

## THE APPLICATION OF HEAT PIPE FOR THE SIMULATION OF A UNIFORM TEMPERATURE BATCH REACTOR

M.T. Hamed Mosavian

S. Jafari

S.H. Noie

Chem. Eng. Dept., Engineering  
Faculty, Ferdowsi University of  
Mashhad, I.R.IRAN

Chem. Eng. Dept., Islamic  
Azad University, Quchan  
Branch, I.R.IRAN

Chem. Eng. Dept., Engineering  
Faculty, Ferdowsi University of  
Mashhad, I.R.IRAN

**Abstract:** In this paper, the performance of a two-phase closed thermo-siphon (heat pipe) with water as the working fluid for thermal control of a batch reactor was studied. In the simulation performed, the influence of some parameters such as: filling ratio of 30%-80% and input heat power between 200- 1200 watt and heating time on the uniformity of the temperature distribution in the reactor were studied. The important observations of this research project were the consistency of the temperature inside the reactor and also finding the optimal filling ratio of the heat pipe as well. The results of this simulation are applicable in design and control of reactor temperature and also optimization of the heat pipe.

## شبیه سازی راکتور شیمیایی همدمای بدون همزن و کنترل دمای آن با استفاده از لوله های حرارتی

محمدتقی حامدموسویان، سمانه جعفری و سیدحسین نوعی باغبان

**چکیده:** در این مقاله عملکرد لوله های حرارتی (ترموسیفون ها) با سیال عامل آب برای کنترل دمای راکتور Batch شبیه سازی گردیده است و اثر برخی از متغیرهای عملیاتی مانند زمان، توان حرارتی ورودی و نسبت پرشدن، روی دمای نقاط مختلف راکتور بررسی شد. مراحل شبیه سازی در محدوده پرشدن ۳۰٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ و توان ورودی ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ وات انجام شدند که در آنها یکنواختی دمای مواد داخل راکتور، زمان گرمایش و برترین نسبت پرشدن بررسی شد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش ها با نتایج شبیه سازی مقایسه گردید. قابل به ذکر است که در این پژوهش کار آزمایشگاهی نیز انجام شده و دستگاه مورد نظر طراحی و ساخته شده است. اما در بخش عمده این مقاله به بررسی چگونگی شبیه سازی و نتایج آن پرداخته می شود. از نتایج این تحقیق می توان در مطالعات بهینه سازی، بازیافت انرژی، طراحی لوله های حرارتی و کنترل دمای راکتورهای شیمیایی همدمای استفاده نمود.

**واژه های کلیدی:** لوله های حرارتی (ترموسیفون ها)، راکتور شیمیایی همدمای، شبیه سازی

تاریخ وصول: ۸۶/۲/۲۰

تاریخ تصویب: ۸۷/۱۲/۱۷

دکتر محمدتقی حامدموسویان، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی mosavian@um.ac.ir ، hmosavian@gmail.com

سمانه جعفری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، samaneh.jafari.2415@gmail.com

سیدحسین نوعی باغبان، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی noie@ferdowsi.um.ac.ir

## ۱. مقدمه

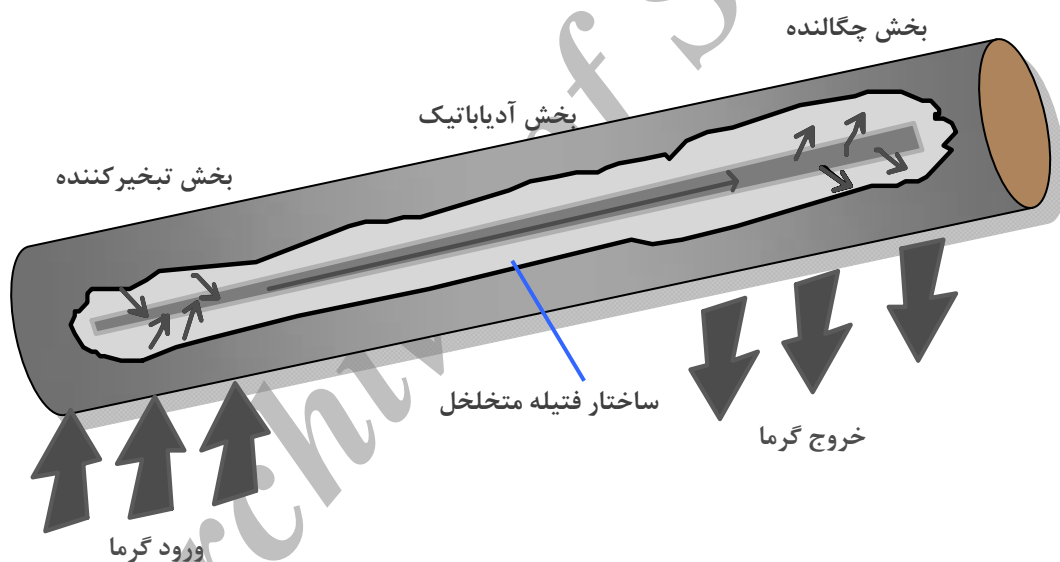
در سال ۱۹۴۲، Gaugler یک لوله حرارتی کم وزن را ابداع کرد که در اصل، لوله حرارتی امروزی بود و از آن برای کاربرد در یخچالهای صنعتی در شرکت جنرال موتور آمریکا استفاده نمود [۱]. در سال ۱۹۶۳، Grover و همکارانش در آزمایشگاه علمی Los Alamos اولین نمونه لوله حرارتی همراه با فتیله را ساختند و سیال‌های عامل آب و سدیم را در داخل آن آزمایش کردند [۲]. محققان تا به امروز در زمینه لوله‌های حرارتی به پیشرفت‌های زیادی دست یافته‌اند، هم اکنون در آمریکا بیش از صد شرکت و موسسه تحقیقاتی در این زمینه فعالیت دارند.

در چند دهه اخیر در کشورهای آسیایی نیز فعالیتهایی در زمینه لوله حرارتی صورت گرفته‌است. در تایوان از سال ۱۹۷۰ انواع مختلف لوله حرارتی همراه با فتیله ساخته و مورد مطالعه قرار گرفت. در کشور کره نیز تحقیقات از سال ۱۹۸۰ آغاز شده‌است، این تحقیقات در زمینه لوله‌های حرارتی کوچک، لوله‌های حرارتی حلقوی و ترموسیفون‌ها انجام گردیده است [۳].

