

## بررسی عملکرد پمپ‌های گرمایی هیدرید فلزی دارای کمپرسور (CDMHHP) با استفاده از شبیه‌سازی عددی

سیدمحسن حسینی  
 رضا علیزاده\*  
 حسین تارقلی‌زاده

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
 دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
 استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### چکیده

هیدریدهای فلزی به دلیل واکنش گرم‌زا و گرم‌گیر با هیدروژن می‌توانند به منظور سرمایش و یا گرمایش محیط مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق توانایی سردسازی پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی دارای کمپرسور (CDMHHP) برای اولین بار با استفاده از یک مدل دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات گذشته بر روی CDMHHP ها تنها با استفاده از مدل یک بعدی صورت گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی در دسترس مورد مقایسه قرار گرفت و توافق خوبی بین آن‌ها مشاهده شد. سپس تأثیر نوع کمپرسور و آلیاژ جاذب هیدروژن بر عملکرد پمپ گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بازدهی دستگاه به طور قابل توجهی به عملکرد کمپرسور وابسته بوده و استفاده از کمپرسور دو مرحله‌ای در مقایسه با کمپرسور یک مرحله‌ای می‌تواند عملکرد دستگاه را بهبود بخشد. همچنین استفاده از دو نوع آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  و  $\text{C5}$  نشان داد که در شرایط عملیاتی یکسان، آلیاژ  $\text{C5}$  توان سردسازی بیشتری نسبت به  $\text{LaNi}_5$  دارد که این نیازمند صرف هزینه بیشتر نیز می‌باشد. در هنگامی که توان مصرفی دستگاه برای هر دو آلیاژ یکسان بود، پمپ گرمایی دارای آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  با استفاده از یک کمپرسور سه برابر بزرگ‌تر توانست توان سردسازی معادل با پمپ گرمایی حاوی آلیاژ  $\text{C5}$  حاصل کند.

**کلمات کلیدی:** پمپ گرمایی، هیدرید فلزی، شبیه‌سازی، حجم محدود.

## Investigation of Compressor Driven Metal Hydride Heat Pumps (CDMHHP) Using Numerical Simulation

S. M. Hosseini  
 R. Alizadeh  
 H. Targholizadeh

Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran  
 Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran  
 Department of Physics, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Metal hydrides can be used for ambient cooling and heating because of their exothermic and endothermic reaction with hydrogen. This is the first attempt to investigate the cooling capacity of compressor driven metal hydride heat pumps (CDMHHP) using a two-dimensional model. In the last studies, only one-dimensional models have been used for studying the application of CDMHHPs. The simulation results have been compared with experimental results and a good agreement have been observed between them. Then the effect of compressor type and hydrogen adsorbent on the performance of heat pump have been investigated. The results show that the device efficiency significantly depends on compressor performance and using the two-stage compressor can improve the device performance compared with one-stage compressor. Also the use of  $\text{LaNi}_5$  and  $\text{C5}$  alloys showed more cooling power in  $\text{C5}$  alloy in the same operating condition whereas it takes more cost. Since the power consumption was equal to both alloys, the heat pump containing  $\text{LaNi}_5$  alloy with tree times larger compressor could generate the same cooling power provided by  $\text{C5}$  alloy.

**Keywords:** Heat pump, Metal hydride, Simulation, Finite volume.

### ۱- مقدمه

بوده و واجذب آن واکنشی گرم‌گیر است. از این‌رو این دو راکتور می‌توانند جایگزینی برای چگالنده و تبخیرکننده در تجهیزات تهویه مطبوع متداول باشند [۱].

عملکرد پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی ( $\text{MHHP}^1$ ) با هدف سردسازی در شکل ۱ نشان داده شده است. این نوع تجهیزات از دو نوع راکتور هیدرید فلزی تشکیل می‌شوند که یکی راکتور دما بالا ( $\text{M}_1\text{H}_x$ ) و دیگری دما پایین ( $\text{M}_2\text{H}_y$ ) است. هر راکتور حاوی یک بستر متخلخل از آلیاژی است که در اثر واکنش با هیدروژن تشکیل هیدرید فلزی می‌دهد. راکتور دما بالا حاوی آلیاژ جاذبی است که برای واجذب

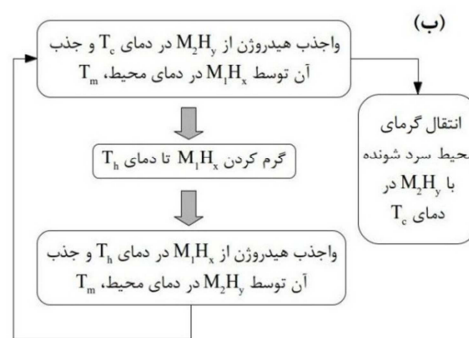
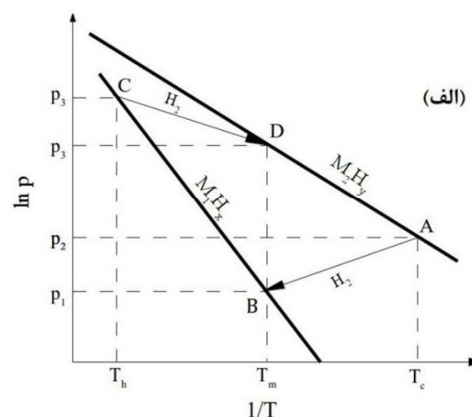
امروزه با پیشرفت روز افزون تکنولوژی، دستگاه‌های گرم و سردسازی نیز با توسعه سریعی همراه هستند. بهبود بازده انرژی و کاهش اتلاف آن و استفاده از سیستم‌های سازگار با محیط زیست از جمله اهداف این صنعت است. در این راستا تجهیزات گرم و سردسازی بر پایه هیدریدهای فلزی نیز مورد توجه بوده و در صورت کاربردی شدن می‌توانند پلی در جهت رسیدن به این اهداف باشند. این نوع تجهیزات مشابه با سیستم‌های جذب جامد عمل کرده و محیط مورد نظر با استفاده از گرمای فرآیندهای جذب و واجذب هیدروژن گرم و سرد می‌شود. جذب هیدروژن در هیدریدهای فلزی با واکنش گرم‌زا همراه

<sup>1</sup> Metal Hydride Heat Pump

سیس آن را با تحقیقات آزمایشگاهی ادامه دادند [۵]. راکتورهای آن‌ها لوله‌هایی از جنس مس بود که برای تقویت انتقال گرما شامل پره‌های خارجی بودند. در تحقیق این گروه واجذب تحت خلأ انجام شد و جذب از یک مخزن فشار بالای هیدروژن صورت گرفت. از این‌رو شدت جذب و واجذب به دست آمده بزرگ‌تر از مقادیر واقعی در راکتورهای به هم متصل بود. پارک و همکاران [۶] یک CDMHHP با استفاده از آلیاژ  $Zr_{0.9}Ti_{0.1}Cr_{0.55}Fe_{1.45}$  را مورد بررسی قرار دادند. در کار این گروه، کمپرسور در فشار بین ۱ و ۱۸ (bar) کار می‌کرد. راکتور آن‌ها دارای پره‌های خارجی بود و آن‌ها توانستند توان سردسازی این راکتور را با افزایش شدت جریان هوا از ۸ به ۱۱ ( $m^3/min$ )، در حدود ۲۵٪ افزایش دهند. مزومدر و همکاران [۸] یک مدل ریاضی یک بعدی همراه با جزئیات برای شبیه‌سازی این نوع تجهیزات ارائه کردند. در مدل آن‌ها از تغییرات دمای راکتورها در جهت طول راکتور صرف نظر شده و تنها تغییرات در جهت شعاع محاسبه شد. نتایج این گروه نشان داد که خواص هیدرید فلزی و استفاده از پره برای تقویت انتقال گرما، تأثیر به‌سزایی بر کارایی این نوع پمپ‌های گرمایی دارد و کاهش اتلافات گرمایی در سیکل‌های پمپ گرمایی می‌تواند عمل‌کرد این دستگاه را بهبود بخشد. بدیک و همکاران [۹] با در نظر گرفتن دمای یکنواخت در داخل راکتورها، مدلی را برای CDMHHP ها ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که افت دمایی در راکتورها تأثیر قابل توجهی بر عمل‌کرد این نوع پمپ‌های گرمایی داشته و برای بهبود کارایی این نوع دستگاه‌ها به مبدل حرارتی با طراحی بهینه نیاز خواهد بود. همچنین این گروه نشان دادند که کارایی این نوع پمپ گرمایی تحت تأثیر عملکرد کمپرسور می‌باشد. علاوه بر این نتایج این گروه نشان داد که در دماهای یکسان برای استخراج گرما از این نوع پمپ‌ها و سیستم‌های تجاری فشرده‌سازی بخار، COP پمپ‌های گرمایی کمپرسور محور هیدرید فلزی کمتر بوده و در صورت بهینه کردن سیکل‌های گرمایی در این نوع تجهیزات می‌توان به COP قابل رقابت با سیستم‌های تجاری رسید. مگنتو و همکاران [۱۰] یک CDMHHP با هدف استفاده در صنعت اتومبیل طراحی کردند. برای فراهم کردن انتقال گرما مورد نیاز جذب و واجذب سریع هیدروژن، آن‌ها طرحی ویژه انتخاب کردند که از راکتورهای به هم متصل با قطر کوچک (۳/۱۷۵ میلی‌متر) تشکیل می‌شد.

