



# اولین کنفرانس انرژی های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران

The First Iranian Conference on Renewable Energies and Distributed Generation  
ICREDG 2010



## بررسی و تحلیل عوامل موثر در بازده حرارتی دریافت کننده مرکزی خورشیدی با نمک مذاب در شارهای حرارتی متغیر در شرایط آب و هوایی استان کرمان

علی زارع، مظفرعلی مهربان، مرتضی عبدالزاده

پاک خورشیدی بر عهده خواهند داشت. نیروگاه های خورشیدی با سیستم دریافت کننده مرکزی به دلیل تمرکز بالاتر انرژی خورشیدی، امکان کارکرد سیال حامل انرژی در دماهای زیاد را به وجود می آورند. به علت بالا بودن دمای سیال حامل انرژی، در این نیروگاه ها معمولاً از نمک مذاب به عنوان سیال حامل انرژی و نیز سیال ذخیره ای گرمایی در منابع های ذخیره انرژی، استفاده می شود. همچنین باید در نظر داشت که آلیاژ به کار رفته در ساخت دریافت کننده نمی تواند به مدت طولانی در دماهای بالا مقاومت کند زیرا کرنش های حرارتی ایجاد شده در دیواره های دریافت کننده مرکزی، سبب کاهش طول عمر آن می شوند؛ بنابراین کنترل دمای ماکزیمم نمک مذاب از اهمیت زیادی برخوردار است.

لوله های دریافت کننده و سیال حامل انرژی، قسمت های اصلی یک دریافت کننده مرکزی را تشکیل می دهند که انرژی به واسطه ای آنها از میدان جمع کننده انرژی خورشیدی به مبدل های حرارتی انتقال می یابد. روابط انتقال حرارت برای مسائلی با شار حرارتی ثابت یا دمای ثابت کاربرد دارد، در حالی که شار حرارتی تابشی در سطح خارجی لوله های دریافت کننده مرکزی متغیر است؛ بنابراین این روابط برای تحلیل انتقال حرارت در دریافت کننده مرکزی قابل استفاده نیستند.

تحقیقات فراوانی بر روی دریافت کننده های مرکزی از سال 1980 به بعد صورت گرفته است. کارلی [1] با به کار بردن انواع مختلفی از نمک های مذاب، تحقیقاتی را بر روی جنس و تنش های گرمایی لوله های دریافت کننده در جریان های آرام و متلاطم درون لوله انجام داد. اسپارو و همکاران [2] آزمایشاتی را با استفاده از توزیع شار حرارتی متناوب انجام دادند. گارتیر [3] نیز درصدد مشخص کردن نحوه توزیع قابلیت نفوذ حرارتی در جریان متلاطم درون لوله بود.

چکیده - امروزه نمک مذاب یکی از موثرترین سیال های حامل انرژی، جهت تولید برق در نیروگاه های خورشیدی است. از مهمترین ویژگی های نمک مذاب، ظرفیت حرارتی بالا و قابلیت هدایت حرارتی پائین آن می باشد که ویژگی های مطلوبی برای سیال حامل انرژی محسوب می شوند. نمک مذاب در هر دو نوع سیستم متمرکز کننده خورشیدی یعنی سیستم دریافت کننده مرکزی و سیستم دریافت کننده سهموی کاربرد دارد ولی سیستم دریافت کننده مرکزی به دلیل تمرکز بالاتر انرژی خورشیدی، امکان کارکرد در دما و شار حرارتی بالا را فراهم می آورد که این امر، کاهش اندازه و هزینه سیستم دریافت کننده را در پی خواهد داشت. همچنین افزایش بازدهی دریافت کننده مرکزی، تأثیر قابل توجهی در طراحی بهینه میدان جمع کننده انرژی خورشیدی و کاهش هزینه ها و نیز در افزایش طول عمر دریافت کننده مرکزی دارد. از آنجا که شار حرارتی که تنها به یک نیمه دیواره دریافت کننده مرکزی می تابد، متغیر است؛ بنابراین روابط تحلیلی انتقال حرارت برای دریافت کننده مرکزی قابل استفاده نیست، به همین دلیل در این مقاله، با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی (فلوئنت)، تأثیر شار حرارتی متغیر و نیز اثرات عواملی همچون دمای ورودی و سرعت ورودی سیال، قطر و ضخامت دیواره دریافت کننده بین شارهای حرارتی 100 تا 1400 کیلووات بر مترمربع، بر بازدهی حرارتی دریافت کننده و دمای ماکزیمم نمک مذاب، مورد بررسی قرار می گیرد.

