

# مطالعه عددی فرآیند تغییر فاز در سیستم‌های ذخیره کننده انرژی با استفاده از روش آنتالپی

جاماسب پیرکندی<sup>۱</sup>

مجتمع دانشگاهی هوا فضا  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

علی کشاورز<sup>۲</sup> و مسعود ضیاء بشرحق<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## چکیده

در این پژوهش، فرآیند انتقال حرارت در یک سیستم ذخیره کننده انرژی با استفاده از روش آنتالپی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این 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 در محیط 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 ذخیره کننده انرژی، 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 دو حالت شارژ و دشارژ به خوبی نشان می‌دهد.

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

۱- مری (نویسنده پاسخگو): jamasb@engineer.com

۲- دانشیار: keshavarz@ksu.edu

۳- استادیار: mzia@kntu.ac.ir

## فهرست علائم

## 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 پدیده‌های فیزیکی که به همراه تغییر فاز هستند، این فرآیند به صورت ناخواسته انجام می‌شود. این در حالی است که در واحدهای ذخیره‌کننده انرژی، هدف استفاده از گرمای نهان ذوب در طول فرآیند تغییر فاز است. به همین دلیل در سال‌های اخیر سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی باعث می‌شود تا امکان ساخت ذخیره‌کننده‌های کوچک فراهم شود و بتوان آنها را به صورت فشرده تولید کرد. این ویژگی مهم باعث می‌شود که این واحدها در کاربردهای تجاری و فضایی که معمولاً با محدودیت ابعادی مواجه هستند، استفاده فراوانی داشته باشند. به عنوان نمونه می‌توان از این سیستم‌ها برای تأمین انرژی حرارتی 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<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

مسئله 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 مسئله استفان نیز می‌گویند [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 می‌کند. این امر باعث پیچیدگی تجزیه و تحلیل این نوع فرآیند می‌شود. به علت وجود مشکلات پیچیده در تحلیل این نوع مسائل، عموماً از یک روش عددی مناسب، برای حل این فرآیندها استفاده می‌شود. روش فوق، دارای کارایی بیشتر و مشکلات کمتری نسبت به دو روش تحلیلی و تجربی است. روش‌های عددی مورد استفاده برای بررسی فرآیند

C	گرمای مخصوص
H	آنتالپی مخصوص
q	گرمای نهان
D	قطرلوله
D <sub>h</sub>	قطر هیدرولیکی
V	سرعت سیال
U <sub>m</sub>	سرعت میانگین
X	مختصات محوری
r	شعاع لوله
T	دما
T <sub>m</sub>	دما ذوب
v	ویسکوزیته سینماتیکی
τ	زمان
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
k	ضریب انتقال حرارت هدایتی
Nu	عدد ناسلت
Pe	عدد پکلت
Re	عدد رینولدز
T*	طول بی‌بعد
H*	آنتالپی بی‌بعد
T*	دمای بی‌بعد
TETA	زمان بی‌بعد $TETA \equiv (KL \cdot Tenv \tau) / (\rho_L \cdot q \cdot D^2)$

## زیر نویس‌ها

f	سیال
i	شعاع داخلی
o	شعاع خارجی
in	ورودی
env	محیط
init	اولیه
L	فاز مایع
s	فاز جامد
w	دیواره
c	شارژ
d	دشارژ
P	ماده تغییر فاز دهنده

به وسیله آنها بیشتر برای مسائل یک‌بعدی کاربرد داشت و استفاده از این روش برای مسائل چندبعدی خالی از اشکال نبود. کائو<sup>۴</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 ذخیره‌کننده 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 کامل شارژ یا دشارژ خواهد شد.

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 مانند تفاضل‌های محدود و اجزای محدود بر روی فرمول‌بندی قوی فرآیند و به دست آوردن موقعیت دقیق مرز متحرک و نیز گستردگی آن در هر لحظه است. در این روش با انتخاب یک دستگاه مناسب، محیط فیزیکی به محیط محاسباتی تبدیل می‌شود. با این شرایط می‌توان معادلات هر فاز را جداگانه حل کرد. حل عددی قوی برای مسائل یک‌بعدی قابل استفاده است. در مسائل چندبعدی نیز می‌توان با استفاده از طرح‌های پیچیده و مشکل از این روش‌ها استفاده کرد. اعمال شرط غیرخطی در مرز مشترک فاز جامد و مایع و ردگیری این مرز در هر لحظه، علت اصلی پیچیدگی بررسی این نوع مسائل است.