تحقیقات اندکی در زمینه CDMHHP ها صورت گرفته است و این نوع تجهیزات به دلیل هزینه زیاد هنوز نتوانسته‌اند جای خود را در بین تجهیزات خنک کننده در مقیاس صنعتی باز کنند. ویژگی اصلی این نوع از پمپ‌های گرمایی دوستی با محیط زیست است که در صورت بهینه سازی و صنعتی شدن می‌تواند به طور قابل توجهی به مبارزه با آلودگی محیط زیست کمک کند. در مطالعه حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عددی سعی در بهبود عملکرد این نوع تجهیزات شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده برای این نوع از پمپ‌های گرمایی (CDMHHP) بر پایه مدل یک بعدی بوده و شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های دو بعدی برای بررسی دقیق‌تر صورت نگرفته است. در این تحقیق به بررسی کارایی CDMHHP ها با استفاده از یک مدل ریاضی دو بعدی پرداخته می‌شود. با استفاده از مدل مورد حاضر، کارایی پمپ گرمایی حاوی آلیاژ  $Ti_{0.95}Zr_{0.05}Mn_{1.48}V_{0.43}Fe_{0.08}Al_{0.01}$  برای اولین

هیدروژن به دمای بالاتری نسبت به راکتور دما پایین نیاز دارد. در این حالت اختلاف بین فشار تعادلی دو راکتور باعث جریان هیدروژن از یکی به دیگری می‌شود. شکل ۱-ب مراحل عملکرد پمپ گرمایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، در زمان واجذب هیدروژن از راکتور دما پایین، محیط مورد نظر با این راکتور شروع به انتقال گرما کرده و سرد می‌شود [۲]. مراحل عملکرد دیگری نیز برای بهبود در کارایی MHHP ها ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به سیکل متقاطع ون هوف<sup>۱</sup> اشاره کرد. در این روش خطوط BC و AD در شکل ۱-الف متقاطع بوده و می‌توان از گرمای حاصل از جذب هیدروژن در یک راکتور، برای گرم کردن راکتور دیگر استفاده کرد. از این‌رو پمپ گرمایی ضریب عملکرد<sup>۲</sup> ( $COP^2$ ) بیشتری خواهد داشت [۲]. موتوکومار و ساتیش [۳] با استفاده از روش ون هوف متقاطع و راکتورهای حاوی چهار نوع آلیاژ متفاوت، شرایط بهینه‌ای را برای این نوع پمپ‌های گرمایی معرفی کردند و نشان دادند که با استفاده از روش ون هوف متقاطع می‌توان COP را نسبت به روش‌های معمول در گذشته به مقدار ۶۰٪ افزایش داد.



شکل ۱- نمودار عملکرد یک MHHP [۲]

کارایی یک MHHP می‌تواند با به کار بردن یک کمپرسور به جای آلیاژ دما بالا بهبود یابد. در این حالت از دو راکتور با آلیاژهای مشابه استفاده می‌شود و در بین آن‌ها یک کمپرسور قرار می‌گیرد که باعث جریان هیدروژن بین این دو راکتور می‌گردد. کیم و همکاران [۴ و ۵] و پارک و همکاران [۶ و ۷] اولین قدم‌ها را برای توسعه چنین سیستم‌هایی برداشتند. آن‌ها کار خود را ابتدا با بررسی تحلیلی [۴] آغاز کردند و

<sup>3</sup> Compressor Driven Metal Hydride Heat Pump  
<sup>4</sup> Fin

<sup>1</sup> Crossed van't Hoff  
<sup>2</sup> Coefficient of performance

راکتور هیدروژن را واجذب و ۳۰ راکتور دیگر هیدروژن واجذب شده را جذب می‌کنند. به دلیل شرایط مشابه در هر یک از ۳۰ راکتور، برای شبیه‌سازی تنها یک راکتور به عنوان واجذب کننده هیدروژن و یک راکتور به عنوان جذب کننده هیدروژن در نظر گرفته شده است. آرایش راکتورها مثلثی بوده و بر این اساس فرض شده است که حجم مشخصی از هوای عبوری از روی هر راکتور تنها در حال انتقال گرما با همان راکتور بوده و با راکتورهای دیگر انتقال گرما ندارد. نحوه آرایش راکتورها و سطح مقطع انتخاب شده برای هوای عبوری از روی هر راکتور در شکل ۳ نشان داده شده است.

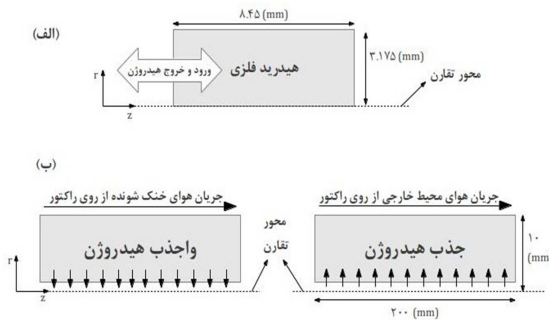
از مقاومت انتقال گرما فلز بدنه‌ی راکتور به دلیل رسانایی گرمایی بالای مس و یا فولاد که معمولاً بدنه راکتور از آن‌ها ساخته می‌شود، صرف نظر شد و از این‌رو جداری خارجی راکتور در هندسه مسئله در نظر گرفته نشده است.

### ۲-۳- معادلات انتقال جرم و گرما

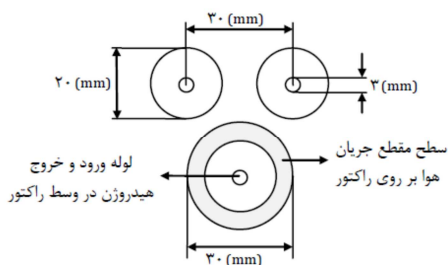
برای مدل‌سازی انتقال هیدروژن از فاز جامد به گاز (واجذب) و یا فاز گاز به جامد (جذب) می‌توان از معادله پیوستگی استفاده کرد. معادله پیوستگی برای فاز گاز عبارت است از:

$$\epsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \rho_g) = -\dot{X} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $\dot{X}$  شدت واکنش جذب یا واجذب هیدروژن،  $\rho_g$  چگالی هیدروژن،  $\vec{U}$  بردار سرعت گاز و  $\epsilon$  تخلخل می‌باشد. در این معادله می‌توان سرعت فاز گاز را با استفاده از قانون داریسی<sup>۱</sup> که برای محیط‌های متخلخل صادق است بر حسب فشار جایگزین کرد. معادله مومنوم با استفاده از قانون داریسی به صورت معادله (۳) می‌باشد.



شکل ۲- هندسه های استفاده شده در شبیه‌سازی



شکل ۳- نحوه چیدمان راکتورها و انتخاب سطح مقطع عبور هوا از روی هر راکتور

بار در این نوع تجهیزات مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل با نتایج یک آلیاژ فشار پایین مقایسه شده است. همچنین عملکرد یک کمپرسور دو مرحله‌ای برای پمپ‌های گرمایی هیدرید فلزی بررسی شده و نتایج با نتایج حاصل از کمپرسور یک مرحله‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است.

### ۲-مدل‌سازی فرآیند

در این قسمت معادله‌های استفاده شده برای شبیه‌سازی پدیده‌های انتقال جرم و گرما در راکتورهای هیدرید فلزی ارائه می‌شود. این راکتورها شامل محیطی متخلخل بوده که گاز هیدروژن در آن جریان یافته و با فاز جامد وارد واکنش می‌شود. این واکنش را می‌توان به صورت معادله (۱) نوشت [۱۱].



همان‌طور که شرح داده شد از دو فرآیند جذب و واجذب هیدروژن در راکتورهای هیدرید فلزی می‌توان برای سرد یا گرم سازی محیط استفاده کرد. در این تحقیق عملکرد پمپ‌های گرمایی هیدرید فلزی با هدف سردسازی محیط مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا انتقال گرما و انتقال جرم در بستری هیدرید فلزی با استفاده از مدل ارائه شده توسط جمینی و بن نصرالله [۱۲] و [۱۳] برای جذب و واجذب هیدروژن مدل‌سازی شده است.

### ۲-۱- فرضیات

فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی مسئله عبارتند از:

۱. به دلیل شکل استوانه‌ای راکتورهای هیدرید فلزی، از فرض تقارن محوری استفاده گردید و محاسبات در دو بعد انجام شد.
۲. دمای فاز گاز و جامد در محیط متخلخل یکسان فرض شد.
۳. ضریب رسانایی گرمایی، ظرفیت گرمایی و لزجت سینماتیکی ثابت در نظر گرفته شد.
۴. با توجه به نزدیک بودن رفتار گاز هیدروژن به گاز ایده‌آل، از فرض گاز ایده‌آل برای مدل‌سازی رفتار ترمودینامیکی آن استفاده شد.
۵. از اصطکاک و انتقال گرما با محیط در کمپرسور صرف نظر شد.

