.125	0.2423	2.908	0.04609	6.637	
3 1/2	3.625	0.2821	3.385	0.06249	8.999	
4	4.125	0.3214	3.857	0.08114	11.68	
5	5.125	0.4004	4.805	0.1259	18.13	
6	6.125	0.4784	5.741	0.1798	25.89	
8	8.125	0.6319	7.583	0.3136	45.16	

بنابراین با توجه به مشخصات فنی لوله های مسی مطابق جدول ۱ میتوان نوشت که در آن  $L$  بر حسب فوت میباشد:

$$L * 3.14 * (0.625/12) = 2.2$$

پس با قطر لوله 1/2 اینچ نیاز به 4/1 متر لوله میباشد.

بنابراین در مخزن گالوانیزه امکان کویل پیچی مسی در آن وجود دارد. (مطابق شکل ۴)



شکل ۱۰- مبادله کن آلومینیومی مخزن یخ



شکل ۱۱- منبع گرمایی مخزن یخ

نصب محفظه تست و پمپ و لوله کشی انجام شد مطابق شکل ۱۲ بصورتیکه قابلیت تغییر مسیر آب وجود داشته باشد.



شکل ۱۲- نمای کلی مخزن یخ

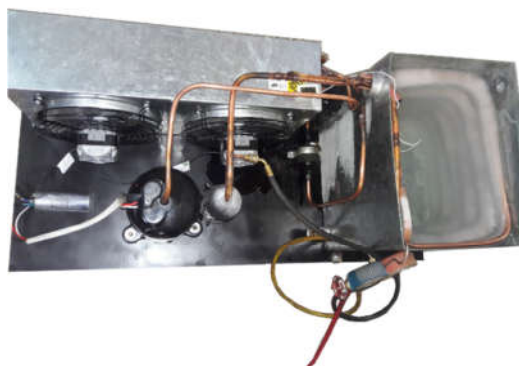
در ساخت تابلو برق از تجهیزات ایمن و حسگرهای دمای محفظه تست و مخزن گالوانیزه و کلید روشن و خاموش پمپ و کمپرسور مطابق شکل ۱۳ در نظر گرفته شد.



شکل ۱۳- نمای داخل و خارج تابلو برق مخزن یخ



شکل ۶- ترمومتر محفظه مخزن یخ



شکل ۷- یخ زدگی دور کویل محفظه مخزن یخ

تست عملکرد چرخه تبرید با موفقیت انجام شد.



شکل ۸- مراحل یخ زدگی دور کویل محفظه مخزن یخ

محفظه تست جهت تست به ابعاد ۵۰\*۵۰\*۵۰ که از یک سمت توسط شیشه جهت رویت پوشانده شده ساخته و داخل آن یک دستگاه کویل به همراه فن و یک لامپ به عنوان منبع تولید گرما و حسگر دما نصب گردید. (مطابق شکل ۹)



شکل ۹- محفظه منبع گرمایی مخزن یخ

تجهیزات مربوط به محفظه تست شامل یک رادیاتور و لامپ تونلی مطابق شکل ۱۰ و ۱۱ در نظر گرفته شده است.

در تست ها قابلیت استفاده از کیسه تولید یخ حول کویل ها مطابق شکل ۱۴ امکان پذیر است.



شکل ۱۴- کیسه های محتوی آب جهت یخ زدن در مخزن یخ

و برای حمل و جابجایی دستگاه زیر شاسی مطابق شکل ۱۵ نصب چرخ انجام شد.