در روش حل عددی ضعیف، دیگر لزومی به بررسی صریح فرآیند تغییر فاز نیست. این دسته از روش‌ها دارای انعطاف‌پذیری زیادی بوده و به راحتی به مسائل چندبعدی قابل تعمیم هستند. یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که در این دسته قرار می‌گیرد و در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، روش آنتالپی است. در این روش از شبکه ثابت استفاده می‌شود و معادلات حاکم به گونه‌ای تصحیح می‌شوند که در هر دو فاز معتبر باشند. در روش فوق می‌توان بدون نیاز به دانستن محل سطح مشترک، 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 می‌توان به معادلات مومنتم جمله‌هایی افزود که در مایع، سرعت واقعی سیال و در جامد، سرعت صفر را نتیجه دهد. در سال ۱۹۷۴ اتھی<sup>۱</sup> [۲] این روش را کامل‌تر کرد و در مقاله خود اصول کلی و روش فرمول‌بندی آن را توضیح داد. در سال ۱۹۸۱، ولر<sup>۲</sup> و کراس<sup>۳</sup> [۳] توانستند یکی از دقیق‌ترین جواب‌ها را بر پایه روش آنتالپی به دست آورند. البته روش ارائه شده

1- Atthey

2- Voller

3- Cross

4- Cao

گرفته می‌شوند، که مقدار آن در هر گام زمانی بر اساس مقدار آنتالپی مربوط به گام زمانی قبل تعیین می‌شود. ضرایب A و B را که در رابطه (۷) نشان داده شده‌اند، می‌توان مطابق رابطه زیر به سه شکل مختلف زیر نشان داد [۶]:

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

$$A = 0, \quad B = T_m \quad \text{for } 0 \leq \frac{H_p - \rho_s \cdot c_s \cdot T_m}{\rho_L \cdot q} \leq 1, \quad (8)$$

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

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

در ادامه، برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز از معادلات زیر استفاده می‌شود:

$$h(x) = -\frac{k}{T_m(x) - T_w(x)} \times \left. \frac{\partial T(r, x)}{\partial r} \right|_{r=R}, \quad (9)$$

$$T_m(x) = \frac{\int_0^R u(r) T(r, x) 2\pi r dr}{\int_0^R u(r) 2\pi r dr} = \frac{\int_0^R u(r) T(r, x) 2\pi r dr}{U_m \pi R^2}, \quad (10)$$

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

#### ۴- اعمال شرایط مرزی

کلیه مسائل CFD با شرایط اولیه و شرایط مرزی تعریف می‌شوند. نکته مهم تعریف مناسب و درک رابطه آنها در الگوریتم عددی است. در این قسمت شرایط اولیه و همین‌طور شرایط موجود در مرزهای سیستم، مورد بررسی قرار می‌گیرند:

- شرایط اولیه ( $\tau = 0$ ):

$$0 < x < L, \quad 0 \leq r \leq R, \quad V_x = V_r = 0 \quad (12)$$

$$0 < r < r_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad T_f = T_w = T_p = T_{init}, \quad (13)$$

#### 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 می‌شود [۵]:

- سیال عامل

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

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

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

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

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

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

$$\frac{k_f}{c_f \cdot \rho_f} \cdot \left[ \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \right]$$

- دیواره

$$\rho_w \cdot c_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial \tau} = k_w \cdot \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \right], \quad (5)$$

PCM -

$$\frac{\partial H_p}{\partial \tau} = k_p \cdot \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \right]. \quad (6)$$

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

$$T = A \cdot H + B \quad (7)$$

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 می‌شود. سایر جملاتی که شامل درجه حرارت T هستند به عنوان جمله‌ی چشمه در نظر

- شرایط مرزی ( $\tau > 0$ ):  
• ورودی

تقسیم می‌شوند. مواد با ترکیبات غیرآلی و مواد با ترکیبات آلی [۷].

مواد با ترکیبات غیرآلی که بیشتر از مواد آلی معمول می‌باشند، موادی هستند که ترکیبات کربن در ترکیب خود ندارند. این مواد در خنک‌کاری‌های شدید و در پدیده‌هایی که تغییرات دمایی منظم ندارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند.  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  و  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  نمونه‌هایی از مواد با ترکیبات غیرآلی 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 واکنش‌ها در دمای بالا و یا برای ذخیره گرما در نیروگاه‌ها استفاده می‌شد. هم‌اکنون 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 الکترونیک، سیستم‌های مخابراتی و آنتن‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شود. همچنین از PCMها برای تأمین گرمای مورد نیاز منازل مسکونی نیز استفاده می‌شود. PCMها همان‌طور که در بالا اشاره شد هم‌اکنون کاربرد بسیار زیادی در جهان دارند. با توجه به اهمیت مسأله بهینه‌سازی مصرف انرژی و سوخت در ساختمان‌ها، از عمده‌ترین کاربردهای این مواد می‌توان به استفاده از آنها در سیستم‌های ذخیره‌کننده 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