### ۲-۲- هندسه مسئله

همان‌طور که اشاره شد با استفاده از فرض تقارن محوری، هندسه مسئله به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است. شکل ۲-الف هندسه‌های مورد استفاده در مرحله اول شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این هندسه به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و اثبات توانایی مدل استفاده شده است و ابعاد آن مطابق با راکتور استفاده شده در کار لارنسل و گایت [۱۴] می‌باشد. البته طول راکتور آزمایشگاهی استفاده شده در کار لارنسل و گایت بیشتر بوده و برای شبیه‌سازی تنها طولی از راکتور که توسط هیدرید فلزی اشغال می‌شود در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی پمپ‌های گرمایی از هندسه شکل ۲-ب استفاده شد. پمپ گرمایی در نظر گرفته شده شامل ۶۰ عدد راکتور با ابعاد نشان داده شده در شکل ۲-ب است که در هر مرحله ۳۰

<sup>1</sup> Darcy

در معادله‌های (۱۱) و (۱۲)  $\omega_H$  نسبت جرمی هیدروژن به هیدرید فلزی است و توسط معادله (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\omega_H = \frac{(\rho_s - \rho_{emp})}{\rho_s} \quad (13)$$

در این تحقیق با توجه به جریان هوا از روی راکتورها در راستای طول هر راکتور (شکل ۲-ب) و تغییر دمای هوا در طول هر راکتور، تغییرات دمایی در راستای طول و شعاع راکتور قابل توجه بوده و از اینرو از یک مدل دو بعدی استفاده شده است. برای بدست آوردن توزیع دما در راکتور هیدرید فلزی از قانون بقا انرژی استفاده شد و با فرض یکسان بودن دمای فاز جامد و گاز در هر لحظه، معادله انرژی نوشته شد. این معادله برای محیط متخلخل عبارت است از:

$$(\rho C_p)_e \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_g \vec{U} \cdot \nabla T = \lambda_e \nabla^2 T + \dot{X} (\Delta H - T(C_{pg} - C_{ps})) \quad (14)$$

در معادله (۱۴) پارامترهایی که با زیرنویس e نمایش داده شده‌اند توسط معادله‌های (۱۵) و (۱۶) برای بستر متخلخل محاسبه شدند.

$$(\rho C_p)_e = \varepsilon \rho_g C_{pg} + (1 - \varepsilon) \rho_s C_{ps} \quad (15)$$

$$\lambda_e = \varepsilon \lambda_g + (1 - \varepsilon) \lambda_s \quad (16)$$

$\lambda$  رسانایی گرمایی است. جدول ۱ مقادیر خواص فیزیکی استفاده شده در محاسبات را نشان می‌دهد.

## ۲-۴- شرایط اولیه و مرزی

با توجه به اینکه معادله‌های حاکم بر مسئله تابع زمان و مکان بوده و شامل مشتقات جزئی هستند، برای حل آن‌ها نیاز به شرایط اولیه و مرزی خواهد بود. در لحظه‌ی شروع فرآیندهای جذب و وا جذب هیدروژن، در تمامی محاسباتها و برای هر دو راکتور شرایط تعادلی در نظر گرفته شد. شرایط اولیه برای هر دو راکتور عبارتند از:

$$p(0, r, z) = p_{eq}, T(0, r, z) = T_0, \rho_s(0, r, z) = \rho_{s0} \quad (17)$$

تغییر فشار در دیواره‌های راکتور برابر با صفر در نظر گرفته شد. معادله‌های (۱۸) تا (۲۰) شرایط مرزی فشار در دیواره‌ها را نشان می‌دهند.

$$\frac{\partial}{\partial r} p(t, R, z) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} p(t, r, Z) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} p(t, r, 0) = 0 \quad (20)$$

شرایط در خروجی راکتورها توسط عملکرد کمپرسور تعیین می‌شود. از این‌رو در این قسمت لازم است که کارایی کمپرسور برای پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی مورد بررسی قرار گیرد. فشار راکتورهای جذب کننده هیدروژن بیشتر از راکتورهای وا جذب کننده است. از این‌رو همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، در پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی به منظور ایجاد جریان پیوسته هیدروژن از راکتورهای وا جذب کننده به راکتورهای جذب کننده از کمپرسور استفاده می‌شود. هیدروژن پس از وا جذب از راکتور وارد کمپرسور شده و فشار آن تا فشار بالاتر از راکتور جذب کننده افزایش می‌یابد و سپس وارد راکتور جذب کننده می‌شود. در این نوع تجهیزات معمولاً از کمپرسورهای رفت و برگشتی استفاده می‌شود. با فرض فرآیند پلی-تروپیک برگشت‌پذیر (ثابت  $(pv)^{\gamma} = \text{ثابت}$ ) در داخل کمپرسور و با استفاده از

$$\vec{U} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (3)$$

$\kappa$  نفوذ پذیری<sup>۱</sup> در محیط متخلخل است. در معادله (۲) چگالی فاز گاز را نیز می‌توان با استفاده از معادله گاز ایده‌آل بر حسب فشار و دما جایگزین کرد. معادله چگالی فاز گاز عبارت است از:

$$\rho_g = \frac{M_g p}{R_g T} \quad (4)$$

با جایگذاری معادله‌های (۳) و (۴) در معادله (۲) معادله پیوستگی بر حسب فشار و دما حاصل می‌شود. رابطه (۵) معادله پیوستگی را در این حالت نشان می‌دهد.

$$\frac{\varepsilon M_g}{R_g T} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\varepsilon M_g p}{R_g} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{T} \right) = \frac{\kappa}{v_g} \nabla^2 p - \dot{X} \quad (5)$$

در معادله (۵) با افزایش و یا کاهش دما لزجت و چگالی به صورت وارون یکدیگر تغییر می‌کنند. از این‌رو لزجت ایستایی فاز گاز،  $v_g$  تغییر چندانی نداشته و در محاسبات ثابت فرض می‌شود.

شدت واکنش جذب و وا جذب با استفاده از معادله‌های ارائه شده توسط مایر و همکاران [۱۵] محاسبه شد. روابط (۶) و (۷) معادله‌های شدت واکنش را به ترتیب برای جذب و وا جذب هیدروژن نشان می‌دهند.

$$\dot{X}_a = C_a \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T}\right) \ln\left(\frac{p}{p_{eq}}\right) (\rho_{sat} - \rho_s) \quad (6)$$

$$\dot{X}_d = C_d \exp\left(\frac{-E_d}{R_g T}\right) \left(\frac{p - p_{eq}}{p_{eq}}\right) (\rho_s - \rho_{emp}) \quad (7)$$

$\dot{X}$  بر حسب  $\text{kg/m}^3 \text{s}$  می‌باشد.  $\rho_s$  چگالی فاز جامد (هیدرید فلزی) است و مقدار آن توسط معادله پیوستگی برای فاز جامد به دست می‌آید که عبارت است از:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \dot{X} \quad (8)$$

در معادله‌های (۶) و (۷)،  $p_{eq}$  فشار تعادلی هیدروژن است و برای آلیاژ لاتانیوم-نیکل ( $\text{LaNi}_5$ ) توسط معادله (۹) محاسبه می‌شود. در این معادله  $n$  برای فرآیند جذب  $\gamma$  و برای وا جذب  $\alpha$  است. ثابت‌های این معادله توسط داو و همکاران [۱۶] ارائه شده است.

$$p_{eq} = \sum_{i=0}^n a_n \left(\frac{H}{M}\right)^n \exp\left(\frac{M_g \Delta H}{R_g} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right) \times 10^5 \quad (9)$$

در معادله (۹)  $\frac{H}{M}$  نسبت اتمی<sup>۲</sup> هیدروژن به فلز است و توسط معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\frac{H}{M} = \frac{(\rho_s - \rho_{emp}) M_m}{\rho_{emp} M_H} \quad (10)$$

در معادله (۱۰)  $M_H$  و  $M_m$  به ترتیب جرم مولکولی آلیاژ جاذب و جرم اتمی هیدروژن می‌باشد.

برای آلیاژ  $\text{Ti}_{0.95} \text{Zr}_{0.05} \text{Mn}_{1.48} \text{V}_{0.43} \text{Fe}_{0.08} \text{Al}_{0.01}$  (با نام تجاری C5) فشار تعادلی توسط معادله‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب برای فرآیندهای جذب و وا جذب محاسبه می‌شود. ثابت‌های این معادلات توسط هربرینگ و همکاران [۱۷] ارائه شده است.

$$p_{eq} = p_0 \left[ \exp\left(a_1 + \frac{a_2}{T} + a_3 T + a_4 \omega_H^{\alpha} + a_5 \omega_H + a_6 \omega_H^2 + a_7 \omega_H^3 + a_8 \omega_H^4\right) + \exp(b_1 + b_2 \omega_H + b_3 T + b_4 T^2 + b_5 T^3) \right] \quad (11)$$

$$p_{eq} = p_0 \left[ \exp\left(a_1 + \frac{a_2}{T} + a_4 \omega_H^{\alpha} + a_5 \omega_H + a_6 \omega_H^2 + a_7 \omega_H^3 + a_8 \omega_H^4\right) + \exp\left(b_1 + b_2 \omega_H + b_3 T + b_6 \frac{\omega_H}{T}\right) \right] \quad (12)$$

<sup>1</sup> Permeability

<sup>2</sup> Atomic ratio

شرایط مرزی به صورت معادله‌های (۲۳) و (۲۴) نوشته شد.

$$\frac{\partial}{\partial z} T(t, r, 0) = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} T(t, r, Z) = 0 \quad (24)$$

جداره بیرونی استوانه در حال انتقال گرما با سیال عبور کننده از روی آن است که این سیال همان هوای محیط مورد نظر می‌باشد که به وسیله دمنده بر روی راکتور دمیده می‌شود. برای شرط مرزی دما در دیواره‌ای که در حال انتقال گرما با این سیال است از رابطه (۲۵) استفاده شد. در این معادله  $h$  ضریب انتقال گرمای جابجایی است که بسته به شرایط سیال در تماس با دیواره خارجی راکتور تعیین می‌شود.

$$\lambda_e \frac{\partial}{\partial r} T(t, R, z) = h(T_f(t, z) - T(t, R, z)) \quad (25)$$

$T_f$  دمای هوای عبوری از روی جداره راکتور است که از تغییر آن در جهت شعاع صرف نظر شده و تغییر آن تنها در جهت طول و با زمان در نظر گرفته شده است.  $T_f$  را در هر لحظه از زمان می‌توان توسط رابطه (۲۶) محاسبه کرد [۲۱].