## ۲. تئوری

لوله حرارتی یک وسیله انتقال حرارت دو فازی، با قابلیت هدایت حرارتی بسیار بالا و مؤثر می‌باشد که می‌تواند به دو صورت استوانه-ای و مسطح ساخته شود. این گونه لوله‌ها می‌توانند به عنوان خنک کننده به منبع حرارتی متصل شوند و یا بجهت گرمایش مواد مختلف بکار روند، همچنین می‌توانند برای انتقال حرارت بهتر سیال به تعدادی پره متصل شوند [۴].

گرمای منبع حرارتی توسط سیال عامل داخل لوله حرارتی در بخش تبخیرکننده جذب می‌شود و سیال بخار می‌گردد، سپس بخار به بخش چگالنده منتقل شده و در آنجا تقطیر صورت می‌پذیرد و باعث آزاد شدن گرمای نهان و سرد شدن سیال می‌گردد [۵]. نیروهای مؤئینگی در روزه‌های فتیله لوله حرارتی و نیروهای کشش سطحی آب، باعث برگشت سیال کندانس شده به بخش تبخیرکننده می‌شوند [۶]. عملکرد لوله حرارتی در شکل ۱ نمایش داده شده است:



شکل ۱. عملکرد لوله حرارتی

عامل و جنس ظرف (لوله) می‌توانیم انواع لوله های حرارتی را در بازه دمایی از  $269^{\circ}\text{C}$  تا  $2300^{\circ}\text{C}$  بسازیم [۷]. لوله حرارتی به عنوان یک عنصر انتقال حرارت با بازده بالا، در بسیاری از موارد از جمله صنایع خنک‌سازی الکترونیکی، گرمایش و سرمایش سیالات، بازیافت انرژی، تهویه هوای مطبوع، کنترل دما و همدمايي محیط، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. ترموسیفون، یک لوله حرارتی بدون فتیله می‌باشد که در آن برای بازگرداندن سیال عامل از بخش چگالنده به تبخیرکننده از نیروی ثقل، استفاده می‌شود. بنابراین بایستی به حالت عمودی قرار گیرند، به گونه‌ای که بخش چگالنده آنها در بالا واقع گردد.

عملکرد لوله حرارتی، با اختلاف دمای خیلی کمی بین بخش‌های آن، انجام می‌پذیرد و همچنین به پمپ خارجی احتیاج ندارد و مانند یک سیستم پخش کننده، تاثیر ویژه‌ای در انتقال و پخش گرما از محیط گرم به محیط سرد را دارد [۳]. بنابراین یک مشخصه لوله حرارتی اینست که انتقال گرما بین منبع گرم و جاذب گرمایی با تلفات حرارتی خیلی کمی همراه است.

این مشخصه لوله حرارتی باعث می‌شود حرارت از نقاط گرم‌تر راکتور به سرعت به نقاط سردتر آن انتقال یابد. مشخصه دیگر لوله حرارتی این است که میزان نسبتاً زیادی گرما را می‌تواند با ساختار کم وزن و کوچکش انتقال دهد. همچنین با انتخاب مناسب سیال

در حالتی که انرژی حرارتی ورودی به تبخیرکننده ترموسیفون‌ها ۴۰۰ وات و میزان سیال داخل لوله (نسبت پرشدن) ۳۰٪ باشد، اطلاعات به این صورت می‌باشد:

$$\begin{aligned}
 t = 0 &\rightarrow T_0 = 23 \\
 t = 60 \text{ min} &\rightarrow T_1 = 42.25 \\
 T_a &= \frac{T_0 - T_1}{2} = 32.625 \\
 \rho_w(T_a) &= 1002 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\
 V &= 0.19 \times 0.19 \times 0.30 = 0.01083 \text{ m}^3 \\
 m &= \rho_w \cdot V = 10.85166 \text{ kg} \\
 \mu &= 0.7543 \text{ cp}
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$M = 18.02 \text{ kg/kgmol}$$

$$K = 0.6 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$C_p(T_a) = 4.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q_{out} = m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} = 234.42 \text{ W} \quad (2)$$

$$\frac{Q_{out}}{4A} = 2826.45 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

در حالیکه  $A =$  سطح جانبی لوله‌ها،

$$A = 0.0207345 \text{ m}^2$$

$$\beta = \text{ضریب انبساط حرارتی در دمای متوسط}$$

$$\beta = 317.61 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

این راکتور، به صورت ناپیوسته و تابعی از زمان شبیه سازی شده و با گذشت زمان می‌توان نتایج شبیه سازی را بدست آورده و ذخیره نمود. برنامه در هر مرحله به مدت یک ساعت، اجرا می‌شود و پس از آن می‌توان نتیجه پارامترهای گوناگون از قبیل دما، فشار، دانسیته، ویسکوزیته و غیره را برای مواد داخل راکتور در زمان دلخواه مشاهده نمود.

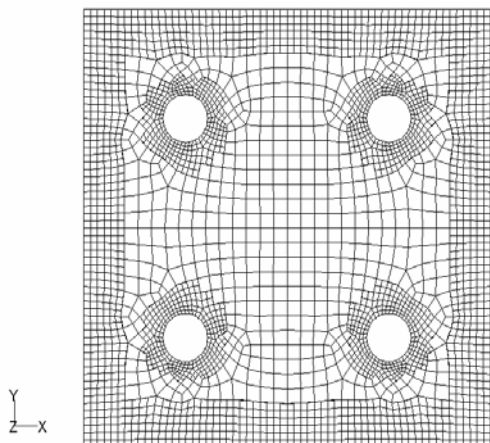
مرحله اول شبیه‌سازی، ایجاد ژئومتری مدل می‌باشد که در برنامه Gambit انجام می‌شود و در آن هندسه و اندازه ابعاد دستگاه شبیه سازی شد همانطور که در بالا اشاره شد، لحاظ می‌گردد. دیواره‌های راکتور و درب آن عایق در نظر گرفته شده و دمای روی دیواره‌ها در مدل، در واقع دمای داخلی سیال کنار دیواره می‌باشد. تصویر شماتیکی این مدل در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

راکتورهای شیمیایی برای تولید مواد متنوعی بکار می‌روند. بسیاری از واکنش‌هایی که در راکتورها انجام می‌شوند، در دمای معینی قادر به پیشرفت هستند. بر همین اساس بایستی دمای بهینه واکنش را در سراسر مخزن راکتور ایجاد نمود تا واکنش در تمام نقاط راکتور با حداکثر درصد تبدیل انجام شود.