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

$$r_i \leq r \leq r_w \quad x=0 \quad \frac{\partial T_w}{\partial x} = 0, \quad (15)$$

$$r_w < r < r_o \quad x=0 \quad \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0, \quad (16)$$

• خروجی

$$0 < r < r_i \quad x=L \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \frac{\partial T_i}{\partial x} = 0, \quad (17)$$

$$r_i \leq r \leq r_w \quad x=L \quad \frac{\partial T_w}{\partial x} = 0, \quad (18)$$

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

• سطح جداکننده سیال و دیواره ( $r = r_i$ )

$$0 < x < L \quad v_x = v_r = 0, k_f \frac{\partial T_f}{\partial r} = k_w \frac{\partial T_w}{\partial r}, \quad (20)$$

• سطح جداکننده دیواره و PCM ( $r = r_w$ )

$$0 < x < L \quad k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = k_p \frac{\partial T_p}{\partial r}, \quad (21)$$

• دیواره بیرونی ( $r = r_o$ )

$$0 < x < L \quad \frac{\partial T_p}{\partial r} = 0. \quad (22)$$

## ۵- PCM انتخابی و سیال عامل

مواد تغییر فاز دهنده 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

## ۶- حل عددی

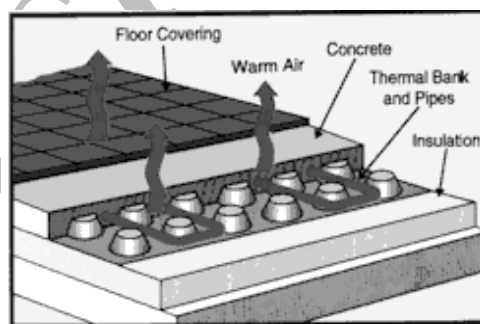
معادلات دیفرانسیل (۶-۱) به هم وابسته هستند و باید به وسیله روش‌های عددی به طور همزمان حل شوند. انفصال معادلات فوق به روش حجم محدود بوده که حل آنها به وسیله پتکار ارائه شده است [۱۰]. برای حل عددی معادلات حاکم از الگوریتم سیمپل<sup>۱</sup> و در تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری نیز از روش ضمنی استفاده 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 ۱/۰٪ برسد) لازم است. برنامه کامپیوتری استفاده شده در این پژوهش 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 برابر  $10^{-7}$  و مقدار ماکزیمم تغییرات آنتالپی برابر  $10^{-6}$  شود. شبکه مورد استفاده در این پژوهش از نوع سازمان یافته است. مسأله مورد نظر ابتدا در یک شبکه اولیه حل شده و سپس در ادامه پس از ریزتر شدن شبکه، حل آن تکرار می‌شود. 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 می‌کند. در این پژوهش محاسبات در شش شبکه مختلف مطابق جدول ۳ انجام گرفت و در نهایت تعداد شبکه انتخابی  $30 \times 30$  در حالت دوبعدی انتخاب شد [۷].

## ۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی

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

سرمایش متناوب در ساختمان، از بین بردن تشعشع‌های زیان‌آور، 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].

PCM انتخابی در این پژوهش بر پایه  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  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، در جداول ۱ و ۲ آورده شده اند [۷].



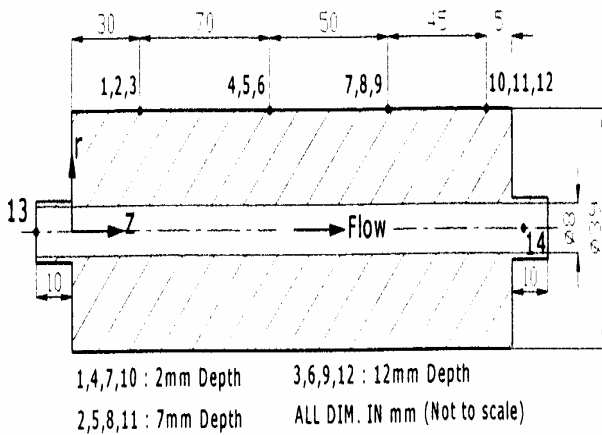
شکل ۱- نمونه‌ای از کاربرد PCM ها در منازل مسکونی.

جدول ۱- اعداد بدون بعد پژوهش.

