# مطالعه عددی فرآیند تغییر فاز در سیستمهای ذخیره کننده انرژی با استفاده از *ر*وش آنتالپی

**علی کشاورز <sup>۲</sup>و مسعود ضیاء بشرحق <sup>۳</sup>** دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی جاماسب پیرکندی<sup>۱</sup> مجتمع دانشگاهی هوا فضا دانشگاه صنعتی مالک اشتر

#### چکیدہ

در این پژوهش، فرآیند انتقال حرارت در یک سیستم ذخیره کننده انرژی با استفاده از روش آنتالپی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. درایـن روش، از شبکه ثابت استفاده شده و معادلات حاکم به گونهای تصحیح شده که برای هر دو فاز معتبر باشد. در سیستمهای ذخیره کننده انرژی انتقال حرارت از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و تابعی از انتقال حرارت اجباری بین سیال و دیواره میباشد. سیستم مورد نظر از دو سیلندر هممرکز تشکیل شده که در لوله داخلی سیال عامل قرار گرفته و سیلندر خارجی از ماده تغییر فاز دهنده پر شده است. ضمناً، نحوه کار سیستم به صورت تناوبی است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت در سیال و درمحیط ذخیره کننده با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی به صورت عددی و به متد حجم محدود گسسته شده و سپس با روشهای تکراری حل شدهاند. در نهایت، در این سیستم ذخیـره کننـده انـرژی، توزیع دما، آنتالپی و ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول زمان شارژ و دشارژ به دست آمده، نتایج دو حالت با هم مقایسه شدهاند. نتایج حاصل تفاوت توزیع دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی را در دوحالت شارژ و دشارژ به خوبی نشان میده.

**واژههای کلیدی:** سیستم ذخیره کننده انرژی، تغییر فاز، روش آنتالپی

## A Numerical Analysis of the Phase Change Process in a Thermal Storage System, Using Enthalpy Method

J. Pirkandi and School of Aerospace Eng. K.N. Toosi Univ. of Tech. A. Keshavarz and M. Ziabasharhagh Mech. Eng. Dep't Malek Ashtar Univ. of Tech.

#### ABSTRACT

In this work, a numerical analysis of heat transfer in a thermal storage system has been performed using enthalpy method. In this method, the solution is based on a fixed grid and the governing equations are modified, such that they are valid for both phases. The heat transfer in the thermal storage system is the conjugate problem: phase change material and the transient forced convection between the fluid heat transfer and the wall. The system consists of two concentric cylinders, whose working fluid flows through inner pipe and its outer cylinder has been filled with the phase change material. The system works periodically and the governing heat transfer equations for the working fluid and for the phase change material are solved numerically. The differential flow equations and heat transfer have been discretized using the finite volume approach which, are solved using an iterative procedure. Temperature, enthalpy, and heat transfer coefficient inside the thermal storage system have been obtained and the results of the two cases have been compared, which are in relatively close agreements.

Keywords: Thermal Storage System, Phase Change, Enthalpy Method

۲- دانشیار: keshavarz@ksu.edu

۳- استادیار: mzia@kntu.ac.ir

ا- مربی (نویسنده پاسخگو): jamasb@engineer.com

فهرست علائم

С گرمای مخصوص Η أنتاليي مخصوص گرمای نهان q D قطرلوله قطر هيدروليكي  $D_h$ V سرعت سيال سرعت میانگین  $U_m$ Х مختصات محورى شعاع لوله r Т دما T<sub>m</sub> دما ذوب ويسكوزيته سينماتيكي ν زمان τ ضريب انتقال حرارت جابجايي h k ضريب انتقال حرارت هدايتي Nu عدد ناسلت Pe عدد يكلت Re عدد رينولدز Z\*=Z/L Т\* طول بىبعد H\* H\*≡H/q آنتاليي بيبعد Т\* T\*≡(T-Tenv)/(Tm-Tenv) دمای ہے،بعد TETA≡(KL.Tenv τ)/(ρ<sub>I</sub> . q.D<sup>2</sup>) زمان ہے بعد TETA

#### زيرنويسها

سيال	f
شعاع داخلی	i
شعاع خارجي	0
ورودى	in
محيط	env
اوليه	init
فاز مايع	L
فاز جامد	S
ديواره	W
شارژ	c
دشارژ	d
مادہ تغییر فاز دھندہ	Р