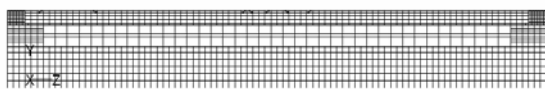
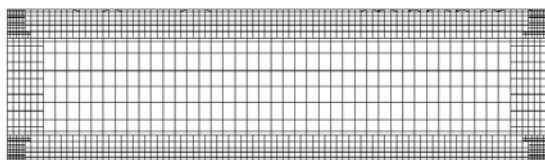
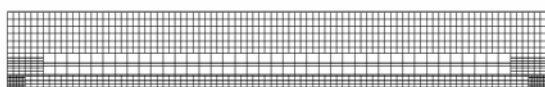
گرمایش راکتورها معمولاً توسط گرمکن‌های الکتریکی انجام می‌شود که در اطراف بدنه مخزن راکتور نصب می‌شوند. اعمال حرارت بدین صورت باعث می‌شود واکنش بیشتر در اطراف دیواره داخلی راکتور انجام شود و در وسط آن پیشرفت خوبی نداشته باشد. بهترین راه حل برای رفع این مشکل، استفاده از لوله های حرارتی در نقاط مختلف راکتور است تا حرارت را به طور یکسان و یکنواخت به مواد داخل مخزن بدون استفاده از همزن و با مصرف کمترین انرژی اعمال کند. اگر لوله ها به مقدار کافی و به فاصله های مساوی از هم داخل راکتور جاسازی شوند، می‌توانند شرایط مناسبی را از لحاظ گرمایی برای انجام واکنش ایجاد کنند. این روش تاکنون در راکتورها طراحی و آزمایش نشده‌است

### ۳. شبیه‌سازی نرم‌افزاری دستگاه

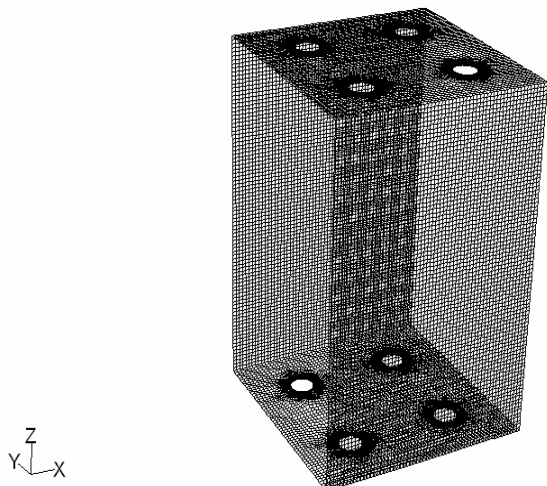
واحد شبیه‌سازی شده یک راکتور شیمیایی غیرپیوسته می‌باشد که توسط نرم افزار Fluent طراحی شده است. راکتور به صورت مکعب مستطیل و دوجداره (عایق) در نظر گرفته شده است. ابعاد داخلی راکتور، ۲۰×۲۰ با ارتفاع ۳۰ سانتیمتر لحاظ شده‌است. در این مدل انتقال حرارت و توزیع دما در داخل راکتور با استفاده از ترموسیفون ها بررسی می‌گردد. در داخل راکتور ۴ ترموسیفون به صورت عمودی شبیه‌سازی شده که فقط بخش چگالنده آنها درون ظرف قرار دارد و قسمت‌های دیگر ترموسیفون‌ها در پایین ظرف می‌باشند. قطر خارجی ترموسیفون‌ها ۲۲ میلی‌متر و قطر داخلی آنها ۲۰ میلی‌متر می‌باشد و طول بخش چگالنده ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده‌است. در عمل با ورود انرژی حرارتی به بخش تبخیرکننده ترموسیفون‌ها، عملیات تبخیر و چگالش داخل لوله آغاز می‌گردد و گرمای نهان تبخیر سیال عامل (آب) در بخش چگالنده آزاد می‌شود و باعث گرم شدن مواد داخل راکتور می‌گردد. در شبیه سازی، این شار حرارتی (Heat Flux) خروجی از ترموسیفون‌ها، ثابت فرض شده و در هر مرحله محاسبه می‌گردد و در نرم افزار Fluent لحاظ می‌شود. دیگر اطلاعات ورودی به نرم افزار شامل شرایط اولیه دمایی، شرایط فیزیکی ماده مورد نظر در داخل ظرف از قبیل گرانشی، جرم ملکولی، هدایت حرارتی، دانسیته، گرمای ویژه و ضریب انبساط حرارتی می‌باشد، که با توجه به دما و نوع ماده داخل راکتور محاسبه می‌شوند. ماده داخل راکتور در این شبیه سازی آب در نظر گرفته شده که در اینجا یک نمونه از محاسبات ذکر شده برای سیال آب ارائه شده‌است:



شکل ۴. شبکه بندی صفحات افقی در برنامه شبیه سازی

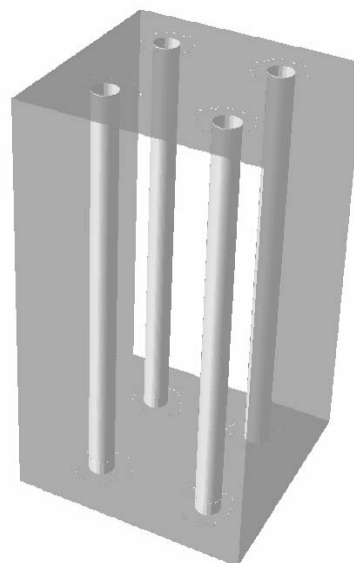


شکل ۵. شبکه بندی صفحات عمودی در برنامه شبیه سازی



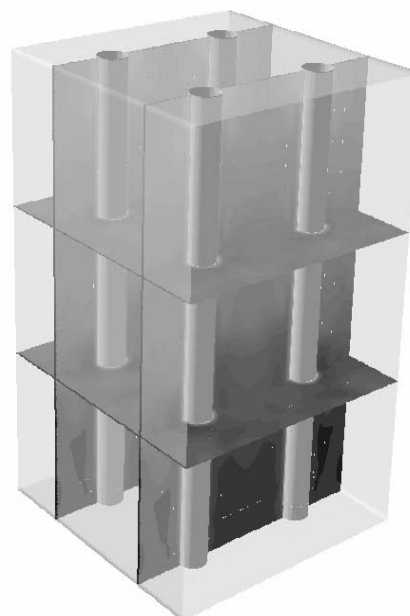
شکل ۶. شبکه بندی دیواره‌های راکتور در برنامه شبیه سازی