$$\frac{\rho_f u_f A_f C_{pf}}{2\pi R h} \frac{\partial}{\partial z} T_f(t, z) + T_f(t, z) = T(t, R, z) \quad (26)$$

در معادله (۲۶)،  $C_{pf}$  و  $A_f$  به ترتیب چگالی، سرعت، سطح مقطع عبور جریان و ظرفیت گرمایی هوا است. در این معادله دمای هوای ورودی برای راکتور واجذب کننده، دمای محیط سرد شونده (دمای اتاق) است و دمای هوای ورودی برای راکتور جذب کننده، دمای محیط گرم (محیط خارجی) است که ثابت و برابر ۴۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. معادله‌های (۲۷) و (۲۸) شرایط مرزی معادله (۲۶) به ترتیب برای فرآیندهای جذب و واجذب هستند.

$$T_f(t, 0) = T_{amb} \quad (27)$$

$$T_f(t, 0) = T_{room}(t) \quad (28)$$

دمای اتاق به دلیل تبادل گرما با راکتور واجذب کننده، با زمان در حال تغییر بوده و توسط معادله (۲۹) محاسبه می‌شود [۸].

$$\rho_f u_f A_f C_{pf} n_{reactor} (T_{f_{out}} - T_{room}) + Q_{load} = \rho_f V_{room} C_{pf} \frac{\partial T_{room}}{\partial t} \quad (29)$$

در رابطه (۲۹)،  $T_{f_{out}}$  دمای هوای خروجی از راکتور است.  $V_{room}$  حجم اتاقی است که سردسازی در آن انجام می‌شود.  $Q_{load}$  شدت انتقال گرما از در، پنجره و دیوارهای اتاق با محیط بیرون است و توسط معادله (۳۰) محاسبه می‌شود.

$$Q_{load} = \sum h_i A_i (T_{amb} - T_{room}) \quad (30)$$

در معادله (۳۰)  $h_i$  و  $A_i$  به ترتیب ضریب انتقال گرمای جابجایی و سطح مقطع در، پنجره و دیوارهای اتاق می‌باشد. در قسمت خروجی راکتور واجذب کننده از انتقال گرما صرف نظر شد و رابطه (۳۱) مورد استفاده قرار گرفت.

$$\frac{\partial T}{\partial r}(t, R_0, z) = 0 \quad (31)$$

برای ورودی راکتور جذب کننده از رابطه (۳۲) استفاده شد [۲۰].

$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial r}(t, R_0, z) = \rho_g U(t, R_0, z) C_{pg} (T_{a_{in}} - T(t, R_0, z)) \quad (32)$$

در رابطه (۳۲)،  $T_{a_{in}}$  دمای گاز هیدروژن در ورودی راکتور جذب

قانون گاز ایده‌آل، دبی جرمی هیدروژن در داخل راکتور را می‌توان توسط معادله (۲۱) محاسبه کرد [۱۸].

$$\dot{m}_{H_2} = \left[ V_S - \left( \left( \frac{P_{a_{in}}}{P_{d_{out}}} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) V_{CL} \right] \times \frac{P_{d_{out}} M_g}{R_g T_{d_{out}} n_{reactor}} \omega \quad (21)$$

جدول ۱- مقادیر خواص فیزیکی استفاده شده در محاسبات [۸، ۱۷-۲۱]

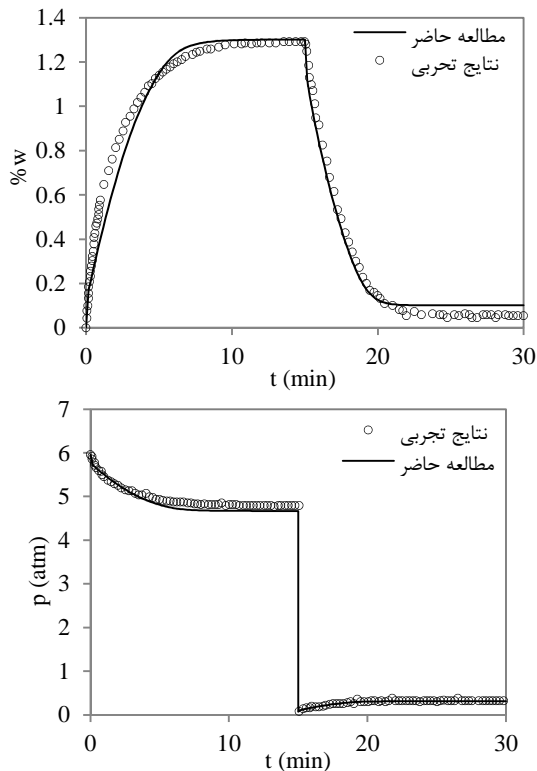
پارامتر	جذب توسط C5	واجذب توسط C5	جذب توسط LaNi <sub>5</sub>	واجذب توسط LaNi <sub>5</sub>
C (1/s)	۸۳۳	$6 \times 10^{-6}$	۵۹/۱۸۷	۹/۵۷
E (J/mol H <sub>2</sub> )	۲۹۶۵۱	۴۰۰۰۰	۲۱۱۷۰	۱۶۴۸۰
$\rho_{emp}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	۵۵۰۰	۵۵۰۰	۸۳۰۰	۸۳۰۰
$\rho_{s0}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	۵۵۱۰	۵۵۸۰	۸۳۱۵	۸۴۰۰
$C_{ps}$ (J/kg K)	۵۰۰	۵۰۰	۴۱۹	۴۱۹
$M_m$ (kg/kmol)	۵۲/۸	۵۲/۸	۴۳۲/۴	۴۳۲/۴
$\Delta H$ (J/kg)	۱/۳۵۹۲ $\times 10^{-7}$	۱/۴۰۸۸ $\times 10^{-7}$	۱/۵ $\times 10^{-7}$	۱/۵ $\times 10^{-7}$
مقادیر مشترک در تمام محاسبات				
$\omega$ (rps)	۳۰			
$\rho_f$ (Kg/m <sup>3</sup> )	۱/۱۴۵۵			
$u_f$ (m/s)	۲/۵			
$C_{pf}$ (J/kg K)	۱۰۰۵			
$C_{pg}$ (J/kg K)	۱۴۸۹۰			
$\eta$	۰/۷			
$R_0$ (m)	۰/۰۰۱۵			
$T_0$ (K)	۳۱۳/۱۵			
$\lambda_e$ (W/mK)	۵			
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	۵۷۰			
$\kappa$ (m <sup>2</sup> )	$10^{-12}$			
$\epsilon$	۰/۵			
$v$ (m <sup>2</sup> /s)	$1/0.5 \times 10^{-4}$			
$V_{room}$ (m <sup>3</sup> )	۲۲/۵			
$V_{CL}$	$0/0.5 \times V_S$			

در معادله (۲۱)،  $V_S$  حجمی از کمپرسور است که توسط پیستون جارو می‌شود و  $V_{CL}$  حجمی از کمپرسور است که پیستون به آن وارد نمی‌شود.  $\omega$  سرعت چرخش محور کمپرسور است که سرعت حرکت پیستون در سیلندر را تعیین می‌کند.  $P_{d_{out}}$  و  $P_{a_{in}}$  به ترتیب فشار در ورودی راکتور جذب کننده و فشار در خروجی راکتور واجذب کننده هیدروژن است.  $n_{reactor}$  تعداد راکتورهای استفاده شده در قسمت واجذب است که به همین تعداد نیز در قسمت جذب استفاده می‌شود. با استفاده از شدت جریان جرمی هیدروژن و دانستن سطح مقطع جریان، شرایط مرزی در ورودی راکتور جذب کننده و خروجی راکتور واجذب کننده به دست می‌آید.

$$\frac{\pm \kappa \rho_g \partial p}{\mu \partial r}(t, R_0, z) = \frac{\dot{m}_{H_2}}{2\pi R_0 L} \quad (22)$$

در معادله (۲۲) علامت مثبت یا منفی با توجه به وارد و یا خارج شدن هیدروژن در راکتورها تعیین می‌شود و  $L$  طول راکتور است. در دیواره‌های جانبی راکتور از انتقال گرما با محیط صرف نظر شد و

فشار به درون راکتوری حاوی یک بستر متخلخل از آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  جریان یافته و جذب می‌شود. سپس خروجی راکتور به یک مخزن با فشار نزدیک به خلأ متصل شده و هیدروژن جذب شده به درون مخزن مورد نظر واجذب می‌شود و فشار مخزن افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نتایج شبیه‌سازی برای تغییر درصد جرمی هیدروژن در فاز جامد و تغییر فشار مخزن با زمان، توافق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی [۱۱۴] برای تغییر فشار و جزء جرمی هیدروژن در فاز جامد با زمان برای جذب و واجذب هیدروژن در راکتوری با مشخصه‌های شکل ۲-الف