شکل ۱۵- نمای آماده حمل مخزن یخ

$$\dot{Q}(BTU/hr) = \dot{m}(lb/hr) * C_p(BTU/lb \cdot F) * \Delta T(F) \quad (4)$$

$$\frac{10}{0.45} \div \frac{8}{60} \times 1 \times (30 - (-8)) \times 1.8 = 11400 \frac{BTU}{hr}$$

لذا ظرفیت چرخه تبرید معادل  $\frac{BTU}{hr}$  ۱۱۴۰۰ می باشد

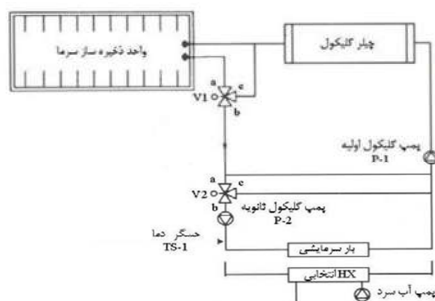
$$\dot{Q}(w) = \dot{m}(kg/sec) C_p(j/kg \cdot c) \Delta T(c) \quad (5)$$

$$\frac{10}{8 \times 60} \times 4180 \times (30 - (-8)) = 3310w$$

$$1w \times \frac{0.86 \frac{kcal}{hr}}{1w} \times \frac{1BTU}{0.252 \text{ kcal}} = 3.41 \frac{BTU}{hr}$$

جدول ۲- مشخصات دستگاه

ردیف	مشخصات چرخه تبرید	مقدار
۱	COP	4
۲	Wcomp.	1hp
۳	Qevap.	11400BTU/hr
۴	مایع واسط	آب با اتیلن گلیکول (ضد یخ) ۱۰٪
۵	مبرد	R407C



شکل ۱۶- طرحواره سیستم ذخیره سازی

نتایج تغییرات دما بر حسب زمان در جدول ۳ و شکل ۱۷ نشان داده شده است.

جدول ۳- تغییرات دما بر حسب زمان شرایط اولیه

t(min)	T(°C)
0	30
1	25
2	21
3	16
4	11
5	6
6	2
7	-3
8	-8
9	-8
10	-8

در هنگام تعیین ظرفیت واقعی سیستم از اتیلن گلیکول ۱۰٪ استفاده شده است. چرخه تبرید مورد استفاده در این آزمایش بایستی تعیین ظرفیت واقعی شود لذا ابتدا برای اندازه گیری ظرفیت این چرخه تبرید که در آن تجهیزات انتخابی به گونه ای بوده است که ظرفیت حدود یک تن تبرید بدست بیاید ولی برای آنکه خطای اندازه گیری کاهش پیدا کند و نهایتاً میزان ظرفیت ورودی به مخزن یخ مشخص گردد آزمایش به اینصورت چندین بار انجام شد مطابق مشخصات جدول ۲ و شکل ۱۶:

۱۰ لیتر آب با اتیلن گلیکول (ضد یخ) ۱۰٪ مخلوط و داخل مخزن یخ چرخانده شد و زمان شروع یخ سازی اندازه گیری شد که میانگین اعداد بدست آمده ۸ دقیقه برای رسیدن به دمای  $-8^{\circ}C$  بود لذا :

### ۲-۳- نتایج آزمایش برای قطر لوله " ۳/۸"

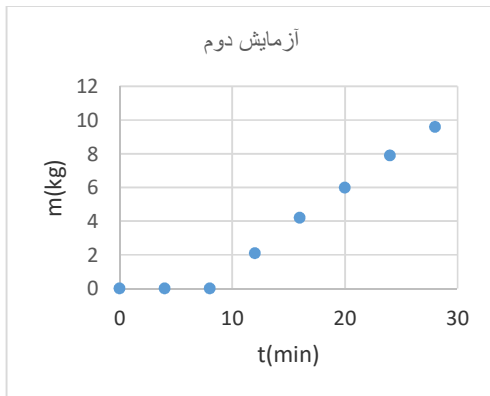
در آزمایش بعدی در داخل مخزن یخ لوله با قطر " ۳/۸" استفاده شد که قطر خارجی آن ۰/۵ اینچ می باشد و قطر داخلی آن ۰/۴۰۲ اینچ می باشد که در صورتیکه سطح گرمایی معادل با قطر " ۱/۲" در نظر گرفته شود طول لوله معادل:

$$L = 3 \times \left(\frac{0.625}{0.5}\right)^2 = 4.69 \text{ m} \quad (۶)$$

می شود که باز هم با قطر ۳۰ سانتیمتر در داخل مخزن فنر میشود که گام پیچش لوله حداکثر باشد. سرعت یخ سازی در جدول ۵ و شکل ۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۵- تغییرات جرم یخ بر حسب زمان با لوله مسی با قطر " ۳/۸"

t(min)	m(kg)
0	0
4	0
8	0
12	2.1
16	4.2
20	6
24	7.9
28	9.6



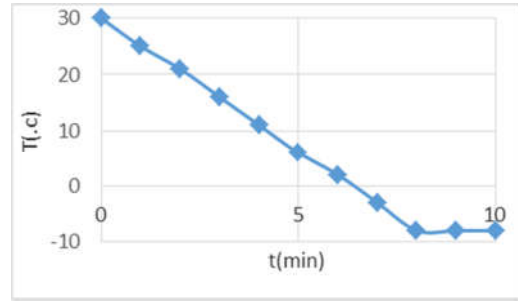
شکل ۱۹- تغییرات جرم یخ بر حسب زمان با لوله مسی با قطر " ۳/۸"

### ۳-۳- نتایج آزمایش برای قطر لوله " ۱/۴"

در آزمایش بعد در داخل مخزن یخ لوله با قطر " ۱/۴" استفاده شد که قطر خارجی آن ۰/۳۷۵ اینچ می باشد و قطر داخلی آن ۰/۳۰۵ اینچ می باشد که در صورتی که سطح گرمایی معادل با قطر لوله " ۱/۲" در نظر گرفته شود طول لوله معادل:

$$L = 3 \times \left(\frac{0.625}{0.375}\right)^2 = 8.34 \text{ m} \quad (۷)$$

می شود که باز هم با قطر ۳۰ سانتیمتر در داخل مخزن فنر می شود که گام پیچش لوله حداکثر باشد و سرعت یخ سازی روی لوله در جدول ۶ و شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۷- تغییرات دما بر حسب زمان شرایط اولیه

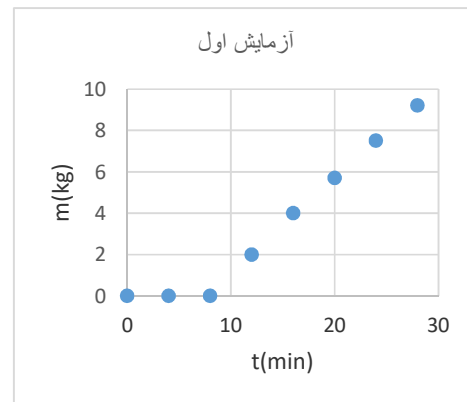
### ۳- نتایج و آزمایشات:

#### ۳-۱- نتایج آزمایش برای قطر لوله " ۱/۲"

در آزمایش اول ۳ متر لوله مسی با قطر " ۱/۲" استفاده شده است که قطر خارجی آن ۰/۶۲۵ اینچ و قطر داخلی آن ۰/۵۲۷ اینچ می باشد و در داخل مخزن یخ ۲۰ لیتر آب استفاده شده است. این لوله با قطر ۳۰ سانتیمتر و گام پیچش ۵ سانتیمتر داخل مخزن فنر شده است. با راه اندازی چرخه تبرید نتایج به صورت زیر تکرار شد:

جدول ۴- تغییرات جرم یخ بر حسب زمان با کویل مسی با قطر " ۱/۲"

t(min)	m(kg)
0	0
4	0
8	0
12	2
16	4
20	5.7
24	7.5
28	9.2

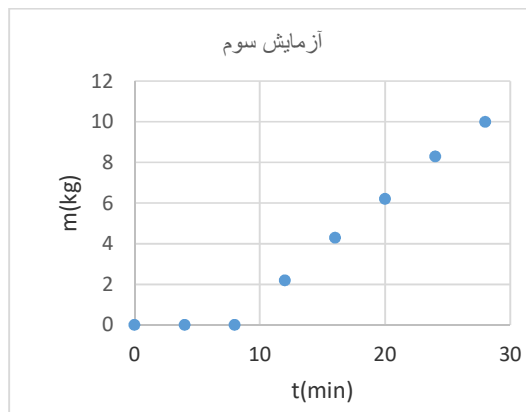


شکل ۱۸- تغییرات جرم یخ بر حسب زمان با لوله مسی با قطر " ۱/۲"

در این شرایط سرعت یخ سازی در جدول ۴ و شکل ۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۶- تغییرات جرم یخ بر حسب زمان با لوله مسی با قطر  $\frac{1}{4}$ "

t(min)	m(kg)
0	0
4	0
8	0
12	2.2
16	4.3
20	6.2
24	8.3
28	10



شکل ۲۰- تغییرات جرم یخ بر حسب زمان با لوله مسی با قطر  $\frac{1}{4}$ "

همچنین با تغییر قطر لوله از سه هشتم اینچ به یک چهارم اینچ در زمان برابر میزان یخ زدگی از  $9/6$  کیلوگرم به  $10$  کیلوگرم میرسد و درصد بهینه سازی تولید یخ بر اساس میزان جرم یخ تولیدی قابل تعریف است که  $m_2$  جرم یخ برای قطر لوله سه هشتم اینچ و  $m_3$  جرم یخ برای قطر لوله یک هشتم اینچ میباشد:

$$\eta_2 = \frac{m_2}{m_3} = \frac{9.6}{10} * 100 = 96\% \quad (9)$$

#### ۴- نتیجه گیری

هدف بهینه سازی یک مرکز داده مخابراتی با کاربرد در صنایع نظامی بود که با توجه کارکرد پیوسته این مرکز داده در اغلب ساعات شبانه روز در اوج بار روش جایگزین نمودن اوج بار کارایی مناسب ندارد لذا روشی برای بالا بردن راندمان تجهیزات ذخیره ساز استفاده شد. تجهیزات نمونه در مقیاس آزمایشگاهی منطبق با مشخصات مخزن یخ اصلی، ساخته شد و اثر قطر لوله بر عملکرد مخزن یخ مورد بررسی قرار گرفت.

از مقایسه نتایج بدست آمده با توجه به تکرار پذیری بسیار بالا میتوان ضمن تایید تکرارپذیری آزمایشات گفت هر چه قطر لوله ها کمتر شود در سطح گرمایی برابر میزان انتقال گرمای بالاتر میرود و سرعت تشکیل یخ  $4\%$  به ازای کم کردن هر یک اندازه قطر لوله مسی بیشتر میشود. با توجه با تطبیق نمونه با مراکز داده واقعی و اصلی میتوان از این نتایج در آنجا بهره برداری نمود.

#### ۵- سپاسگزاری

از اساتید گرانقدر دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب و دانشگاه مالک اشتر بابت ارایه طریق و کمک هایشان تشکر و قدردانی میشود.

#### ۶- نمادها

T	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
L	طول لوله معادل کویل (m)
m	جرم یخ (kg)
$\eta$	راندمان تولید یخ
TES	ذخیره سازی انرژی گرمایی
ITES	ذخیره سازی انرژی گرمایی یخی

#### ۷- مراجع

- [1] Finer S. I., Cleland A. C., Lovatt S. J., Simple mathematical model for predicting the transient behavior of an ice-bank system., Int. J Refrigeration 16 (5), 312-320, P. 9.,1993.
- [2] Lee A. H. W., Jones J. W., Modelling of an ice-on-coil thermal energy storage system, Energy Convers. Mgmt, Vol. 37, pp. 1493-1507, 1996a.
- [3] Lee A. H. W., Jones J. W., Laboratory performance of an ice-on-coil thermal-energy storage system for residential and light commercial application, Energy, Page 130-115, 1996b.
- [4] Lopez A., Lacarra, G, Mathematical modelling of thermal storage systems for food industry, Int. J. Refrigeration, 22, 1999.
- [5] Chaichana C., Charters W. W. S, Aye, L., An ice thermal storage system computer model, Appl. Therm. Eng., 2001.