### ۱\_ مقدمه

انتقال حرارت به همراه تغییر فاز در بسیاری از پدیدههای فیزیکی و در کاربردهای مختلف صنعتی و غیرصنعتی اتفاق میافتد. در میان کاربردهای مربوط به فرآیند تغییر فاز، سیستمهای ذخیرهکننده انرژی حرارتی اهمیت فراوانی دارند؛ زیرا در اکثر یدیدههای فیزیکی که به همراه تغيير فاز هستند، اين فرآيند به صورت ناخواسته انجام می شود. این در حالی است که در واحدهای ذخیره کننده انرژی، هدف استفاده از گرمای نهان ذوب در طول فرآیند تغییر فاز است. به همین دلیل در سالهای اخیر سیستمهای ذخیره کننده انرژی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفتهاند. ظرفیت بالای ذخیرهسازی انرژی حرارتی باعث می شود تا امکان ساخت ذخیره کنندههای کوچک فراهم شود و بتوان آنها را بهصورت فشرده تولید کرد. این ویژگی مهم باعث می شود که این واحدها در کاربردهای تجاری و فضایی که معمولاً با محدودیت ابعادی مواجه هستند، استفاده فراوانی داشته باشند. به عنوان نمونه می توان از این سیستمها برای تأمین انرژی حرارتی ۲ در، تجهیزات فضایی و ماهوارهها و همچنین سیستمهای مخابراتی به کار برده شده در آنها استفاده کرد. مواد تغییر فاز دهنده به کار برده شده در این سیستمها PCM فاز نامیده می شود.

مسأله تغییر فاز برای اولین بار در اواخر قرن نوزدهم توسط استفان، با فرض انتقال حرارت هدایت یک بعدی حل شده است. به همین جهت امروزه به مسائل با تغییر فاز مسأله استفان نیز می گویند[۱]. اختلاف اصلی بین مسائل ذوب و انجماد با دیگر مسائل انتقال حرارت، وجود مرز مشترک متحرک بین دو فاز است. در طول فرآیند تغییر فاز، مرز مشترک بین فاز جامد و مایع متغیر بوده، شکل و اندازه آن در هر لحظه و مکان تغییر می کند. این مصائل، عموماً از یک روش عددی مناسب، برای حل این فرآیندها استفاده می شود. روش فوق، دارای کارایی بیشتر و مشکلات کمتری نسبت به دو روش تحلیلی و تجربی و مشکلات کمتری نسبت به دو روش تحلیلی و تجربی

<sup>1-</sup> Phase Change Material

تغییر فاز به دو گروه عمده حل عددی قوی و حل عددی ضعیف تقسیم میشوند. در حل عددی قوی، تأکید بر روی اعمال تکنیکهای انفصال ماننـد تفاضـلهای محـدود و اجزای محـدود بر روی فرمـول.بنـدی قـوی فرآینـد و بـه دسـت آوردن موقعیـت دقیـق مـرز متحـرک و نیـز گستردگی آن در هر لحظه است. در این روش با انتخـاب یک دستگاه مناسب، محیط فیزیکی به محیط محاسباتی تبـدیل میشود. با این شرایط میتوان معادلات هـر فـاز را جداگانه حل کرد. حل عددی قوی برای مسائل یک بعـدی اقابل استفاده است. در مسائل چندبعدی نیـز مـیتـوان بـا مستفاده از طـرحهـای پیچیـده و مشکل از ایـن روشها استفاده کرد. اعمال شرط غیر حطی در مـرز مشـترک فـاز جامد و مایع و ردگیری این مرز در هر لحظه، علـت اصـلی پیچیدگی بررسی این نوع مسائل است.

در روش حل عددی ضعیف، دیگـر لزومـی بـه بررسـی صريح فرآيند تغيير فاز نيست. اين دسته از روشها داراي انعطاف پذیری زیادی بوده و به راحتی به مسائل چندبعدی قابل تعمیم هستند. یکی از مهمترین روشهایی که در این دسته قرار می گیرد و در یژوهش حاضر مورد استفاده قـرار گرفته است، روش آنتالیی است. در این روش از شبکه ثابت استفاده می شود و معادلات حاکم به گونه ای تصحیح می شوند که در هر دو فاز معتبر باشند. در روش فوق مى توان بدون نياز به دانستن محل سطح مشترك، معادلات را در کل شبکه به طور همزمان حل کرد. مسأله اصلی در روش آنتالپی اعمال سرعت صفر در فاز جامد است. برای این منظور میتوان برای ویسکوزیته، تابعی در نظر گرفت که در مایع به ویسکوزیته مایع و در جامد به عدد بزرگی تبدیل شود. همچنین مے توان به معادلات مومنتم جملههایی افزود که در مایع، سرعت واقعی سیال و در جامد، سرعت صفر را نتیجه دهد. در سال ۱۹۷۴ اتهی' [۲] این روش را کاملتر کرد و در مقاله خود اصول کلی و روش فرمول بندی آن را توضیح داد. در سال ۱۹۸۱، ولر کو کراس [۳] توانستند یکی از دقیق ترین جواب ها را بر پایه روش آنتالیی به دست آورند. البته روش ارائه شده

1- Atthey

به وسیله آنها بیشتر برای مسائل یکبعدی کاربرد داشت و استفاده از این روش برای مسائل چندبعدی خالی از اشکال نبود. کائو<sup>†</sup> در سال ۱۹۸۹[۳] روش کاملتری را در این زمینه ارائه کرد. در این روش، در معادله انرژی، برخلاف کارهای قبلی، ترم جابجایی هم در نظر گرفته شده بود. این امر بخصوص در مسائلی که تغییر فاز و انتقال حرارت جابجایی هر دو با هم اتفاق میافتند، اهمیت بالایی دارد.