### ۲-۳- شبیه‌سازی پمپ گرمایی بر پایه هیدرید فلزی

پس از بررسی توانایی مدل مورد استفاده، شبیه‌سازی برای پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی انجام شد. هندسه مورد استفاده در این شبیه‌سازی هندسه نشان داده شده در شکل ۲-ب است. شکل ۵ و شکل ۶ نتایج به دست آمده برای تغییر فشار و دمای راکتورهای جذب و واجذب کننده با زمان را برای یک پمپ گرمایی بر پایه هیدرید فلزی نشان می‌دهد. هیدروژن از یک راکتور واجذب شده و از آن خارج می‌شود. پس از افزایش فشار هیدروژن در کمپرسور، هیدروژن واجذب شده وارد راکتور دوم شده و در آنجا دوباره جذب می‌شود. کمپرسور در نظر گرفته شده یک کمپرسور رفت و برگشتی است و فشار هیدروژن خروجی از راکتور واجذب کننده را به فشار بالاتر از راکتور جذب کننده می‌رساند. پس از اتمام یک مرحله از فرآیند واجذب هیدروژن، راکتوری که هیدروژن را جذب کرده بود شروع به واجذب آن کرده و راکتور دوم هیدروژن واجذب شده را جذب می‌کند و این سیکل ادامه می‌یابد. به دلیل کوچک بودن رسانایی گرمایی در بسترهای هیدرید فلزی، استفاده از راکتورهای با قطر بیش از ۲ الی ۳ سانتی‌متر باعث کاهش انتقال گرما

کننده است که مقدار آن را می‌توان از رابطه فرآیند پلی‌تروپیک (ثابت  $pV^\gamma$ ) در کمپرسور به دست آورد.

$$T_{a_{in}} = T_{d_{out}} \left( \frac{p_{a_{in}}}{p_{d_{out}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (33)$$

در معادله (۳۳)، برای نسبت  $\frac{p_{a_{in}}}{p_{d_{out}}}$  بزرگ‌تر از ۴،  $\gamma$  برابر با ۱٫۲۵ و برای مقدار کوچک‌تر از ۴،  $\gamma$  برابر با ۱٫۴ در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

### ۲-۵- محاسبه ضریب عملکرد پمپ گرمایی

یکی از پارامترهای مهم در بررسی کارایی پمپ‌های گرمایی ضریب عملکرد (COP) می‌باشد که نشان دهنده‌ی توان سردسازی حاصل ( $Q_{cold}$ ) به ازای توان مصرفی دستگاه ( $W_c$ ) است. ضریب عملکرد متوسط برای پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی با استفاده از رابطه (۳۴) محاسبه می‌شود [۹ و ۱۸].

$$COP = \frac{\int_0^t Q_{cold} dt}{\int_0^t W_c dt} \quad (34)$$

$$Q_{cold} = -\rho_f u_f A_f C_{pf} n_{reactor} (T_{f_{out}} - T_{room}) \quad (35)$$

$$W_c = \frac{\dot{m}_{H_2} R_g T_{d_{out}} n_{reactor} \left( \left( \frac{p_{a_{in}}}{p_{d_{out}}} \right)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right)}{\frac{\gamma-1}{\gamma} \eta} \quad (36)$$

در معادله (۳۶)  $\eta$  بازده آیزنتروپیک کمپرسور است.

### ۲-۶- حل عددی معادله‌ها

برای حل معادله‌ها به روش عددی ابتدا هندسه مورد بررسی به ۹۰۰۰ شبکه تقسیم شد. این تعداد شبکه پس از بررسی استقلال محاسبات از شبکه بندی انتخاب شده است. معادله‌های حاکم بر مسئله با استفاده از روش حجم محدود<sup>۱</sup> و به صورت ضمنی<sup>۲</sup> جداسازی شدند و دستگاه معادله‌های جبری حاصل با استفاده از روش TDMA<sup>۳</sup> حل شد. به این منظور برنامه کامپیوتری به زبان فرترن ۹۰ نوشته شد.

مراحل زمانی<sup>۴</sup> با توجه به شرایط هر شبیه‌سازی بین ۰٫۰۰۱ تا ۰٫۰۱ انتخاب شد و در نهایت خطاها در هر مرحله از محاسبه تا مقدار  $10^{-5}$  کاهش یافت.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی توانایی مدل

به منظور ساده سازی معادله‌ها و کاهش در حجم محاسبات، تغییر فشار تنها در راستای جریان هیدروژن در راکتور (شکل ۲) در نظر گرفته شد و از تغییر فشار در راستای دیگر صرف نظر شد. برای بررسی تأثیر این فرض بر نتایج محاسبات و همچنین بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای جذب و واجذب، ابتدا شبیه‌سازی بر اساس نتایج آزمایشگاهی در دسترس انجام شد. شکل ۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط لارنسل و گایت [۱۱۴] را نشان می‌دهد. در این حالت فرآیندهای جذب و واجذب به صورت مجزا انجام شده است. ابتدا هیدروژن از یک مخزن ذخیره‌سازی به دلیل اختلاف

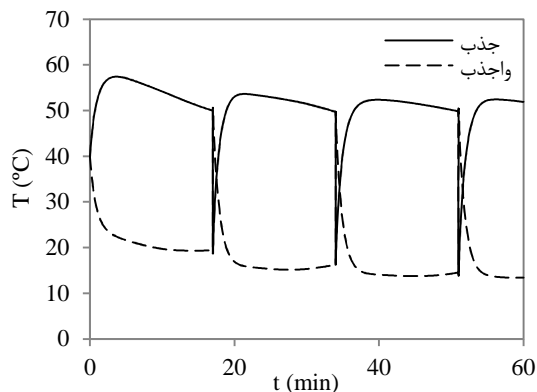
<sup>1</sup> Finite volume

<sup>2</sup> Implicit

<sup>3</sup> Tridiagonal matrix algorithm

<sup>4</sup> Time step

این درصد افزایش یافته است. فرآیند جذب هیدروژن در هیدرید فلزی با یک واکنش گرمازا همراه است. از این رو در هنگام جذب هیدروژن راکتور نیاز به کاهش دما دارد. همان طور که در شکل ۷ برای راکتور جذب کننده نشان داده شده است، دمای این راکتور در سمت چپ (ورودی هوای ۴۰ °C) کمتر از سمت راست آن است. با عبور هوای محیط از روی راکتور جذب کننده دمای آن افزایش یافته و دوباره وارد محیط خارج اتاق می شود. در سمت راست راکتور دمای هوای عبوری بیشتر است؛ از این رو دمای راکتور نیز در سمت راست بیشتر از سمت چپ آن می باشد که این باعث کاهش در سرعت جذب هیدروژن شده و همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، درصد جرمی هیدروژن در سمت راست راکتور کمتر از سمت چپ آن است.



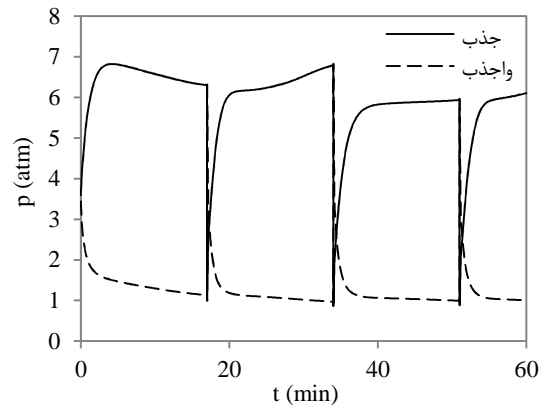
شکل ۶- تغییر دمای راکتورهای جذب و واجذب کننده در حین عملکرد پمپ گرمایی به مدت یک ساعت و با استفاده از آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  ( $V_s = 15$  cc)

شکل ۸ نحوه تغییر دمای اتاق با زمان در نتیجه استفاده از راکتورهایی با مشخصه های مشابه با راکتورهای شکل ۶ را نشان می دهد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، پمپ گرمایی در نظر گرفته شده توانسته است دمای اتاق را تا ۲۴ درجه سانتی گراد ظرف مدت ۱ ساعت کاهش دهد. در شکل ۸، اندکی افزایش دما در ابتدای هر مرحله مشاهده می شود که به دلیل توقف کوتاه عملکرد پمپ گرمایی در ابتدای هر مرحله و تبادل گرما با محیط خارج اتاق که در دمای ۴۰ درجه سلسیوس قرار دارد می باشد. عملکرد پمپ گرمایی پس از یک ساعت تقریباً به حالت پایا رسیده و انتقال گرمای هوای اتاق با محیط گرم خارجی و توان سردسازی پمپ گرمایی با هم موازنه شده و کاهش بیشتر دمای اتاق نیازمند افزایش در توان مصرفی دستگاه می باشد.

### ۳-۲- بررسی تأثیر حجم کمپرسور بر عملکرد پمپ گرمایی

همان طور که اشاره شد در بین دو دسته راکتور یک کمپرسور رفت و برگشتی در نظر گرفته شده است. یکی از پارامترهای مهم در طراحی این تجهیزات حجم جارو شونده توسط پیستون ( $V_s$ ) در داخل کمپرسور است که با افزایش این حجم، شدت جریان هیدروژن در بین دو راکتور افزایش می یابد. افزایش شدت جریان هیدروژن خروجی از راکتور واجذب کننده باعث اختلاف فشار بیشتر در این راکتور شده و هیدروژن با شدت بیشتری واجذب می شود. در نتیجه افزایش شدت واجذب دمای راکتور نیز با

می شود. از این رو در این تجهیزات از یک دسته راکتور با قطر کوچک استفاده می شود. همان طور که اشاره شد در این تحقیق برای هر یک از فرآیندهای جذب و واجذب ۳۰ عدد راکتور با قطر ۲ سانتی متر در نظر گرفته شده است که یک عدد کمپرسور این دو دسته راکتور را به یکدیگر ارتباط می دهد. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده عملکرد راکتورهای هر دسته راکتور با هم یکسان بوده و نتایج ارائه شده برای تغییر دما و فشار راکتورها برای هر ۳۰ راکتور صادق است.