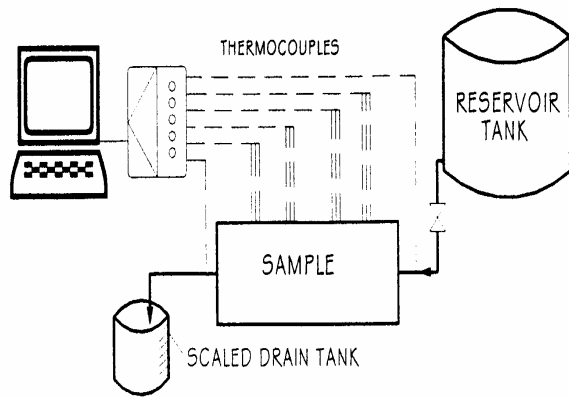
Pe	2782	$\frac{kL}{kS}$	0.53
$\frac{CLT_{env}}{q}$	3.22	$\frac{T_{in,c}}{T_{env}}$	1.19
$\frac{(\rho_s C_s)}{(\rho LCL)}$	0.676	$\frac{T_{in,d}}{T_{env}}$	1
$\frac{(\rho f C_f)}{(\rho LCL)}$	1.27	Re	398

جدول ۲- خواص ماده تغییر فاز دهنده.

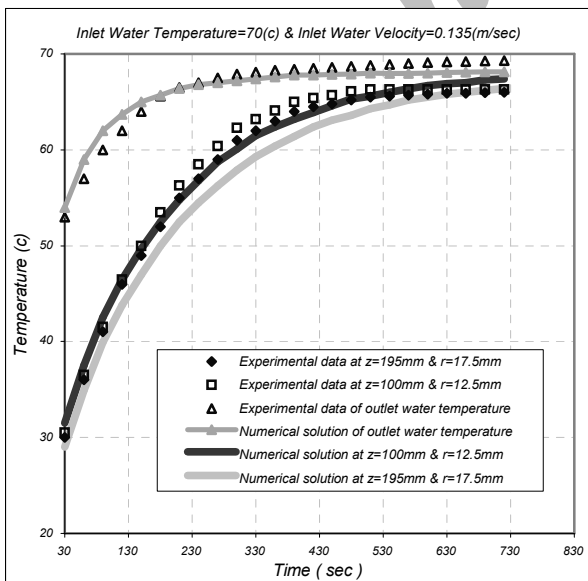
q	$187 \frac{kJ}{kg}$	$K_L$	$0.53 \frac{w}{m.k}$
$\rho L$	$1530 \frac{kg}{m^3}$	$K_s$	$1.09 \frac{w}{mk}$
$\rho s$	$1710 \frac{kg}{m^3}$	CL	$2.2 \frac{kJ}{kg.k}$
$T_m$	303k	$C_s$	$1.4 \frac{kJ}{kg.k}$



شکل ۲- قطعه مورد آزمایش و نحوه قرارگیری ترموکوپل‌ها.



شکل ۳- شماتیک آزمایش و تجهیزات مربوطه.



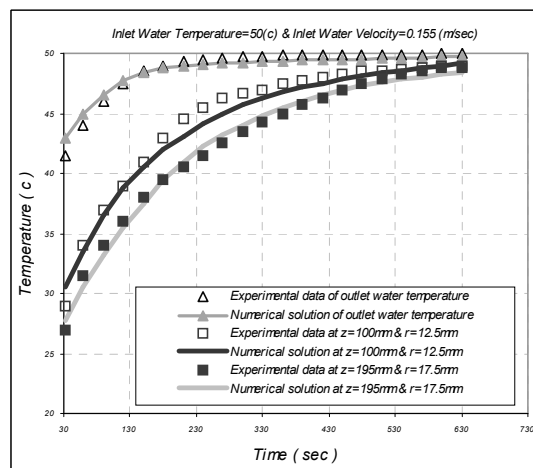
شکل ۴- مقایسه بین جواب‌های عددی و آزمایشگاهی [7,11].

ذخیره‌کننده حرارتی است که توسط آب گرم و آب سرد به ترتیب شارژ و دشارژ می‌شود. سیستم ذخیره‌کننده مورد آزمایش از یک استوانه از جنس برنج تشکیل شده است که قطر داخلی و خارجی آن به ترتیب برابر ۸ و ۳۹ میلی‌متر و طول آن نیز برابر ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در این آزمایش با فرض قرار گرفتن مبدا مختصات استوانه‌ای در نقطه ورود سیال به سیستم اندازه‌گیری دما در چهار مقطع انجام می‌شود. در هر یک از این نقاط توسط سه سنسور دما (ترموکوپل) از نوع  $k$ ، در شعاع‌های متفاوت دمای استوانه برنجی در طول زمان شارژ و دشارژ اندازه گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای نقاط داخلی، سوراخ‌هایی روی استوانه تعبیه شده است. با توجه به اینکه انتقال حرارت سیستم در راستای شعاعی متقارن می‌باشد، برای سهولت اندازه‌گیری دمای نقاط مختلف سیستم در طول‌های ثابت، سوراخ‌هایی در زوایای متفاوت ایجاد شده است. استوانه پس از کار گذاشتن ترموکوپل‌ها از محیط اطراف عایق می‌شود. نحوه کار به این صورت است که ابتدا جسم استوانه‌ای در دمای محیط قرار داده شده، سپس آب گرم وارد سیستم می‌شود و قطعه استوانه‌ای را به طور کامل شارژ می‌کند. در طول این پروسه سنسورهای حرارتی دمای نقاط مختلف استوانه و دمای آب خروجی و ورودی را در هر لحظه به دستگاه گیرنده اطلاعات انتقال می‌دهند و سپس دستگاه مذکور، اعداد را دسته‌بندی کرده و در هر ۱۰ ثانیه دما را به کامپیوتر منتقل می‌کند. در شکل ۲ و ۳ تصویری از قطعه مورد آزمایش و همچنین طریقه اتصال سنسورها به کامپیوتر و شماتیک نحوه انجام آزمایش نشان داده شده است. شکل ۴ و ۵ مقایسه نتایج تئوری و عملی را نشان می‌دهد و همان‌طور که ملاحظه می‌شود تطبیق جواب‌ها بسیار خوب است. نتایج حاصله نشان‌دهنده دقت قابل قبول تئوری استفاده شده است [7,11].