در این پژوهش انتقال حرارت در یک سیستم تغییر فاز دهنده به صورت عددی و با استفاده از روش آنتالپی مورد بررسی قرار گرفته است. مسأله انتقال حرارت در اینگونه سیستمها یک حالت دوگانه بین انتقال حرارت جابجایی اجباری و تغییر فاز است. سیستم مورد بحث بدین نحو کار میکند که ابتدا با ورود سیال گرم برای مدتی شارژ شده، سپس با عبور سیال سرد این سیستم بطور کامل دشارژ میشود. در ادامه نمودار توزیع دما، آنتالپی و ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیستم فوق در طول زمان شارژ و دشارژ به دست آمده و نتایج این دو حالت با هم مقایسه شدهاند.

۲ فرضیات انتقال حرارت در سیستم مورد بحث به صورت دوبعدی و ناپایدار فرض شده است. جریان سیال درون لوله داخلی غیر قابل تراکم و از نوع جریان آرام است. سیال ورودی به سیستم پروفیل دمای یکنواخت دارد و به صورت پروفیل توسعهیافته هیدرولیکی وارد میشود. دیوارههای خارجی سیستم عایق در نظر گرفته شده و انتقال حرارت در آن در راستای شعاعی متقارن است. از جابجایی آزاد در قسمت مایع PCM صرف نظر شده است. دمای اولیه سیستم ذخیره کننده انرژی، ثابت و به گونهای فرض شده است که PCM در حالت اولیه به صورت جامد است. در قسمت مربوط به اعمال زمان شارژ و دشارژ، فرض شده است که اگر دمای دورترین نقطه PCM نسبت به محل ورود سیال عامل، به ۹۸٪ دمای سیال ورودی برسد سیستم به صورت

<sup>2-</sup> Voller

<sup>3-</sup> Cross

**۳\_ معادلات حاکم** با توجه به فرضیات قسمت قبل شکل ساده شده معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی حاکم بر جریان سیال و ماده تغییر فازدهنده به صورت زیر بیان می شود[۵]: \_ سیال عامل

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (r \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \cdot \frac{\partial v_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} +$$

$$v \cdot \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right]$$
(Y)

$$\frac{\partial v_r}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} +$$

$$v \cdot \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] - \frac{v_r}{\rho} \right]$$
(7)

$$\begin{bmatrix} \partial x^2 & r & \partial r & \partial r \\ \partial r & r & r^2 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial r} + v_x \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + v_r \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} =$$

$$k = \begin{bmatrix} \partial^2 T_r & r & \partial r & \sigma \\ \partial r & \sigma & \sigma & \sigma \end{bmatrix}$$
(f)

$$\frac{\gamma_f}{c_f \cdot \rho_f} \cdot \left[ \frac{\partial I_f}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \cdot \frac{\partial I_f}{\partial r} \right] \right]$$

$$\rho_{w} \cdot c_{w} \cdot \frac{\partial T_{w}}{\partial \tau} = k_{w} \cdot \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^{2} T_{w}}{\partial x^{2}} \right], \qquad (\Delta)$$

PCM \_

$$\frac{\partial H_p}{\partial \tau} = k_p \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \right].$$
 (7)

درمعادلات فوق، H بیانگر آنتالپی در واحد حجم بوده و به دمای PCM وابسته است. این وابستگی در رابطه (۷) نشان داده شده است.

$$T = A \cdot H + B \tag{(Y)}$$

در رابطه (۷)، H و T دو متغیر وابستهای هستند که قابل تبدیل به هم میباشند. در ماده تغییر فازدهنده با توجه به تغییر فازی که در PCM صورت میگیرد، H به عنوان متغیر وابسته انتخاب می شود. سایر جملاتی که شامل درجه حرارت T هستند به عنوان جمله ی چشمه در نظر

گرفته می شوند، که مقدار آن در هر گام زمانی بر اساس مقدار آنتالپی مربوط به گام زمانی قبل تعیین می شود. ضرایب A و B را که در رابطه (۷) نشان داده شدهاند، می توان مطابق رابطه زیر به سه شکل مختلف زیر نشان داد[7]:

$$A = \frac{1}{\rho_s \cdot c_s}, \quad B = 0 \quad for \quad H_p < \rho_s \cdot c_s \cdot T_m,$$

$$A = 0, \quad B = T_m \quad for \quad 0 \le \frac{H_p - \rho_s \cdot c_s \cdot T_m}{\rho_L \cdot q} \le 1, \qquad (\Lambda)$$

$$A = \frac{1}{\rho_L \cdot c_L}, \quad B = T_m \cdot \left(1 - \frac{\rho_s \cdot c_s}{\rho_L \cdot c_L}\right) - \frac{q}{c_L} \quad for,$$

$$\frac{H_p - \rho_s \cdot c_s \cdot T_m}{\rho_L \cdot q} \ge 1.$$

$$h(x) = -\frac{k}{T_{m}(x) - T_{w}(x)} \times \frac{\partial T(r, x)}{\partial r}\Big|_{r=R},$$
(9)