سپس برای حل برنامه لازم است یک سری اطلاعات ورودی مربوط به مواد و شرایط آزمایش به نرم افزار داده شود. از قبیل خواص مواد اولیه که در ظرف آزمایش قرار دارند، که در صفحه Materials تعریف می‌شوند، همچنین میزان شار حرارتی (Heat Flux) ثابتی



شکل ۲. شماتیکی از راکتور شبیه سازی شده

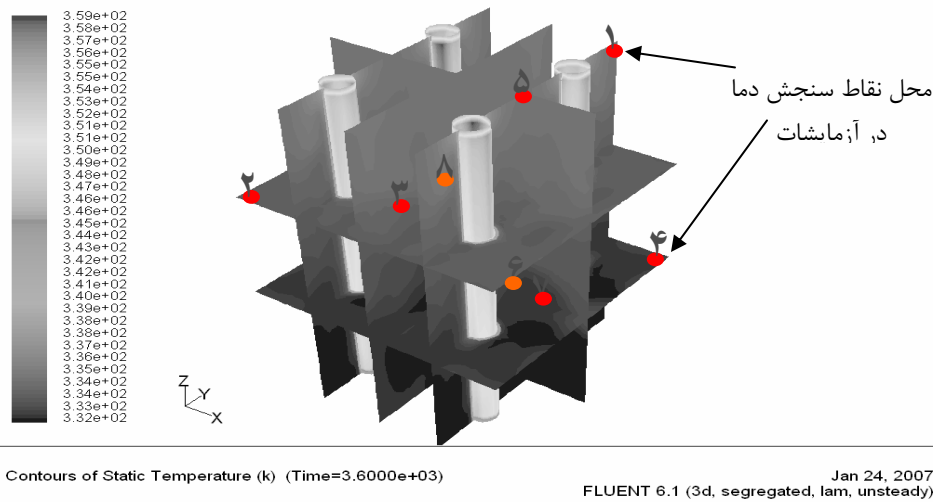
برای نمایش دمای نقاط داخل راکتور در حالت سه بعدی، سه صفحه فرضی افقی به فاصله ۱۰ سانتیمتر از یکدیگر و دو صفحه فرضی عمودی که از وسط لوله‌ها عبور می‌کنند، طراحی شده که همان محل قرارگیری حسگرها در آزمایشات تجربی می‌باشند. این صفحات در شکل ۳ نمایش داده شده اند.



شکل ۳. نمایش صفحات طراحی شده در برنامه شبیه سازی

در مرحله دوم شبیه‌سازی، صفحات، لوله‌ها و دیواره‌های جسم مورد نظر در برنامه گمبیت، شبکه بندی شده‌است. حاصل این شبکه‌بندی‌ها در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده‌است.

مدت چندین ساعت طول خواهد کشید تا اجرای برنامه کامل شود. نتایج برنامه هر ۵ دقیقه ذخیره می گردد و پس از تکمیل اجرای برنامه نتایج هر زمان ذخیره شده در صفحه Contours مانند شکل ۷ مشاهده می شود.



شکل ۷. صفحه Contours و نمایش نمای سه بعدی جسم با تمام صفحات، لوله ها و موقعیت نقاط سنجش دما

لوله های حرارتی باعث می شود حرارت به طور یکسان و یکنواخت به مواد داخل راکتور اعمال شود و شرایط مناسبی را از لحاظ گرمایی برای انجام فرآیند ایجاد کند.

#### ۴-۲. بررسی اثر میزان توان ورودی بر روی دمای راکتور

در این مرحله نسبت پرشدن (F.R) ثابت در نظر گرفته می شود و اثر افزایش توان ورودی به تبخیرکننده ترموسیفون ها، بر روی دما با گذشت زمان بررسی می شود. بعد از اینکه مقادیر مورد نیاز برای شبیه سازی، همانطور که قبلاً اشاره شد، محاسبه گردید، در نرم افزار قرار داده می شوند و برای مدت ۳۶۰۰ ثانیه اجرا می گردند، تا نتایج حاصل از شبیه سازی مشاهده شود، بعد از این مرحله نتایج تجربی از پیش بدست آمده حاصل از آزمایشات عملی با نتایج شبیه سازی، مقایسه می گردند. با تنظیم توان حرارتی ورودی، می توان دمای راکتور را کنترل نمود.

#### ۴-۳. بررسی اثر تغییر F.R بر روی دمای راکتور

در این مرحله توان حرارتی ورودی ثابت فرض شده و اثر افزایش نسبت پرشدن (F.R) بر روی دما با گذشت زمان بررسی می شود. با نتایج حاصل از این شبیه سازی می توان بهترین F.R را برای کارایی مؤثر لوله حرارتی تشخیص داد. مقادیر مورد نیاز برای شبیه سازی این مراحل محاسبه و در نرم افزار قرار داده می شوند، بعد از ۳۶۰۰ ثانیه اجرای برنامه، نتایج حاصل از شبیه سازی مشاهده می گردد و با نتایج تجربی بدست آمده از آزمایشات عملی، مقایسه می شود.

که از لوله ها به سیال داخل مخزن منتقل می شود و شرایط اولیه دمایی که در قسمت Boundary Conditions وارد می شود. در مرحله بعد لازم است شرایط مرزی برای جسم تعریف و اطلاعات ورودی مربوط به مواد و شرایط آزمایش به نرم افزار داده شود.

برای تمام سیال ها، FLUENT معادلات بقای انرژی برای جرم و ممنتوم را حل می کند. برای جریان هایی مانند انتقال حرارت یا تراکم پذیری، یک معادله دیگر نیز برای بقای انرژی حل می شود. معادلات بقای جریان آرام این گونه اند:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = S_m$$

عبارت  $S_m$  مقدار جرم اضافه شده از فاز دوم به فاز اول می باشد. معادله پیوستگی برای سیستم دو بعدی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m$$

معادله بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F}$$

#### ۴. انواع مطالعات توسط شبیه سازی

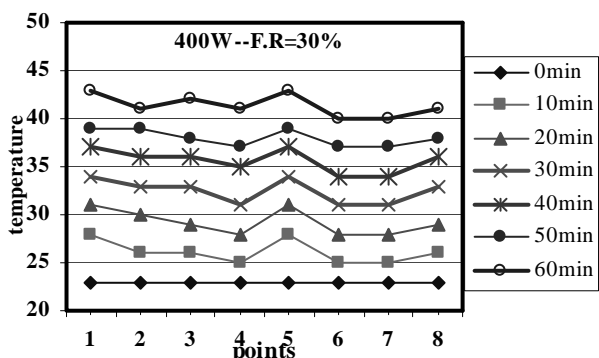
##### ۴-۱. بررسی یکنواختی دما در داخل راکتور