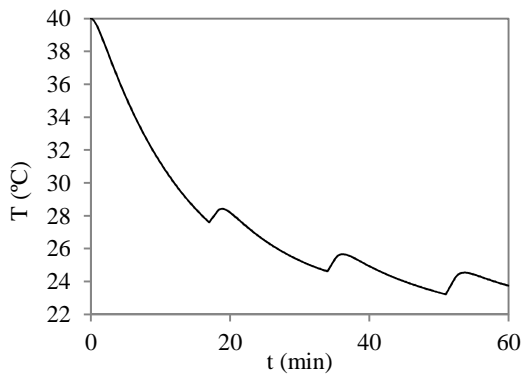


شکل ۵- تغییر فشار راکتورهای جذب و واجذب کننده در حین عملکرد پمپ گرمایی به مدت یک ساعت و با استفاده از آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  ( $V_s = 15$  cc)

هوای اتاق توسط یک دمنده بر روی راکتورهای واجذب کننده دمیده می شود و پس از انتقال گرما با این راکتورها دوباره به اتاق بازگردانده می شود. هوای محیط بیرون نیز که در دمای ۴۰ درجه سلسیوس قرار دارد به منظور خنک کردن راکتور جذب کننده، به طور پیوسته بر روی آن دمیده می شود. در نمودار تغییر فشار و دمای راکتورها می توان تأثیر تغییر نقش راکتورها را پس از پایان هر مرحله مشاهده کرد. در ابتدای هر مرحله راکتوری که در مرحله قبل هیدروژن را جذب می کرد و فشار و دمای آن بالا بود، شروع به واجذب هیدروژن می کند و از این رو در ابتدای هر مرحله دما و فشار واجذب به یکباره افزایش یافته و دوباره در نتیجه فرآیند واجذب گرماگیر، کاهش می یابد. در شبیه سازی این فرآیند فرض شد که در ابتدای هر مرحله دمیدن هوای اتاق بر روی راکتور واجذب کننده که دمای آن بالاتر از دمای اتاق است متوقف شده و پس از کاهش دمای راکتور، خنک سازی هوای اتاق دوباره آغاز می شود.

شکل ۷ توزیع دما و درصد جرمی هیدروژن را در راکتورها پس از گذشت ۱۵ دقیقه از عملکرد پمپ گرمایی نشان می دهد. واکنش واجذب هیدروژن گرماگیر بوده و با افزایش دمای راکتور سرعت این واکنش افزایش می یابد. در شکل ۷ هوای گذرنده از روی هر راکتور، از سمت چپ وارد شده و از سمت راست خارج می شود (مطابق با شکل ۲-ب). از این رو در راکتور واجذب کننده هیدروژن، دمای راکتور در سمت چپ شکل به دلیل انتقال گرما با سیال گرم ورودی، بیشتر از سمت راست آن است. در توزیع درصد جرمی هیدروژن در راکتور واجذب کننده می توان تأثیر دما را بر فرآیند واجذب مشاهده کرد. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در سمت چپ راکتور به دلیل واجذب سریع تر، درصد جرمی هیدروژن در فاز جامد کمتر بوده و به سمت راست راکتور

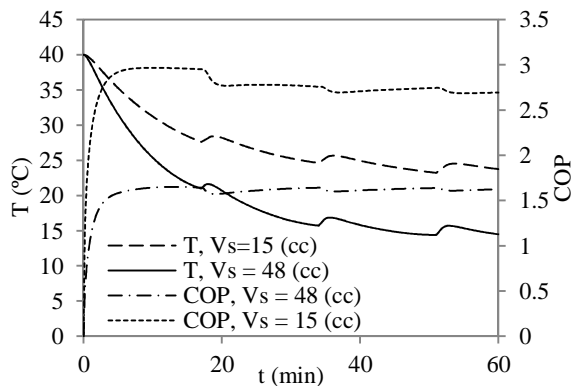
حجم‌های مختلف مشخص می‌شود که توان مورد نیاز برای دستگاه با کمپرسور بزرگ‌تر تا حدود ۲ برابر افزایش یافته است. در هنگام تعویض عملکرد راکتورها از واجذب کننده به جذب کننده هیدروژن و بالعکس، جهت جریان در کمپرسور عوض می‌شود. در این حالت که ابتدای هر مرحله اتفاق می‌افتد، به دلیل این که فشار هیدروژن در راکتور واجذب کننده بیشتر از راکتور جذب کننده است، هیدروژن در بین دو راکتور بدون نیاز به کمپرسور جریان می‌یابد. از این رو توان مصرفی کمپرسور در ابتدای هر مرحله به صفر کاهش یافته و دوباره با افزایش فشار در راکتور جذب کننده و کاهش فشار در راکتور واجذب کننده توان مصرفی کمپرسور افزایش می‌یابد.



شکل ۸- تغییر دمای اتاق سرد شونده طی یک ساعت عملکرد پمپ گرمایی دارای راکتورهای حاوی آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  ( $V_s = 15 \text{ cc}$ )

### ۳-۴- بررسی تأثیر استفاده از کمپرسورهای چند مرحله‌ای بر عملکرد پمپ گرمایی

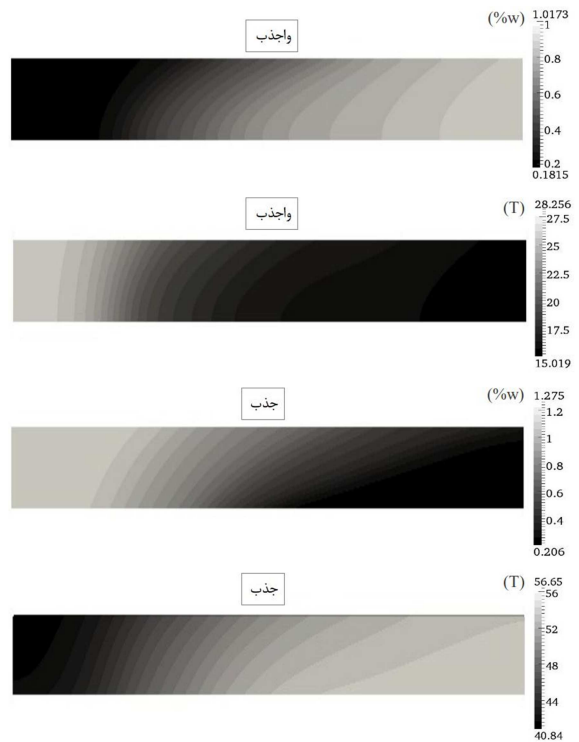
به دلیل افزایش فشار هیدروژن در کمپرسور، دمای آن نیز افزایش می‌یابد. در ابتدای هر مرحله به دلیل این که فشار راکتور واجذب کننده بالاتر از راکتور جذب کننده است و هیدروژن از راکتور با فشار بالاتر به راکتور با فشار پایین‌تر جریان می‌یابد دمای آن با کاهش همراه است و دوباره با افزایش فشار در راکتور جذب کننده دمای خروجی کمپرسور نیز افزایش می‌یابد و در انتهای هر مرحله به دلیل بیشینه اختلاف فشار، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



شکل ۹- دمای اتاق سرد شونده و COP برای دو پمپ گرمایی دارای کمپرسورهای با حجم‌های متفاوت (آلیاژ مورد استفاده  $\text{LaNi}_5$ )

در این حالت دمای هیدروژن حتی تا بیش از ۳۵۰ درجه سلسیوس

کاهش بیشتری همراه بوده و توان سردسازی دستگاه افزایش می‌یابد. البته افزایش حجم کمپرسور باعث افزایش در توان مصرفی کمپرسور شده و افزایش در هزینه‌ها را نیز به همراه دارد. شکل ۹ تأثیر افزایش حجم کمپرسور را بر دمای اتاق و COP دستگاه نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش حجم کمپرسور توان سردسازی افزایش یافته و دستگاه توانسته است دمای اتاق را نسبت به حالت استفاده از کمپرسور با حجم کمتر، ۱۰ درجه بیشتر کاهش دهد. از طرفی در حالتی که از کمپرسور با حجم بیشتری استفاده شده است، دستگاه توانسته دمای اتاق را ظرف مدت ۱۰ دقیقه از ۴۰ تا ۲۴ درجه سلسیوس کاهش دهد؛ این در حالی است که دستگاه با کمپرسور کوچک‌تر همین عمل را ظرف مدت یک ساعت انجام می‌دهد. این افزایش در توان سردسازی نیازمند صرف هزینه بیشتر در نتیجه افزایش در توان مصرفی کمپرسور بوده و همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است مقدار COP با افزایش حجم کمپرسور به مقدار یک واحد کاهش یافته است.