(1-)

$$T_{m}(x) = \frac{\int\limits_{0}^{R} u(r)T(r,x)2\pi r dr}{\int\limits_{0}^{R} u(r)2\pi r dr} = \frac{\int\limits_{0}^{R} u(r)T(r,x)2\pi r dr}{U_{m}\pi R^{2}} ,$$

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k}$$
 (11)

$$0 \ll_{1} 0 \ll_{1} 0 \ll_{1} V_{X} = V_{r} = 0$$

$$0 < r < r_{o}, \quad 0 \le x \le L \quad T_{f} = T_{w} = T_{p} = T_{init}, \quad (1\%)$$

$$0 < r < r_i \quad x = 0 \quad v_x = v_{in}, v_r = 0, T_f = T_{in},$$
 (14)

$$r_{i} \leq r \leq r_{w} \quad x = 0 \quad \frac{\partial \Gamma_{w}}{\partial x} = 0 , \qquad (1\Delta)$$

$$r_w < r < r_o$$
  $x = 0$   $\frac{\partial \Gamma_p}{\partial x} = 0$ , (19)

$$0 < r < r_i \quad x = L \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_i}{\partial x} = 0, \quad (1 \forall)$$

$$r_{i} \leq r \leq r_{w} \quad x = L \quad \frac{\partial T_{w}}{\partial x} = 0,$$
 (1A)

$$r_{w} < r < r_{o} \quad x = L \quad \frac{\partial T_{p}}{\partial x} = 0,$$
 (19)

$$0 < x < L$$
  $v_x = v_r = 0, k_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} = k_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial r},$  (Y • )

$$0 < x < L$$
  $k_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial t} = k_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t},$  ((1))

 $(\mathbf{r} = \mathbf{r}_0)$ • ديواره بيرونى (

$$0 < x < L$$
  $\frac{\partial \Gamma_p}{\partial x} = 0.$  (YY)

### ۵\_ PCM انتخابی و سیال عامل

مواد تغییر فازدهنده استفاده شده در سیستمهای ذخیره کننده انرژی، PCM نامیده میشود. PCM محلولهایی هستند که برای کنترل درجه حرارت به کار میروند. این مواد به دلیل ذخیرهسازی انرژی در مدت زمان طولانی در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفتهاند. مواد تغییر فاز دهنده عموماً به دو دسته عمده

تقسیم می شوند. مواد با ترکیبات غیر آلی و مواد با ترکیبات آلی[۲].

مواد با ترکیبات غیر آلی که بیشتر از مواد آلی معمول می باشند، موادی هستند که ترکیبات کربن در ترکیب خود ندارند. این مواد در خنک کاری های شدید و در یدیدههایی که تغییرات دمایی منظم ندارند، مورد استفاده قــرار مـــى گيرنــد. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O و Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O نمونههایی از مواد با ترکیبات غیر آلی هستند. این مواد دارای نقطه ذوبی در حدود ۳۰ درجه سلسیوس، اندکی بالاتر از دمای آسایش انسان میباشند. PCMها هماکنون کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف پیدا کردهاند. در گذشته از این گونه مواد برای کاربردهای کاملاً تخصصی و در زمینههای خاص، مانند گرم نگهداشتن بعضی از واکنش ها در دمای بالا و یا برای ذخیره گرما در نیروگاهها استفاده میشد. هم اکنون با گسترش صنایع شیمیایی و تهیه مواد مرکب جدید، PCMها استفادههای زیادی در کاربردهای تجاری و فضایی پیدا کردهاند، مثلاً در بسیاری از موارد از PCMها به عنوان چاه حرارتی در صنایع برق و الکتر ونیک، سیستمهای مخابراتی و آنتنهای ماهوارهای استفاده می شود. همچنین از PCM ها برای تأمین گرمای مورد نیاز منازل مسکونی نیز استفاده میشود. PCMها همانطور که در بالا اشاره شد هـم اکنـون کـاربرد بسـیار زیادی در جهان دارند. با توجه به اهمیت مسأله بهینهسازی مصرف انرژی و سوخت در ساختمانها، از عمدہترین کاربردھای این مواد می توان به استفادہ از آنھا در سیستمهای ذخیره کننده انرژی در جهت تأمین گرما و انرژی مورد نیاز منازل مسکونی اشاره کرد.

در شکل ۱، نمونه کاملی از سیستمهای ذخیره کننده انرژی مورد استفاده در این زمینه نشان داده شده است. این سیستمها و مواد تغییر فاز دهنده موجود در آنها اکثراً در داخل ساختمان (ترجیحاً کف ساختمان) قرار داده میشوند. سیستمهای حرارتی نصب شده در کف ساختمان عمر طولانی دارند، به علاوه روش نصب، کاربرد و نگهداری آنها نیز آسان و ارزان است. از ویژگیهای بالای این سیستمها میتوان به ارزان بودن آنها در مقایسه با سوختهای فسیلی گرانقیمت، جلوگیری از متمرکز شدن هوای سرد در داخل ساختمانها، جلوگیری از گرمایش و معادلات دیفرانسیل (۶-۱) به هم وابسته هستند و باید

بهوسیله روشهای عددی به طور همزمان حل شوند.