در این حالت انرژی حرارتی ورودی به بخش تبخیرکننده ترموسیفون ها، حرارت خروجی از چگالنده و میزان سیال داخل لوله (نسبت پرشدن، F.R) ثابت فرض می شود و اثر افزایش دما با گذشت زمان برای نقاط مختلف داخل راکتور، مشاهده می گردد. پس از اجرای برنامه به مدت ۳۶۰۰ ثانیه، نتایج حاصل از شبیه سازی مشاهده می شود و سپس با نتایج تجربی بدست آمده از آزمایشات عملی، مقایسه می گردد. اعمال حرارت در داخل راکتور توسط

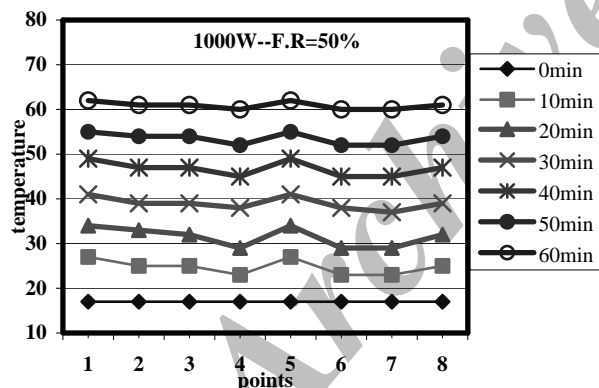
مختلف راکتور شبیه‌سازی شده، با توجه به شکل ۷ بدین صورت می‌باشد:

$$\{7,6,4\} < \{8,3,2\} < \{5,1\}$$

برای مشاهده میزان همدمايي نقاط داخل راکتور شبیه‌سازی شده نمودارهای دما بر حسب شماره نقاط سیال داخل راکتور در شکل های ۱۰ و ۱۱ رسم شده که در زمانهای معین، دمای نقاط تقریباً به صورت خط راست است که این یکنواختی دما داخل راکتور را نشان می‌دهد و تفاوت دما بین نقاط مختلف کمتر از ۳ درجه سانتیگراد می‌باشد:



شکل ۱۰. دما بر حسب شماره نقاط برای زمان های مختلف در توان ۴۰۰ وات و نسبت پر شدن ۳۰٪ توسط شبیه سازی فرآیند



شکل ۱۱. دما بر حسب شماره نقاط برای زمان های مختلف در توان ۱۰۰۰ وات و نسبت پر شدن ۵۰٪ توسط شبیه سازی فرآیند

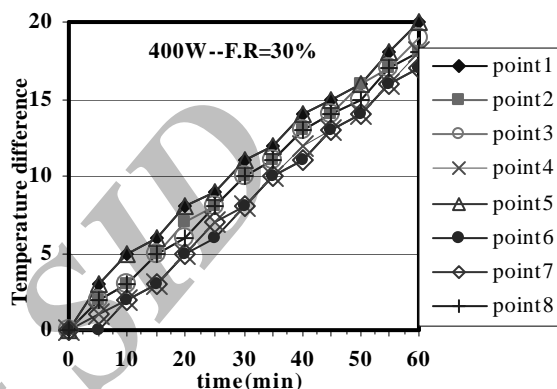
۵-۲. نتایج بررسی اثر میزان توان ورودی بر روی دمای راکتور توسط شبیه‌سازی فرآیند

برای یک نقطه مشخص داخل راکتور در F.R ثابت، با گذشت زمان، دمای نقاط مختلف راکتور با افزایش توان ورودی به سیستم، افزایش می‌یابد، نمودارهای اختلاف دما بر حسب زمان در توان های مختلف برای مدل شبیه‌سازی شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده‌است:

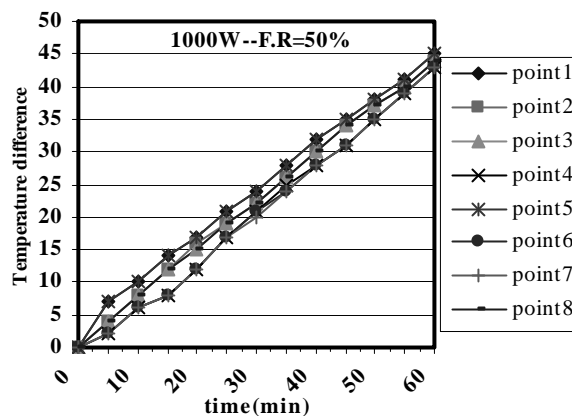
۵. بحث و نتیجه‌گیری در خصوص نتایج حاصل از شبیه‌سازی

۵-۱. نتایج بررسی یکنواختی دما در داخل راکتور توسط شبیه‌سازی فرآیند

در توان و نسبت پر شدن (F.R) ثابت، با افزایش زمان، دمای هر یک از نقاط بتدریج افزایش می‌یابد، که بطور نمونه چند نمودار حاصل از آن در شکل های ۸ و ۹ ارائه شده‌است:

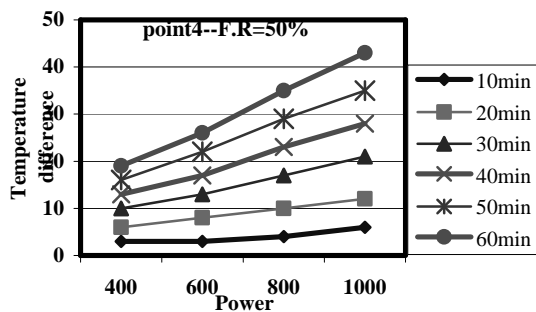


شکل ۸. اختلاف دما بر حسب زمان برای نقاط مختلف راکتور در توان ۴۰۰ وات و نسبت پر شدن ۳۰٪ توسط شبیه سازی فرآیند



شکل ۹. اختلاف دما بر حسب زمان برای نقاط مختلف راکتور در توان ۱۰۰۰ وات و نسبت پر شدن ۵۰٪ توسط شبیه سازی فرآیند