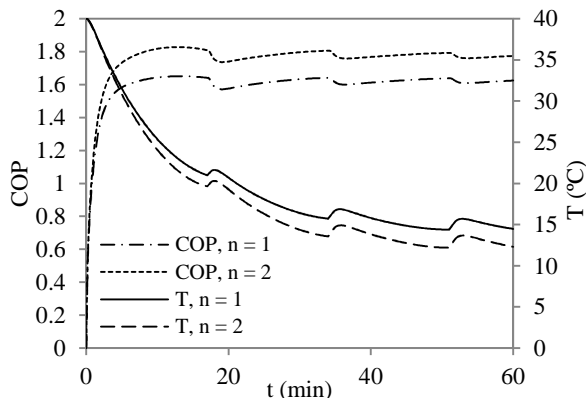
شکل ۷- توزیع دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) و درصد جرمی هیدروژن در راکتورها پس از ۱۵ دقیقه عملکرد پمپ گرمایی با استفاده از آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  ( $V_s = 15 \text{ cc}$ )

شکل ۱۰ توان مصرفی کمپرسور را در دو حالت مختلف نشان می‌دهد. در پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی دارای کمپرسور، مصرف کننده انرژی دو عدد دمنده و یک عدد کمپرسور است. از آنجایی که توان مصرفی فن‌ها در مقایسه با توان مصرفی کمپرسور قابل توجه نیست از این‌رو توان مصرفی کمپرسور به عنوان مورد نیاز دستگاه در نظر گرفته می‌شود. با مقایسه توان مصرفی برای دو کمپرسور با



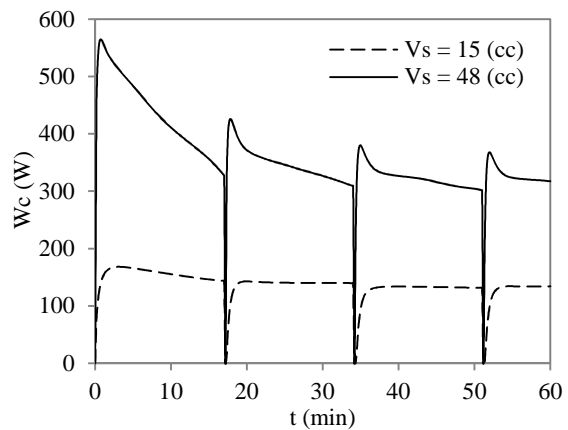
### ۳-۵- بررسی تأثیر نوع آلیاژ مورد استفاده بر عملکرد پمپ گرمایی

یکی از پارامترهایی که بر عملکرد یک پمپ گرمایی بر پایه هیدرید فلزی تأثیرگذار است نوع آلیاژ می‌باشد. استفاده از یک آلیاژ مناسب می‌تواند ضریب عملکرد دستگاه را بهبود بخشد و حتی بر روی وزن و حجم دستگاه تأثیر گذار باشد. در این تحقیق کارایی آلیاژ C5 که یک آلیاژ فشار بالا برای جذب هیدروژن است بررسی شده و نتایج آن با نتایج به دست آمده برای آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  که در مقایسه با C5 آلیاژی فشار پایین است مورد مقایسه قرار گرفته است.

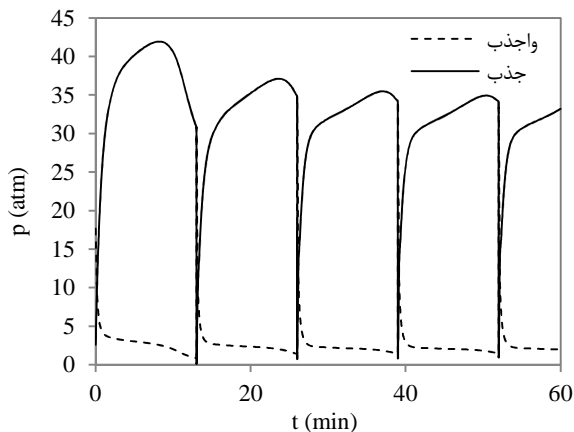


شکل ۱۲- تغییر COP و دمای اتاق در حین استفاده از کمپرسورهای یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در پمپ‌های گرمایی با استفاده از آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  (n تعداد مراحل کمپرسور و  $V_s = 15$  cc)

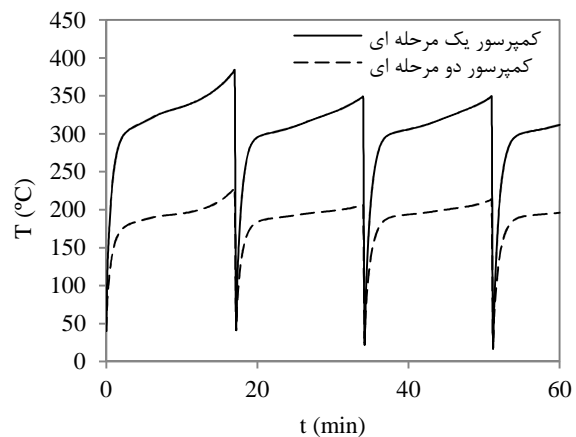
ممکن است افزایش یابد که برای عملکرد یک کمپرسور یک مرحله‌ای دمای بالایی است. در چنین شرایطی معمولاً از کمپرسورهای چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. شکل ۱۱ تأثیر استفاده از یک کمپرسور دو مرحله‌ای را بر دمای خروجی کمپرسور نشان می‌دهد. در کمپرسور دو مرحله‌ای در نظر گرفته شده، دمای هیدروژن خروجی از کمپرسور اول با استفاده از یک سیال خنک کننده تا دمای ۴۰ درجه سلسیوس کاهش یافته و سپس وارد کمپرسور دوم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است دمای خروجی از کمپرسور با استفاده از یک کمپرسور دو مرحله‌ای کاهش قابل توجهی نسبت به کمپرسور یک مرحله‌ای داشته است.



شکل ۱۰- توان مصرفی پمپ‌های گرمایی دارای کمپرسورهایی با حجم‌های متفاوت (آلیاژ مورد استفاده  $\text{LaNi}_5$ )



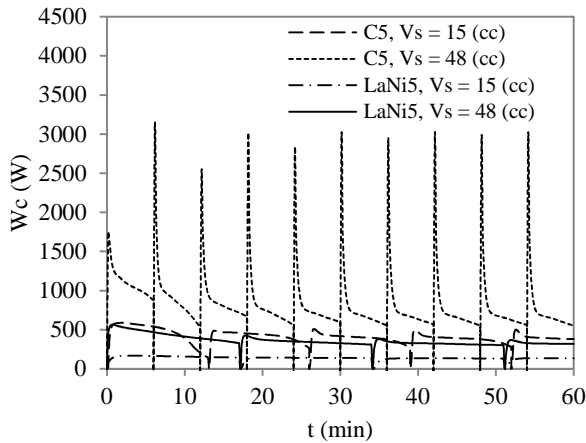
شکل ۱۳- تغییر فشار راکتورهای جذب و واجذب کننده هیدروژن در حین عملکرد پمپ گرمایی به مدت یک ساعت و با استفاده از آلیاژ C5 ( $V_s = 15$  cc)



شکل ۱۱- دمای خروجی از کمپرسور یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای طی یک ساعت عملکرد پمپ گرمایی با استفاده از آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  ( $V_s = 48$  cc)

شکل ۱۳ تغییر فشار راکتورهای حاوی آلیاژ C5 را نشان می‌دهد. شرایط برای نتایج به دست آمده در این شکل مشابه با شرایط شکل ۵ می‌باشد و فقط آلیاژ مورد استفاده تغییر کرده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است حداکثر فشار راکتور جذب کننده برای آلیاژ C5 بسیار بیشتر از آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  (شکل ۵) است. شکل ۱۴ تغییر دمای اتاق با زمان در هنگام استفاده از پمپ گرمایی بر پایه آلیاژ C5 و مقایسه آن با نتایج به دست آمده برای آلیاژ  $\text{LaNi}_5$  را

شکل ۱۲ تغییر COP و دمای اتاق در حین فرایند سردسازی با استفاده از پمپ گرمایی دارای یک کمپرسور دو مرحله‌ای و مقایسه آن با نتایج برای حالت استفاده از کمپرسور یک مرحله‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، استفاده از کمپرسور دو مرحله‌ای باعث خنک‌سازی بهتر اتاق شده و COP دستگاه نیز نسبت به حالت استفاده از کمپرسور تک مرحله‌ای افزایش یافته است.



شکل ۱۳- تغییر توان مورد نیاز دستگاه طی یک ساعت عملکرد پمپ گرمایی با استفاده از دو آلیاژ و کمپرسور متفاوت

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر عملکرد پمپ‌های گرمایی بر پایه هیدریدهای فلزی دارای کمپرسور (CDMHHP) با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی یک کمپرسور با حجمی تقریباً ۳ برابر بزرگ‌تر باعث افزایش قابل توجه در توان سردسازی دستگاه شد و دمای اتاق در هنگام استفاده از کمپرسور با حجم بزرگ‌تر ۱۰ درجه بیشتر کاهش یافت و این در حالی بود که توان مصرفی دستگاه برای حالتی که از کمپرسور با حجم بیشتر استفاده می‌شد به دو برابر افزایش یافت.

نتایج به دست آمده برای استفاده از کمپرسور دو مرحله‌ای در مقایسه با کمپرسور یک مرحله‌ای نشان داد که این روش می‌تواند به بهبود عملکرد این نوع از پمپ‌های گرمایی کمک کند و علاوه بر کاهش قابل توجه در دمای هیدروژن خروجی از کمپرسور، باعث افزایش در بازده کمپرسور نیز شود.

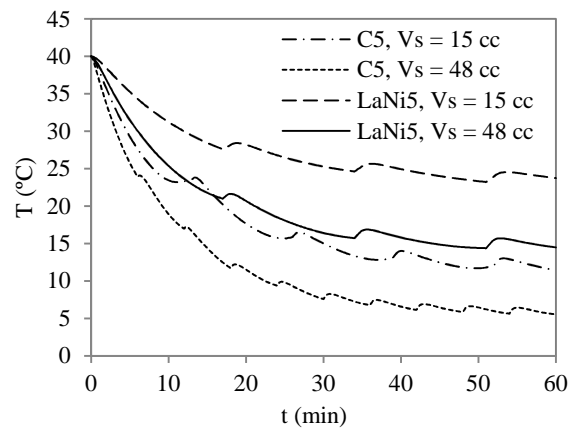
بررسی تأثیر استفاده از آلیاژهای فشار بالا (C5) در مقایسه با آلیاژهای فشار پایین (LaNi<sub>5</sub>) نشان داد که در شرایط یکسان عملیاتی توان سردسازی پمپ گرمایی دارای آلیاژ C5 بسیار بیشتر از LaNi<sub>5</sub> است اما در هنگام استفاده از آلیاژ C5 به دلیل اختلاف فشار زیاد بین دو راکتور جذب و واجذب کننده، توان مورد نیاز کمپرسور برای ایجاد جریان بین دو راکتور به طور قابل توجهی بیشتر از حالتی است که از LaNi<sub>5</sub> استفاده می‌شود.