انفصال معادلات فوق به روش حجم محدود بوده که حل

آنها بهوسیله پتنکار ارائه شده است[۱۰]. برای حل عددی

معادلات حاکم از الگوریتم سیمپل و در تبدیل معادلات

دیفرانسیل به معادلات جبری نیز از روش ضمنی استفاده

شده است. در نهایت معادلات جبری به دست آمده به

وسیله روش تکراری خطبهخط حل شدهاند. قابل ذکر

است که در حل عددی فوق در هر گام زمانی، تکرارهایی

تا رسیدن به جوابهای همگرا شده (وقتی خطای نسبی به

۰/۱٪ برسد) لازم است. برنامه کامپیوتری استفاده شده در
 این یژوهش برای گامهای زمانی ۲/۵ ۵ و ۱۰ ثانیه اجرا

شد و با توجه به اینکه نتایج حاصله بسیار به هم نزدیک

بودند، گام زمانی ۵ ثانیه بعنوان گام زمانی مناسب انتخاب

شد. شرط توقف برنامه در هر گام زمانی نیز به این صورت فرض شده که مقدار ماکزیمم باقیمانده جرمی برابـر<sup>۲</sup>-۱۰ و مقدار ماکزیمم تغییرات آنتالپی برابـر <sup>۲۰</sup>-۱۰ شـود. شـبکه مورد استفاده در این پژوهش از نوع سـازمان یافتـه است. مسأله مورد نظر ابتدا در یک شبکه اولیه حل شده و سپس

در ادامه پس از ریزتر شدن شبکه، حل آن تکرار می شود. این کار تا زمانی که نتایج حاصل از شبکه انتخابی مستقل شوند، ادامه پیدا خواهد کرد. در این روش شبکه منطبق بر مرزهای سیستم است که با فیزیک و جهت جریان متناسب است. فواصل گرهها در شبکه به کار برده شده نیز با توجه به نواحی که تغییر خواص در آنها زیاد است تغییر می کند. در این پژوهش محاسبات در شش شبکه مختلف مطابق جدول ۳ انجام گرفت و در نهایت تعداد شبکه

**۶\_ حل عددی** 

سرمایش متناوب در ساختمان، از بین بردن تشعشعهای زیان آور، کم خطر بودن آنها در مقایسه با سایر سیستمهای حرارتی، نصب و راهاندازی آسان و ارزان، هزینه تعمیر و نگهداری کمتر، عمر طولانی و قدرت ذخیره سازی بالای آنها اشاره کرد[۸].

CaCl<sub>2</sub>,6H<sub>2</sub>O انتخابی در این پژوهش بر پایه O<sub>2</sub>O ازائه شده بوده و مشخصات آن به طور کامل در مرجع [۹] ارائه شده است. همچنین برای همخوانی بیشتر موضوع مورد بحث با مصارف تجاری، سیال عامل انتخابی، آب در نظر گرفته شده است. اعداد بدون بعد و مشخصات PCM انتخابی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتهاند، درجداول ۱ و ۲ آورده شده اند [۷].



شکل۱**ـ** نمونهای از کاربرد PCMها در منازل مسکونی.

Pe	2782	$\frac{kL}{kS}$	0.53
$\frac{CLTenv}{q}$	3.22	$\frac{T_{in.c}}{T_{env}}$	1.19
$\frac{(\rho_s C_s)}{(\rho_L C_L)}$	0.676	Tin.d Tenv	1
$\frac{\left(\rho f C f\right)}{\left(\rho L C L\right)}$	1.27	R e	398

پژوهش.	بعد	بدون	۱_ اعداد	جدول
--------	-----	------	----------	------

آزمایشگاهی	نتايج	مقايسه	_٧

به دلیل عدم وجود نتایج تجربی، صحت عملکرد روش انجام این پژوهش از طریق آزمایشی که توسط کشاورز و همکاران وی انجام گرفت[۱۱٫۷]، مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش انجام شده شامل بررسی وضعیت دمایی یک

انتخابی ۳۰×۳۰۰ در حالت دوبعدی انتخاب شد[۷] .