جدول ۳- مقایسه زمان شارژ و دشارژ سیستم در شبکه‌های مختلف.

تعداد شبکه	زمان شارژ سیستم بر حسب ثانیه	زمان دشارژ سیستم بر حسب ثانیه
۱۰×۱۰۰	۱۹۵	۱۸۲
۱۵×۱۵۰	۲۰۴	۱۹۵
۲۰×۲۰۰	۲۱۲	۲۰۵
۲۵×۲۵۰	۲۲۰	۲۱۴
۳۰×۳۰۰	۲۲۵	۲۲۰
۳۵×۳۵۰	۲۲۵	۲۲۰

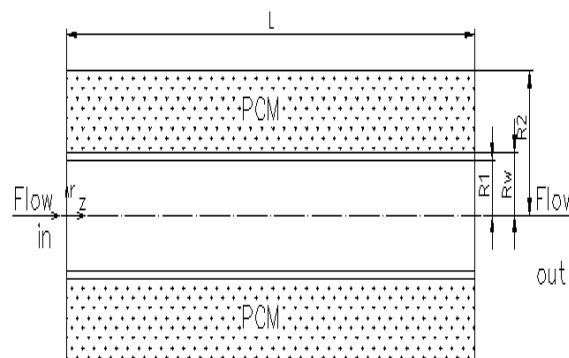
شکستگی‌های ایجاد شده با گذشت زمان و افزایش دمای ماده تغییر فازدهنده، جابجا شده؛ پس از ذوب کامل، شکستگی کاملاً از بین می‌رود. در این حالت پروفیل‌های مورد نظر به طور کامل یکنواخت شده و حالت سهموی به خود می‌گیرند. حالت دشارژ نیز مشابه حالت شارژ است. در شکل‌های ۱۰-۷ پروفیل‌های دما و آنتالپی در یک مقطع خاص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



شکل ۵- مقایسه بین جواب‌های عددی و آزمایشگاهی [7,11].

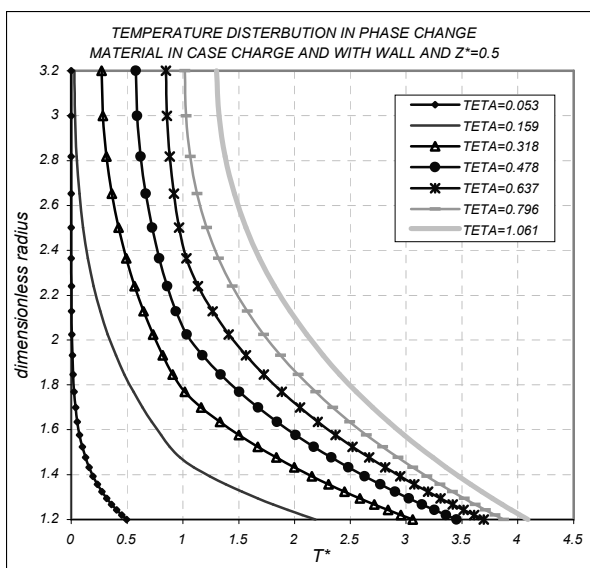
### ۸- نتایج عددی

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 شروع 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.