#### ۳-۴- تفسیر نتایج

یکی از عوامل موثر بر کارایی مخازن یخ، قطر لوله های کویل یخساز است که تاثیر قابل توجهی بر کاهش برق مصرف سیستم خواهد داشت. لازم به ذکر است روشهایی نظیر تغییر ساعت اوج مصرف سعی دارد با استفاده از مخزن یخ تولید برودت را به ساعات کم مصرف که قیمت برق ارزانتر است انتقال دهد مد نظر تحقیق حاضر نمیباشد و علت این موضوع کارکرد پیوسته مخزن یخ مورد مطالعه میباشد که میبایستی به دنبال روشی غیر از روشهای متداول در جهت کاهش قیمت مصرف برق بود [۱۱]. در این تحقیق با توجه مشخصات مخزن یخ یک مرکز داده مخابراتی وابسته به صنایع نظامی که مصرف بالا و پیوسته دارد، یک نمونه آزمایشگاهی ساخته شد. شاخص درصد بهینه سازی تولید یخ بر اساس میزان جرم یخ تولیدی تعریف شد.

مشاهده شد هر چه یخ تشکیل می شود از سرعت ایجاد یخ کم میشود یعنی هر چه مقدار یخ زیاد تر می شود انتقال گرمای کمتر میشود. در ضمن شرایط دمایی یخ زدن با نتایج کلی مقاله بوریس هالاس نیز همخوانی دارد. [12]

با تغییر قطر لوله از یک دوم اینچ به سه هشتم اینچ در زمان برابر میزان یخ زدگی از  $9/2$  کیلوگرم به  $9/6$  کیلوگرم میرسد و درصد بهینه سازی تولید یخ را بر اساس میزان جرم یخ تولیدی بصورت زیر میتوان تعریف نمود که  $m_1$  جرم یخ برای قطر لوله یک دوم اینچ و  $m_2$  جرم یخ برای قطر لوله سه هشتم اینچ میباشد:

$$\eta_1 = \frac{m_1}{m_2} = \frac{9.2}{9.6} * 100 = 96\% \quad (8)$$



[6] Habeebullah, Badr A., An experimental study on ice formation around horizontal long tubes, *Int. J. Refrigeration*, J30, 2007.

[7] Donnelly Edel M., Comparison of Ice-Bank Actual Results Against Simulated Predicted Results in Carroll Refurbishment Project DKIT SDAR *Journal of Sustainable Design, Applied Research*, J1, 2012.

[8] Beghi Alessandro, Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes, *Journal of Process Control*, 2014.

[9] Sanaye Sepehr, Hekmatian Mohammad, *International Journal of Refrigeration*, 2015.

[10] Arcuri Bruno, Spataru Catalina, Barrett Mark, Evaluation of Ice Thermal Energy Storage (ITES) for commercial buildings in cities in Brazil, 2016.

[۱۱] عابدپور کاریزی م. و میری م.، استفاده از سیستم بانک یخ با رویکرد کاهش پیک مصرف انرژی در ساختمان، چهارمین همایش ملی کاربرد فناوری های نوین در علوم مهندسی، تربت حیدریه، دانشگاه تربت حیدریه، ۱۳۹۵.

[12] Halasz B., Grozdek M., Soldo V., Development of computer program for simulation of ice-bank system operation, part I: mathematical modelling, *Int. J. Refrigeration Vol. 32 (Issue 6)*, 1323e1335, 2009.