1-SIMPLE

# جدول۲- خواص ماده تغييرفازدهنده.

q	187 <u>kj</u> kg	KL	$0.53 \frac{W}{m.k}$
ρL	$1530 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Ks	$1.09 \frac{W}{mk}$
ρs	$1710 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	CL	$2.2 \frac{\text{kj}}{\text{kg.k}}$
Tm	303k	Cs	$1.4 \frac{kj}{kg.k}$

ذخیره کننده حرارتی است که توسط آب گرم و آب سرد به ترتیب شارژ و دشارژ می شود. سیستم ذخیره کننده مورد آزمایش از یک استوانه از جنس برنج تشکیل شده است که قطر داخلي و خارجي آن به ترتيب برابر ۸ و ۳۹ ميليمتر و طول آن نیز برابر ۲۰۰ میلیمتر میباشد. در این آزمایش با فرض قرار گرفتن مبدا مختصات استوانهای در نقطه ورود سیال به سیستم اندازه گیری دما در چهار مقطع انجام می شود. در هر یک از این نقاط توسط سه سنسور دما (ترموکویل) از نوع k ، در شعاعهای متفاوت دمای استوانه برنجی در طول زمان شارژ و دشارژ اندازه گرفته می شود. برای اندازه گیری دمای نقاط داخلی، سوراخهایی روی استوانه تعبیه شده است. با توجه به اینکه انتقال حرارت سیستم در راستای شعاعی متقارن میباشد، برای سهولت اندازه گیری دمای نقاط مختلف سیستم در طولهای ثابت، سوراخهایی در زوایای متفاوت ایجاد شده است. استوانه یس از کار گذاشتن ترموکوپلها از محیط اطراف عایق میشود. نحوه کـار بـه این صورت است که ابتدا جسم استوانهای در دمای محیط قرار داده شده، سـپس آب گـرم وارد سیسـتم مـیشـود و قطعه استوانهای را به طور کامل شارژ می کند. در طول این پروسه سنسورهای حرارتی دمای نقاط مختلف استوانه و دمای آب خروجی و ورودی را در هـ لحظه بـ ه دسـتگاه گیرنده اطلاعات انتقال میدهند و سپس دستگاه مذکور، اعداد را دستهبندی کرده و در هر ۱۰ ثانیه دما را به کامپیوتر منتقل می کند. در شکل ۲ و ۳ تصویری از قطعه مورد آزمایش و همچنین طریقهٔ اتصال سنسورها به کامپیوتر و شماتیک نحوه انجام آزمایش نشان داده شده است. شکل ۴ و ۵ مقایسه نتایج تئوری و عملے را نشان مى دهد و همان طور كه ملاحظه مى شود تطبيق جواب ها بسیار خوب است. نتایج حاصله نشان دهنده دقت قابل قبول تئوري استفاده شده است[ ۱۱٫۷].

## جدول۳\_مقایسه زمان شارژ و دشارژ سیستم در شبکههای

مختلف.

زمان دشارژ سیستم بر حسب ثانیه	زمان شارژ سیستم بر حسب ثانیه	تعداد شبکه
١٨٢	۱۹۵	1 • • × 1 •
۱۹۵	7.4	۱۵·×۱۵
۲ • ۵	<b>T I T</b>	7 • • × 7 •
714	22.	۲۵·×۲۵
77.	222	۳۰۰×۳۰
۲۲.	222	۳۵۰×۳۵



شکل۲\_قطعه مورد آزمایش و نحوه قرارگیری ترموکوپلها.





شكل۴ ـ مقايسه بين جوابهاي عددي و آزمايشگاهي [7,11].



شکل۵- مقایسه بین جوابهای عددی و آزمایشگاهی[7,11].

## ۸\_ نتایج عددی

شکل هندسی مساله در شکل ۶ نشان داده شده است. در این پژوهش با توجه به فرضیات اولیه، در حالت شارژ دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده بالاتر از دمای محیط در نظر گرفته شده است. از آنجایی که دمای اولیه نیز به صورت متعادل با دمای محیط است، بنابراین در حالت مروع فرآیند شارژ ماده تغییر فاز دهنده به صورت جامد میباشد. به همین ترتیب در شروع فرآیند دشارژ نیز چون دمای اولیه سیستم بالاتر از دمای محیط است، این ماده به شکل مایع خواهد بود.



با شروع عمل شارژ، زمانی که ماده تغییر فاز دهنده مجاور مرز سیال عامل شروع به ذوب می کند، شکستگیهایی در پروفیلهای دما به وجود می آید. این شکستگیها در پروفیلهای آنتالپی محسوس تر است.

شکستگیهای ایجاد شده با گذشت زمان و افزایش دمای ماده تغییر فازدهنده، جابجا شده؛ پس از ذوب کامل، شکستگی کاملاً از بین میرود. در این حالت پروفیلهای مورد نظر به طور کامل یکنواخت شده و حالت سهموی به خود می گیرند. حالت دشارژ نیز مشابه حالت شارژ است. در شکلهای ۱۰–۷ پروفیلهای دما و آنتالپی در یک مقطع خاص از ماده تغییر فازدهنده، در حالتهای شارژ و دشارژ نشان داده شده است.





شکل ۸\_ توزیع آنتالپی در حالت شارژ.