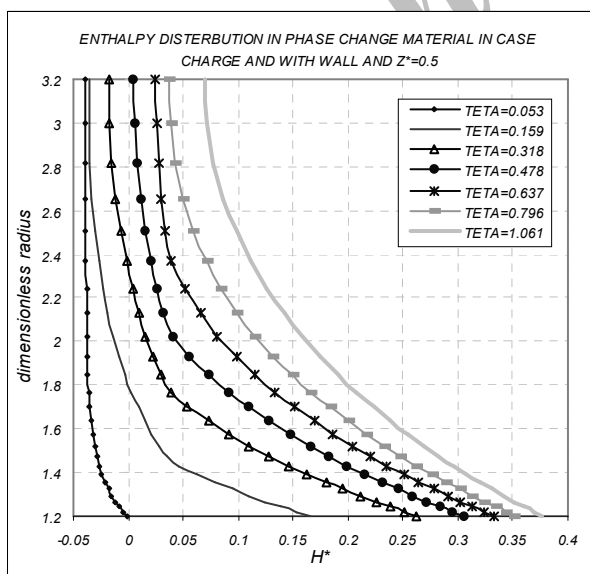


شکل ۶- هندسه مساله مورد بررسی در این پژوهش.

با شروع عمل شارژ، زمانی که ماده تغییر فاز دهنده مجاور مرز سیال عامل شروع به ذوب می‌کند، شکستگی‌هایی در پروفیل‌های دما به وجود می‌آید. این شکستگی‌ها در پروفیل‌های آنتالپی محسوس‌تر است.



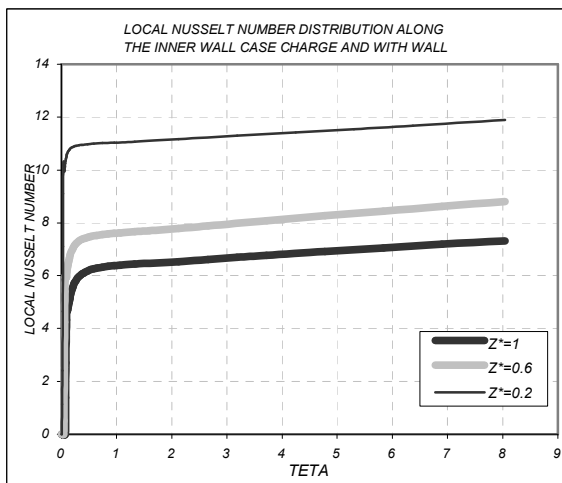
شکل ۷- توزیع دما در حالت شارژ.



شکل ۸- توزیع آنتالپی در حالت شارژ.

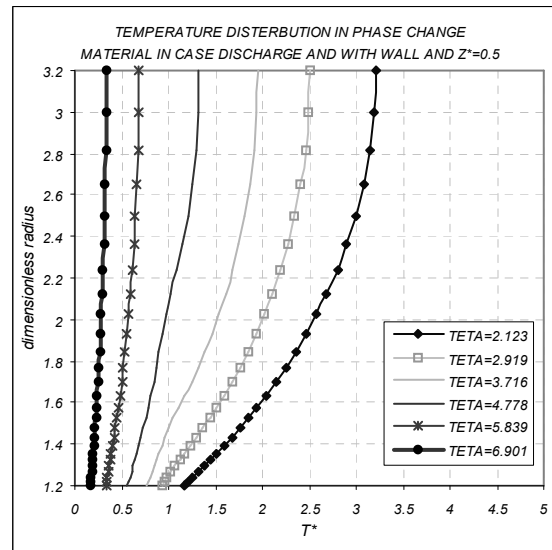


ضریب به شدت افزایش پیدا می‌کند. با شروع مرحله دوم، دمای ماده تغییر فاز دهنده تا دمای ذوب بالا رفته است. در زمان ذوب، دما در ماده تغییر فاز دهنده تا حدودی ثابت می‌ماند. این امر باعث می‌شود ضریب انتقال حرارت نیز مقدار ثابتی داشته باشد. این مرحله تا زمانی ادامه می‌یابد که غالب مواد تغییر فاز دهنده بالاخص نقاط نزدیک به مرز سیال عامل ذوب شوند. به دلیل نزدیکی دمای اولیه به دمای ذوب، مرحله دوم به سرعت اتفاق می‌افتد. به دلیل سرعت عمل ذوب، این مرحله زیاد در شکل محسوس نیست. در مرحله سوم شیب منحنی، اندکی افزایش پیدا می‌کند و این افزایش تا زمان شارژ کامل ادامه خواهد داشت. در مرحله مورد نظر، ابتدا انرژی سیال عامل گرم کردن فاز مایع و همچنین تغییر فاز قسمت جامد به فاز مایع می‌شود و سپس پس از ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده، صرف گرم کردن فاز مایع می‌شود.