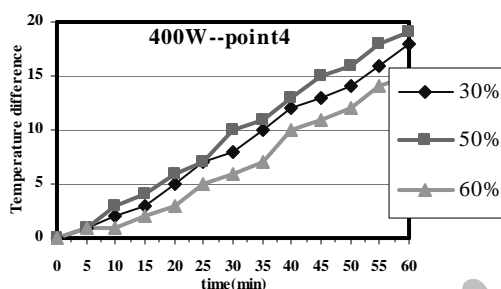
از شکل های ۸ و ۹ می‌توان دریافت که کدام نقاط افزایش دمای بیشتری دارند و یا زودتر از سایر نقاط گرم می‌شوند. روند افزایش دمای نقاط داخل راکتور، از بالای سطح مایع و چگالنده آغاز می‌گردد و تا پایین راکتور ادامه دارد. بنابراین دمای نقاط بالای چگالنده بیشتر از نقاط دیگر می‌باشد. ترتیب افزایش دمای نقاط



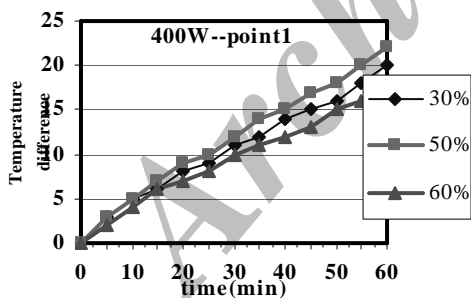
شکل ۱۵. اختلاف دما برحسب توان برای زمان های مختلف در نسبت پرشدن ۵۰٪ و نقطه ۴ توسط شبیه سازی فرآیند

۳-۵. نتایج بررسی اثر تغییر F.R بر روی دمای راکتور توسط شبیه سازی فرآیند

برای یک نقطه مشخص داخل راکتور در توان ثابت، میزان افزایش دما در طول زمان برای انواع F.R ها، متفاوت است. نمودارهای اختلاف دما برحسب زمان در شکل های ۱۶ و ۱۷ این گونه است:

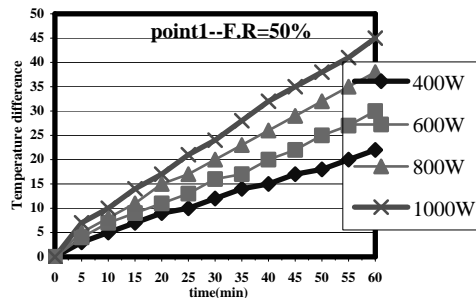


شکل ۱۶. اختلاف دما برحسب زمان برای نسبت های پرشدن مختلف در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۱ توسط شبیه سازی فرآیند

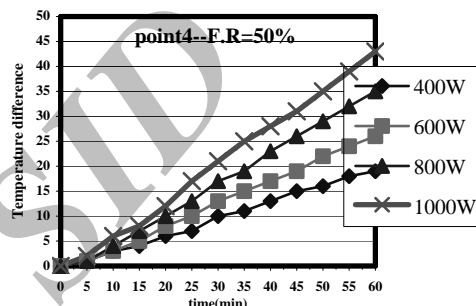


شکل ۱۷. اختلاف دما برحسب زمان برای نسبت های پرشدن مختلف در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۴ توسط شبیه سازی فرآیند

بنابراین با توجه به این نمودارها می توان بهترین F.R را تشخیص داد، بطوری که در طول زمان نقاط داخل راکتور، بالاترین دما را داشته باشند. در این نمودارها مشاهده می شود بهینه ترین F.R ۵۰٪ می باشد، زیرا برای توان ها و نقاط مختلف، بالاترین دما را نشان می دهد. از طریق نمودار شکل های ۱۸ و ۱۹، واضح تر می توان به این نتیجه رسید:

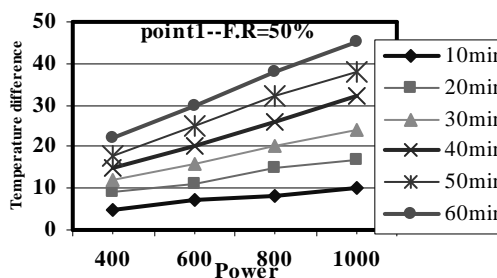


شکل ۱۲. اختلاف دما برحسب زمان برای توان های مختلف در نسبت پرشدن ۵۰٪ و شماره نقطه ۱ توسط شبیه سازی فرآیند



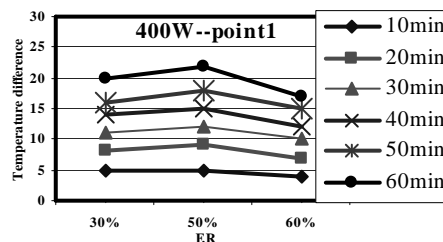
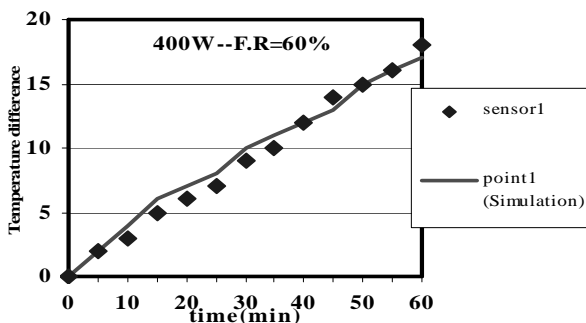
شکل ۱۳. اختلاف دما برحسب زمان برای توان های مختلف در نسبت پرشدن ۵۰٪ و شماره نقطه ۴ توسط شبیه سازی فرآیند

با توجه به این نمودارها در طول زمان با افزایش توان مقدار حرارت بیشتر می شود و دمای نقاط مختلف راکتور بالاتر می روند. هر چه توان ورودی بیشتر شود، می توان در مدت زمان کمتری به دمای معینی رسید. نمودارهای این قسمت به صورت اختلاف دما برحسب توان در F.R و شماره نقطه ثابت نیز در شکل های ۱۴ و ۱۵ رسم شده تا مشاهدات واضح تر گردد:



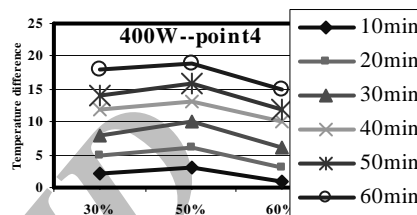
شکل ۱۴. اختلاف دما برحسب توان برای زمان های مختلف در نسبت پرشدن ۵۰٪ و نقطه ۱ توسط شبیه سازی فرآیند

توسط این نمودارها به طور واضح تر می توان مشاهده کرد که در زمان های معین، توان های بالاتر دارای دمای بیشتری هستند. همچنین می توان بهترین توان را با توجه به شرایط واکنش انتخاب نمود به گونه ای که در مدت زمان معینی به دمای مورد نظر برسیم.