در ادامه نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابج ایی در سیستم ذخیره کننده مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل **۱۱** توزیع ضریب انتقال حرارت جابج ایی نسبت به زمان در طی فرآیند شارژ در سه مقطع خاص از سیستم مورد نظر نشان داده شده است. این منحنی ها دارای سه مرحل ه هستند. در مرحل وال ضریب انتقال حرارت جابجایی با شیب خیلی تندی سیر صعودی دارد. علت این افزایش تماس سیال عامل با دیوارههای سرد جداره است. به علت تفاوت زیاد دمای سیال ورودی با دمای دیواره، این

ضریب به شدت افزایش پیدا می کند. با شروع مرحله دوم، دمای ماده تغییر فاز دهنده تا دمای ذوب بالا رفته است. در زمان ذوب، دما در ماده تغییر فاز دهنده تا حدودی ثابت مىماند. اين امر باعث مىشود ضريب انتقال حرارت نیز مقدار ثابتی داشته باشد. این مرحله تا زمانی ادامه مى يابد كه غالب مواد تغيير فاز دهنده بالاخص نقاط نزدیک به مرز سیال عامل ذوب شوند. به دلیل نزدیکی دمای اولیه به دمای ذوب، مرحله دوم به سرعت اتفاق می افتد. به دلیل سرعت عمل ذوب، این مرحله زیاد در شکل محسوس نیست. در مرحله سوم شیب منحنی، اندكي افزايش پيدا ميكند و اين افزايش تا زمان شارژ كامل ادامه خواهد داشت. درمرحله مورد نظر، ابتدا انرژى سیال عامل صرف گرم کردن فاز مایع و همچنین تغییر فاز قسمت جامد به فاز مایع می شود و سیس یس از ذوب كامل ماده تغيير فاز دهنده، صرف گرم كردن فاز مايع مىشود.



شکل۱۱ـ توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیستم ذخیرهکننده انرژی نسبت به زمان شارژ.

در شکل **۱۲** نیز توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به زمان دشارژ در چند مقطع خاص از سیستم مورد نظر نشان داده شده است. این منحنی دارای چهار مرحله میباشد. در مرحله اول همانند حالت شارژ ضریب انتقال حرارت جابجایی با شیب خیلی تندی، سیر صعودی دارد. علت این افزایش، تماس سیال عامل با دیوارههای گرم در هنگام فرآیند تغییر فاز مرز میان دو فاز به طور آشکار مشخص نیست، بنابراین در این پژوهش برای مشاهده مرز تغییر فاز، ضریبی به نام Liquid Fraction که به اختصار  $\beta$  نامیده میشود، به صورت رابطه (۲۳) تعریف میشود. در فاز مایع این ضریب برابر یک بوده و در کانتور نتایج با رنگ قرمز تعریف میشود.این ضریب در فاز جامد برابر صفر است و در کانتور نتایج با رنگ آبی مشخص میشود. در ناحیه دو فازی این ضریب بین صفر و یک قرار داشته و در کانتور نتایج با انواع مختلف رنگها نمایش داده میشود که هر رنگ بیانگر یک عدد برای این ضریب است. مقدار گرمای نهان ماده تغییر فاز دهنده نیز بین صفر (حالت جامد) و q (حالت مایع) بصورت زیر متغیر میباشد:





با گذشت زمان این مرز به سـمت قسـمتهـای بـالاتر استوانه رفته و اگر مدت زمان به اندازه کـافی زیـاد باشـد، این مرز به شعاع خارجی استوانه خواهد رسـید، در نهایـت

1-Liquid Fraction

جداره است. با شروع مرحله دوم، سیال عامل یس از گرفتن انرژی حرارتی از ماده تغییر فاز دهنده پیوسته گرمتر می شود و ماده تغییر فاز دهنده شروع به سرد شدن میکند. این سرد شدن تا آنجایی ادامه پیدا میکند که ماده تغییر فاز دهنـده به دمای انجماد نزدیک شود. در این مرحله ضریب انتقال حرارت جابجایی با شیب نسبتاً كمترى نسبت به حالت اول افزايش پيدا مىكند. با نزديك شدن دمای ماده تغییر فاز دهنده به دمای انجماد و شروع عمل انجماد، ضریب انتقال حرارت ثابت میماند. در ادامه فرآیند، مرحــله سوم شروع می شود. در ایـن حالـت سیال سرد شروع به گرفتن انرژی از گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز دهنده می کند. در این مرحله که غالب ماده تغییر فاز دهنده به صورت منجمد شده است، سیال سرد دو عمل را انجام میدهد، یکی سرد کردن فاز جامد ماده تغییر فازدهنده و دیگری منجمد کردن قسمتهای باقی مانده فاز مایع آن. در این مرحله ضریب انتقال حرارت جابجایی با شیب نسبتاً بالایی افزایش پیدا میکند. در نهایت مرحله چهارم شروع میشود. در مرحله مورد نظر که نسبت بیشتری از ماده تغییر فاز دهنـده منجمـد شـده است، سیال سرد بخش زیادی از فاز جامد ماده تغییر فاز دهنده و مقدار کمی از قسمتهای باقیمانده فاز مایع را تا انجماد كامل سرد مي كند. اين عمل تا انجماد كامل ماده تغییر فاز دهنده ادامه پیدا می کند. در این مرحله ضریب انتقال حرارت جابجایی با شیب کمتری نسبت به مرحله سوم افزایش ییدا می کند.