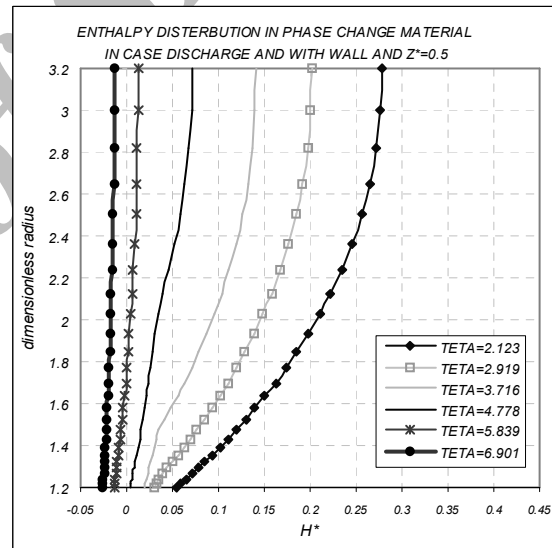


شکل ۱۱- توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیستم ذخیره‌کننده انرژی نسبت به زمان شارژ.

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



شکل ۹- توزیع دما در حالت دشارژ.



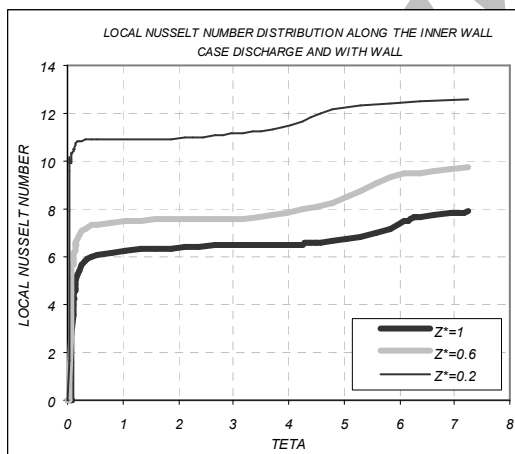
شکل ۱۰- توزیع آنالپی در حالت دشارژ.

در ادامه نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیستم ذخیره‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۱ توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به زمان در طی فرآیند شارژ در سه مقطع خاص از سیستم مورد نظر نشان داده شده است. این منحنی‌ها دارای سه مرحله هستند. در مرحله اول 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

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  $q_L$  (حالت مایع) بصورت زیر متغیر می‌باشد:

$$\left\{ \begin{array}{l} T < T_m \rightarrow \beta = \frac{q}{q_L} = 0 \rightarrow \text{Solid Phase} \\ T > T_m \rightarrow \beta = \frac{q}{q_L} = 1 \rightarrow \text{Liquid Phase} \\ T = T_m \rightarrow 0 < \beta = \frac{q}{q_L} < 1 \rightarrow \text{Liquid and Solid Phase} \end{array} \right. \quad (23)$$

در شکل ۱۳ کانتورهای رنگی نسبت مایع<sup>۱</sup> در در زمان‌های مختلفی از پدیده شارژ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مورد نظر دیده می‌شود، خط ذوب با شیب یکسانی در ماده تغییر فاز دهنده بالا می‌رود.



شکل ۱۲- توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیستم ذخیره کننده انرژی نسبت به زمان دشارژ.

با گذشت زمان این مرز به سمت قسمت‌های بالاتر استوانه رفته و اگر مدت زمان به اندازه کافی زیاد باشد، این مرز به شعاع خارجی استوانه خواهد رسید، در نهایت

جداره است. با شروع مرحله دوم، سیال عامل پس از گرفتن انرژی حرارتی از ماده تغییر فاز دهنده پیوسته گرم‌تر می‌شود و ماده تغییر فاز دهنده شروع به سرد شدن می‌کند. این سرد شدن تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که ماده تغییر فاز دهنده به دمای انجماد نزدیک شود. در این مرحله ضریب انتقال حرارت جابجایی با شیب نسبتاً کمتری نسبت به حالت اول افزایش پیدا می‌کند. با نزدیک شدن دمای ماده تغییر فاز دهنده به دمای انجماد و شروع عمل انجماد، ضریب انتقال حرارت ثابت می‌ماند. در ادامه فرآیند، مرحله سوم شروع می‌شود. در این حالت سیال سرد شروع به گرفتن انرژی از گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز دهنده می‌کند. 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 فاز دهنده 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 دهنده منجمد شده است، سیال سرد بخش زیادی از فاز جامد ماده تغییر فاز دهنده و مقدار کمی از قسمت‌های باقی مانده فاز مایع را تا انجماد کامل سرد می‌کند. این عمل تا انجماد کامل ماده تغییر فاز دهنده ادامه پیدا می‌کند. در این مرحله ضریب انتقال حرارت جابجایی با شیب کمتری نسبت به مرحله سوم افزایش پیدا می‌کند.

نکته مهمی که باید در نظر داشت تفاوت اساسی رفتارهای پروده‌های 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 می‌شود فقط یک قسمت از جواب‌های مسأله مورد تحقیق درست باشد.

## ۹- مشاهده پدیده تغییر فاز

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

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 پدیده 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.