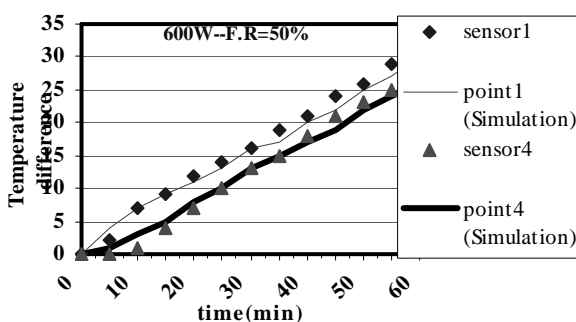


شکل ۱۸. اختلاف دما برحسب نسبت پرشدن برای زمان های مختلف در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۱ توسط شبیه سازی فرآیند

شکل ۲۱. اختلاف دما برحسب زمان برای نقطه شماره ۲ در توان ۱۰۰۰ وات و نسبت پرشدن ۵۰٪ در دو حالت تجربی و شبیه سازی



شکل ۱۹. اختلاف دما برحسب نسبت پرشدن برای زمان های مختلف در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۴ توسط شبیه سازی فرآیند



شکل ۲۲. اختلاف دما برحسب زمان برای نقطه شماره ۴ در توان ۶۰۰ وات و نسبت پرشدن ۵۰٪ در دو حالت تجربی و شبیه سازی

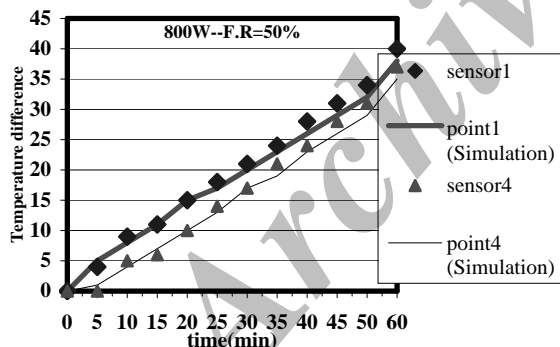
از این نمودارها به راحتی می توان دریافت که F.R. ی ۶۰٪ کمترین دما را نشان می دهند و F.R. های ۳۰٪ و ۵۰٪ دارای دمای بالاتری هستند. بطور میانگین بین حالت های مختلف شبیه سازی (توان ها و نقاط متفاوت)، نسبت پرشدن ۵۰٪ بالاترین دما را در زمان های مختلف نشان می دهد و به عنوان بهترین F.R. تعیین می شود.

### ۶. مقایسه نتایج تجربی با شبیه سازی

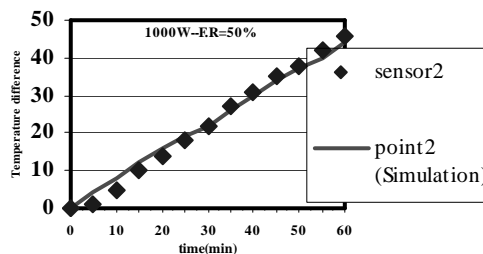
اکنون نتایج شبیه سازی با داده های تجربی که از پیش بدست آمده اند، مقایسه و نتایج کلی در هر دو حالت مورد بررسی قرار میگیرد.

#### ۶-۱. یکنواختی دما در داخل راکتور

در این حالت در شکل های ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳ نمودارهای اختلاف دما بر حسب زمان در توان ها و F.R. های متفاوت، برای نقاط داخل راکتور در دو حالت تجربی و شبیه سازی رسم می شود:



شکل ۲۳. اختلاف دما برحسب زمان برای نقطه شماره ۴ در توان ۸۰۰ وات و نسبت پرشدن ۵۰٪ در دو حالت تجربی و شبیه سازی

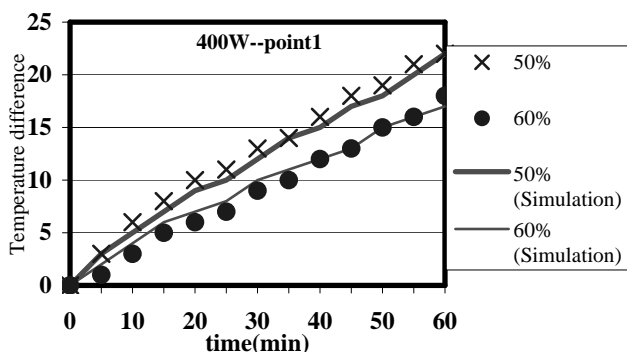


شکل ۲۰. اختلاف دما برحسب زمان برای نقطه شماره ۱ در توان ۴۰۰ وات و نسبت پرشدن ۶۰٪ در دو حالت تجربی و شبیه سازی

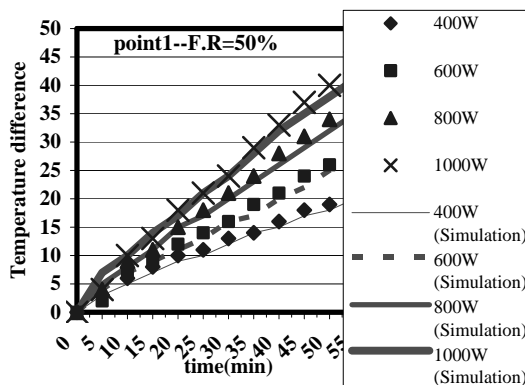
#### ۶-۲. بررسی اثر میزان توان ورودی بر روی دمای داخل راکتور

در این حالت نمودارهای اختلاف دما بر حسب زمان در F.R. و شماره نقاط ثابت، برای توان های مختلف در دو حالت تجربی و شبیه سازی در شکل های ۲۴ و ۲۵ رسم شده اند.