نکته مهمی که باید در نظر داشت تفاوت اساسی رفتارهای پریودهای شارژ و دشارژ است. به همین جهت برای بهینهسازی سیستم، مرحله دشارژ را نباید فراموش کرد. به عنوان مثال در یکی از تحقیقات قبلی[۵] فقط مرحله شارژ سیستم در نظر گرفته شده بود که با توجه به نتایج پژوهش، مشخص شد که این کار باعث می شود فقط یک قسمت از جوابهای مسأله مورد تحقیق درست باشد.

### ۹\_ مشاهده پدیده تغییر فاز

برای تحلیل فرآیند تغییر فاز در مواد تغییر فازدهنده از یک روش عددی به نام روش آنتالپی کـه در قسمتهای قبل توضیح داده شد، استفاده شده است[۷]. به طور کلی

تمام ماده تغییر فاز دهنده تبدیل به مایع خواهد شد.

در شکل **۱۴** نیز کانتورهای رنگی نسبت مایع در زمانهای مختلفی از حالت دشارژ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود انجماد ماده تغییرفازدهنده بر خلاف حالت ذوب بهصورت جبههای صورت می گیرد و خط انجماد برخلاف خط ذوب به صورت نامنظم و سهمویوار در ماده تغییرفازدهنده، تغییر می کند.

# ۱۰\_ نتیجه گیری

در این تحقیق، نشان داده شده که: ۱- در روش آنتالپی لازم نیست هیچ شرطی در مرز تغییر فاز اعمال شود و همچنین لزومی به تعیین دقیق محل تغییر فاز و دنبال کردن آن وجود ندارد. ۲- در روش آنتالپی احتیاجی به در نظر گرفتن نواحی مختلف در دو طرف مرز تغییر فاز وجود ندارد. ۳- نکته مهمی که باید در نظر داشت تفاوت اساسی رفتارهای پریودهای شارژ و دشارژ است. به همین دلیل

برای بهینهسازی سیستم، مرحله دشارژ را نباید فراموش کرد.

۴- برخلاف مسائل از نوع هدایت خالص، تعداد تکرار لازم برای همگرایی در هر گام زمانی نه تنها با گذشت زمان کاهش نمییابد، بلکه کاملاً نوسانی است. این امر به واسطه طبیعت غیر خطی پدیدهٔ تغییر فاز است، همچنین پس از پایان هر مرحله و شروع مرحله بعدی تعداد تکرارهای لازم افزایش مییابد که این امر نیز به خاطر تغییر ناگهانی شرایط مرزی است.

۵ـ در انتهای حالت خالی شدن، دیده می شود که تعداد تکرارهای لازم با گذشت زمان کاهش می یابد و اثری از نوسان در آن دیده نمی شود. این مسأله به خاطر آن است که به علت کم شدن اختلاف دمای بین سیال عامل و ماده تغییر فازدهنده، انتقال حرارت بین این دو محیط کاهش می یابد.



TETA=1.061 شکل۱۳ـ مراحل شارژ ماده تغییر فاز دهنده.



Store", Faculty of Eng. Univ. of Rijeka, Vukovarska 58, HR-51000 Rijeka, Croatia, Europe.

۲- پیرکندی، ج. و کشاورز، ع. " بررسی تأثیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در بهینه سازی سیستمهای ذخیره کننده انرژی "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۸۱.

8. www.teappcm.com,www.phasechangematerial. com."Energy Saving Phase Change Materials for Electronic Enclosures for More Information",

9. "PCM Thermal Solutions guide Manual ", 1163 E. Ogden Ave Suite 705-345 Naperville, IL 60563.

10. Patankar. S.V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, D.C., 1980.

۱۱- مصطفوی، آ. و کشاورز، ع. " بهینهسازی سیستمهای ذخیره کننده انرژی با در نظر گرفتن زمان آدیاباتیک"، پایانانامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۰.  KeungChiu, C. and Caldwell, J. "Application of Broydens Method to the Enthalpy Method for Phase Change Problems", Num. Heat Transfer, Part. A,Vol.30,No.8, pp.575-587, 1996.

- 2. Problems Based on the Method of Weak Solutions in Moving Boundary Problems in Heat Flow and Diffusion", Oxford University Press, pp. 182-191, 1975.
- Voller, V. and Cross, M. "Accurate Solution of Moving Boundary Problems Using the Enthalpy Method", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, No.12, pp. 545-556, 1981.
- Cao, Y., Faghri, A., and Chang, W.S. "A Numerical Analysis of Stefan Problems for Generalized Multi-dimensional Phase Change Structures, Using the Enthalpy Transforming Model", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp. 1289-1298, 1989.
- 5. Bejan, A. "Entropy Generation Minimization", CRC Press, 1996.
- 6. Frankovic, B. and Lenic, K. "An Analysis of Phase Change Heat Transfer in a Solar Thermal Energy

مراجع