۵- در انتهای حالت خالی شدن، دیده می‌شود که تعداد تکرارهای لازم با گذشت زمان کاهش می‌یابد و اثری از نوسان در آن دیده نمی‌شود. 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 می‌یابد.

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 تغییر فازدهنده بر خلاف حالت ذوب به صورت جبهه‌ای صورت می‌گیرد و خط انجماد برخلاف خط ذوب به صورت نامنظم و سهموی‌وار در ماده تغییر فازدهنده، تغییر می‌کند.

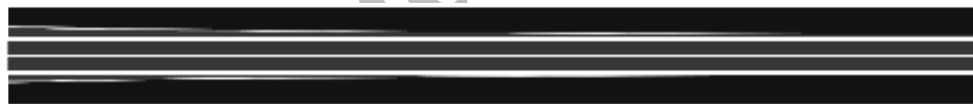
### ۱۰- نتیجه‌گیری

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



TETA=0



TETA=0.159



TETA=0.478



TETA=0.637

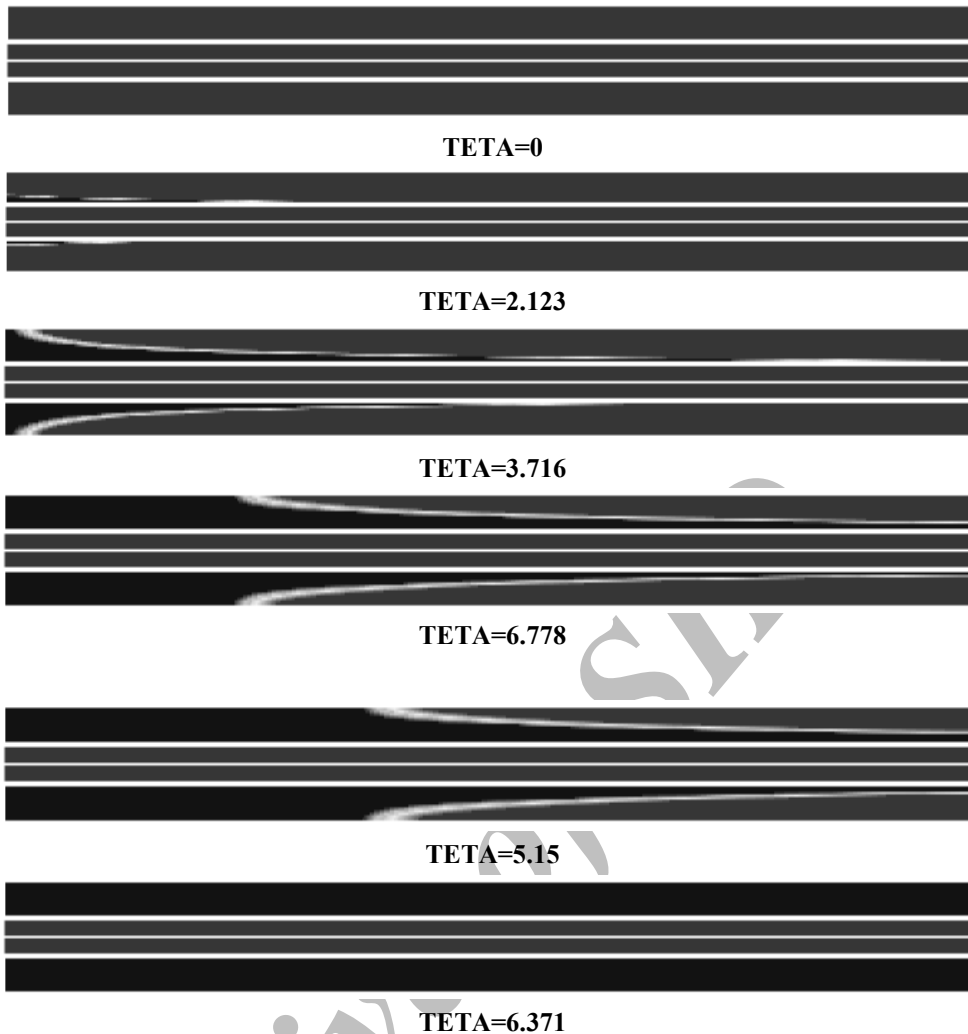


TETA=0.796



TETA=1.061

شکل ۱۳- مراحل شارژ ماده تغییر فاز دهنده.



شکل ۱۴- مراحل دشارژ ماده تغییر فاز دهنده.

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

۷- پیرکندی، ج. و کشاورز، ع. " بررسی تأثیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین 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 ذخیره‌کننده انرژی با در نظر گرفتن زمان آدیاباتیکی"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۰.

## مراجع

1. 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.
3. 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.
4. 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