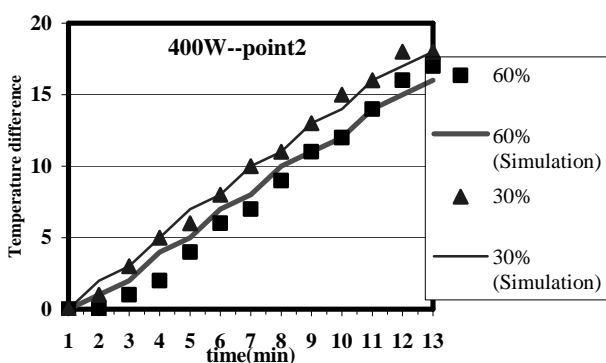




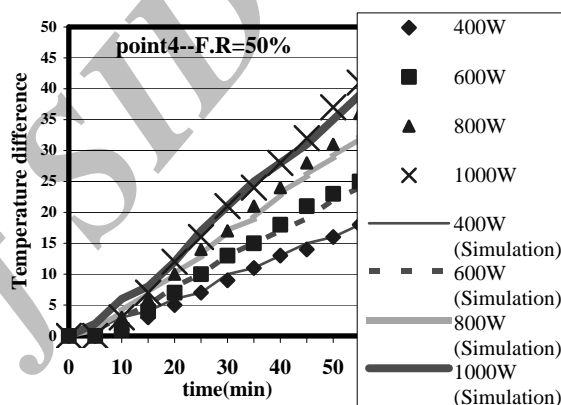
شکل ۲۷. اختلاف دما برحسب زمان برای نسبت های پرشدن مختلف در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۱ در دو حالت تجربی و شبیه سازی



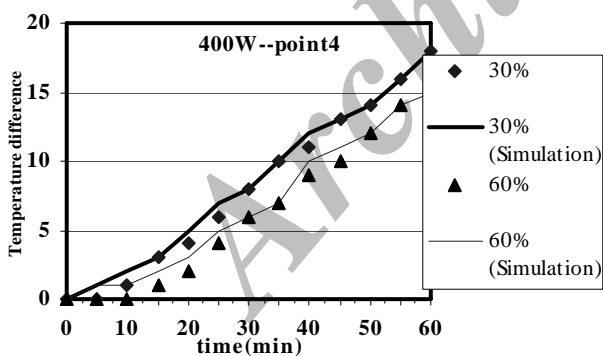
شکل ۲۴. اختلاف دما برحسب زمان برای توان های مختلف در نسبت پرشدن ۵۰٪ و نقطه ۱ در دو حالت تجربی و شبیه سازی



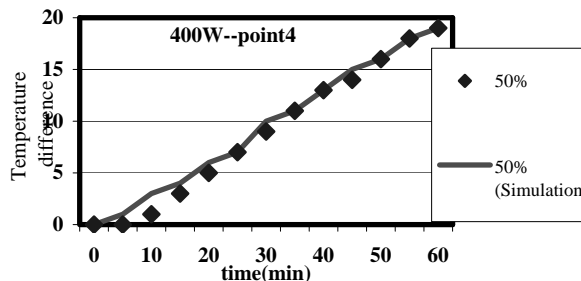
شکل ۲۸. اختلاف دما برحسب زمان برای نسبت های پرشدن مختلف در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۲ در دو حالت تجربی و شبیه سازی



شکل ۲۵. اختلاف دما برحسب زمان برای توان های مختلف در نسبت پرشدن ۵۰٪ و نقطه ۴ در دو حالت تجربی و شبیه سازی



شکل ۲۹. اختلاف دما برحسب زمان برای نسبت های پرشدن مختلف در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۴ در دو حالت تجربی و شبیه سازی



شکل ۲۶. اختلاف دما برحسب زمان برای نسبت پرشدن مختلف ۵۰٪ در توان ۴۰۰ وات و نقطه ۴ در دو حالت تجربی و شبیه سازی

۷. نتیجه گیری

در این تحقیق عملکرد ترموسیفون ها برای کنترل دمای راکتور Batch شبیه سازی گردیده است و نتایج ذیل بدست آمده اند:

*Temperature Heat Recovery Applications, Heat Recovery Systems and CHP Vol. 15, No. 7, 1995, pp. 631-640.*

- [6] Dunn, P.D., Reay, D.A., *Heat Pipes*, 3<sup>rd</sup> Edition, Pergamon Press, 1994.
- [7] Leefter, B.I., "Nuclear Thermionic Energy Converter", Proceedings of 20<sup>th</sup> Annual Power Sources Conf., May 1966, pp. 172 - 175.

۱- در مورد شبیه‌سازی فرآیند می‌توان نتیجه گرفت که در توان ورودی و نسبت پرشدن (F.R) ثابت، با افزایش زمان، دمای نقاط مختلف، بتدریج افزایش می‌یابد.

۲- روند افزایش دمای نقاط داخل راکتور، در مورد شبیه‌سازی فرآیند نیز مانند حالت تجربی از بالای سطح مایع و چگالنده آغاز می‌گردد و تا پایین راکتور ادامه دارد. بنابراین ترتیب افزایش دمای نقاط مختلف داخل راکتور شبیه‌سازی شده، با توجه به شکل ۷ بدین صورت می‌باشد:

$$\{7,6,4\} < \{8,3,2\} < \{5,1\}$$

۳- در مورد شبیه‌سازی فرآیند، در زمان‌های معین، دمای تمامی نقاط در بازه کوچکی قرار دارد و این نشان‌دهنده یکنواختی دما در داخل راکتور می‌باشد، همچنین اختلاف دما بین نقاط مختلف راکتور شبیه‌سازی شده، در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد و همدمايي در داخل راکتور بهتر می‌گردد.

۴- برای یک نقطه مشخص و F.R ثابت، با گذشت زمان، دمای نقاط مختلف راکتور شبیه‌سازی شده، با افزایش توان ورودی به سیستم، افزایش می‌یابد. همچنین هرچه توان ورودی بیشتر شود، در مدت زمان کمتری به دمای معینی می‌رسیم بنابراین می‌توان بهترین توان را با توجه به شرایط فرآیند انتخاب نمود.

۵- از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، می‌توان برای یک نقطه مشخص و توان ثابت، با توجه به میزان افزایش دما در طول زمان، بهترین F.R را انتخاب نمود. بهینه‌ترین F.R ۵۰٪ می‌باشد، زیرا برای توان‌ها و نقاط مختلف، بالاترین دما را نشان می‌دهد.

۶- در مرحله آخر، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی با شبیه‌سازی مقایسه شدند که با توجه به نمودارهای حاصل، تطابق قابل قبولی ارائه شد.

## مراجع

- [1] Gaugler, R.S., *Heat Transfer Device*, U. S. Patent 2, 350, 348.
- [2] Grover, G. M., Cotter, T. P., Erikson, G. F., *Structures of Very High Thermal Conductivity*, J. Applied Phys., 35, 1990, 1964.
- [3] Faghri, A., *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, USA, 1995.
- [4] Lin, S., Broadbent, J., McGlen, R., *Numerical Study of Heat Pipe Application in Heat Recovery Systems*, Applied Thermal Engineering Vol. 25, 2005, pp. 127-133.
- [5] Sauciuc, I., Akbarzadeh, A., Johnson, P., *Characteristics of Two-Phase Closed Thermosyphons for Medium*