همچنین در حالتی که توان سردسازی و توان مصرفی پمپ گرمایی در هنگام استفاده از این دو آلیاژ مشابه است، آلیاژ C5 به کمپرسور کوچک‌تری نیاز داشته و از طرفی این آلیاژ با داشتن جرم حجمی کمتر (۵۵۰۰ kg/m<sup>3</sup>) از آلیاژ LaNi<sub>5</sub> (۸۳۰۰ kg/m<sup>3</sup>) باعث کاهش قابل توجه در وزن دستگاه می‌شود.

#### ۵- نمادها

- $C_a$  ثابت واکنش جذب هیدروژن ( $s^{-1}$ )
- $C_d$  ثابت واکنش واجذب هیدروژن ( $s^{-1}$ )
- $C_p$  ظرفیت گرمایی ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
- $E_a$  انرژی فعال‌سازی واکنش جذب ( $J(mol H_2)^{-1}$ )
- $E_d$  انرژی فعال‌سازی واکنش واجذب ( $J(mol H_2)^{-1}$ )
- $h$  ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، توان سردسازی آلیاژ C5 حتی در حالتی که از کمپرسور با حجم کوچک‌تر استفاده می‌شود اندکی بیشتر از حالتی است که از آلیاژ LaNi<sub>5</sub> همراه با کمپرسور با حجم بزرگ‌تر استفاده شده است. اما نتایج شبیه‌سازی برای توان مصرفی کمپرسور در هنگام استفاده از C5 نشان داد که در هر دو حالت توان مصرفی کمپرسور برای C5 بیشتر از LaNi<sub>5</sub> بوده است. شکل ۱۵ تغییر توان مصرفی این آلیاژ با زمان و مقایسه آن با آلیاژ C5 را نشان می‌دهد. البته این موضوع با بررسی نمودار فشار برای آلیاژ C5 نیز قابل پیش‌بینی است. فشار در راکتور جذب کننده در هنگام استفاده از C5 به بیش از ۳۵ (atm) می‌رسد و برای ایجاد جریان هیدروژن بین راکتورها، کمپرسور باید نسبت به زمانی که از آلیاژ LaNi<sub>5</sub> استفاده می‌شود توان بیشتری مصرف کند. با مقایسه عملکرد پمپ گرمایی در هنگام استفاده از آلیاژ C5 و کمپرسور کوچک‌تر (۱۵ cc) با حالتی که راکتورها حاوی LaNi<sub>5</sub> بوده و پمپ گرمایی از کمپرسور با حجم بزرگ‌تر (۴۸ cc) استفاده می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد دستگاه در این دو حالت تقریباً مشابه بوده و دستگاه با مصرف انرژی برابر دمای اتاق را به یک میزان کاهش داده است. از این رو می‌توان گفت در صورتی که برای آلیاژ LaNi<sub>5</sub> از یک کمپرسور با حجمی حدود سه برابر بزرگ‌تر استفاده شود عملکرد پمپ گرمایی برای این دو آلیاژ تقریباً یکسان می‌باشد. البته باید توجه کرد که استفاده از آلیاژ C5 به دلیل چگالی کمتر نسبت به LaNi<sub>5</sub> می‌تواند باعث کاهش قابل توجه در وزن دستگاه نیز شود و در عوض راکتورهای حاوی C5 باید توانایی تحمل فشار حدود ۴ برابر بیشتر از حالتی که آلیاژ LaNi<sub>5</sub> استفاده می‌شود را داشته باشند.



شکل ۱۴- تغییر دمای اتاق سرد شونده طی یک ساعت عملکرد پمپ گرمایی با استفاده از دو آلیاژ متفاوت

International Journal of Refrigeration, Vol. 28, No. 6, pp. 798 – 809, 2005.

[9] Bedbak S.S. and Ram Gopal M., Performance analysis of a compressor driven metal hydride cooling system, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, No.10, pp. 1127 – 1137, 2005.

[10] Magnetto D., Mola S., DaCosta D., Golben M., Rosso M., A Metal Hydride Mobile Air Conditioning System, SAE Technical Paper 2006-01-1235, 2006.

[11] Yang F., Wang G., Zhang Z., Meng X., Rudolph V., Design of the metal hydride reactors - a review on the key technical issues, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 8, pp. 3832 – 3840, 2010.

[12] Jemni A. and Ben Nasrallah S., Study of two-dimensional heat and mass transfer during absorption in a metal-hydrogen reactor, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 20, No. 1, pp. 43 – 52, 1995.

[13] Jemni A., Nasrallah S. B., Study of two-dimensional heat and mass transfer during desorption in a metal-hydrogen reactor, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 20, No. 11, pp. 881 – 891, 1995.

[14] Laurencelle F., Goyette J., Simulation of heat transfer in a metal hydride reactor with aluminium foam, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 14, pp. 2957 – 2964, 2007.

[15] Mayer U., Groll M., Supper W., Heat and mass transfer in metal hydride reaction beds: Experimental and theoretical results, Journal of the Less Common Metals, Vol. 131, No. 1-2, pp. 235 – 244, 1987.

[16] Dhaou H., Askri F., Salah M. B., Jemni A., Nasrallah S. B., Lamloumi J., Measurement and modelling of kinetics of hydrogen sorption by lanis5 and two related pseudobinary compounds, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 5, pp. 576 – 587, 2007.

[17] Herbrig K., Röntzsch L., Pohlmann C., Weißgärber T., Kieback B., Hydrogen storage systems based on hydride-graphite composites: computer simulation and experimental validation, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 17, pp. 7026 – 7036, 2013.

[18] Mazumdar S., Ram Gopal M., and Bhattacharyya S., Thermodynamic analysis and optimization of compressor-driven metal hydride cooling systems, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, No. 6, pp. 631–641, 2005.

[19] Skripnyuk V., Ron M., Evaluation of kinetics by utilizing the normalized pressure dependence method for the alloy  $Ti_{0.95}Zr_{0.05}Mn_{1.48}V_{0.43}Fe_{0.08}Al_{0.01}$ , Journal of Alloys and Compounds, Vol. 293-295, pp. 385 – 390, 1999.

[20] Tim M. Brown, Jacob Brouwer, G. Scott Samuelsen, Franklin H. Holcomb, and Joel King, Accurate simplified dynamic model of a metal hydride tank, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 20, pp. 5596 – 5605, 2008.

[21] Yang, T.-S. Tsai M.-L., Ju D.-S., Effects of exit-pressure variation on the hydrogen supply characteristics of metal hydride reactors, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 8, pp. 8597 – 8608, 2010.

[22] Yang F.S., Wang G.X., Zhang Z.X., Rudolph V., Investigation on the influences of heat transfer enhancement measures in a thermally driven metal hydride heat pump, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 18, pp. 9725-9735, 2010.

$M_g$	جرم مولکولی هیدروژن ( $kgmol^{-1}$ )
p	فشار (Pa)
$p_0$	فشار استاندارد (Pa)
R	شعاع راکتور (m)
$R_g$	ثابت عمومی گازها ( $Jmol^{-1}K^{-1}$ )
$R_0$	شعاع لوله ورود و خروج هیدروژن در وسط راکتور (m)
T	دما (K)
t	زمان (s)
$W_e$	توان مصرفی کمپرسور (W)
Z	طول راکتور (m)

#### علامه یونانی

$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\Delta H$	آنتالپی واکنش ( $Jkg^{-1}$ )

#### زیر نویس ها

a	جذب
amb	محیط
d	واجذب
emp	فلز عاری از هیدروژن
eq	تعادل
f	هوای عبوری از روی راکتورها
g	گاز هیدروژن
room	اتاق
s	جامد
sat	اشباع

#### ۶-مراجع

[1] Muthukumar P., and Groll M., Metal hydride based heating and cooling systems: A review, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 8, pp. 3817 – 3831, 2010.

[2] Libowitz G.G., Feldman K.T. Jr., and Stein C., Thermodynamic properties of metal hydrides for a novel heat pump configuration, Journal of Alloys and Compounds, vol. 253-254, pp. 673 – 676, 1997.

[3] Muthukumar P., Satheesh A., Analysis of crossed van't Hoff metal hydride based heat pump, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 26, Pages 11415-11420, 2013.

[4] Kim K.J., Feldman K.T. Jr., Lloyd G., and Razani A., Compressor-driven metal-hydride heat pumps, Applied Thermal Engineering, vol. 17, no. 6, pp. 551 – 560, 1997.

[5] Kim K.J., Feldman K.T. Jr., Lloyd G., Razani A., and Shanahan K.L., Performance of high power metal hydride reactors, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 5, pp. 355 – 362, 1998.

[6] Park J.G., Jang K.J., Lee P.S., and Le J.Y. e, The operating characteristics of the compressor-driven metal hydride heat pump system, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, No. 7, pp. 701 – 706, 2001.

[7] JPark.-G., Han S.C., Jang H.Y., Lee S.M., Lee P. S., and Lee J.Y., The development of compressor-driven metal hydride heat pump (CDMHHP) system as an air conditioner, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 27, No. 9, pp. 941 – 944, 2002.

[8] Mazumdar S., Bhattacharyya S., and Ramgopal M., Compressor driven metal hydride cooling systems - mathematical model and operating characteristics,