واژه های کلیدی - بازدهی حرارتی، دریافت کننده مرکزی، شار حرارتی متغیر، نمک مذاب

### 1- مقدمه

نیروگاه های خورشیدی با فناوری تمرکز نوری، در آینده نقش مهمی را در تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی تجدید پذیر و

علی زارع، دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهیدباهنر کرمان  
صندوق پستی: 76169-133-### (email: [alizareh1362@gmail.com](mailto:alizareh1362@gmail.com))  
مظفرعلی مهربان، استاد مکانیک، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهیدباهنر کرمان  
صندوق پستی: 76169-133-### (email: [ma\\_mehrabian@alum.mit.edu](mailto:ma_mehrabian@alum.mit.edu))  
مرتضی عبدالزاده، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمان  
صندوق پستی: 76169-133-### (email: [mabdolzadh@yahoo.com](mailto:mabdolzadh@yahoo.com))

### 2-3- بازدهی حرارتی دریافت کننده‌ی مرکزی

انرژی حرارتی منتقل شده به نمک مذاب و دمای ماکزیمم آن، از عوامل موثر در تعیین هزینه و بازدهی یک نیروگاه انرژی خورشیدی می‌باشند. بازدهی حرارتی لوله‌ی دریافت کننده‌ی مرکزی به صورت انرژی منتقل شده به نمک مذاب نسبت به انرژی متمرکز شده‌ی گل در سطح خارجی آن، تعریف می‌شود [6]. بازدهی حرارتی لوله‌ی دریافت کننده با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{th} = P_{out}/P_{in} \quad (1)$$

$$P_{out} = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss,conv} + P_{loss,rad} \quad (3)$$

که  $\eta_{th}$  بازدهی حرارتی،  $P_{in}$  انرژی متمرکز شده‌ی گل و  $P_{out}$  انرژی منتقل شده به نمک مذاب بر حسب کیلووات بر مترمربع،  $\dot{m}$  شار جرمی بر حسب کیلوگرم بر ثانیه،  $T_{in}$  و  $T_{out}$  به ترتیب دمای ورودی و خروجی نمک مذاب است.

### 2-4- سیال حامل انرژی

از نمک‌های مذاب به عنوان سیال حامل انرژی درون لوله‌ی دریافت کننده‌ی مرکزی استفاده می‌شود، زیرا ویژگی‌های حرارتی مطلوبی همچون ظرفیت حرارتی بالا و قابلیت هدایت حرارتی پایین دارند [7]. خواص نمک‌های مذاب به دما وابسته است. با در نظر گرفتن اثر خوردگی و خواص حرارتی، غالباً از نمک مذاب به عنوان سیال حامل انرژی استفاده می‌شود.

روابط مورد استفاده برای تعیین خواص یک نمونه نمک مذاب (مخلوط نیترات سدیم - نیترات پتاسیم با درصد حجمی برابر) بر حسب درجه حرارت عبارتند از [8]:

$$\rho = 2290.6 - 0.67606 \times T_{salt} [kg/m^3] \quad (4)$$

$$k = 0.697 - 0.461 \times 10^{-3} \times T_{salt} [W/m.K] \quad (5)$$

$$\mu = 7.4771 \times 10^{-5} \exp(1847/T_{salt}) [N.s/m^2] \quad (6)$$

$$C_p = 2108.2 - 1.0407 \times T_{salt} [J/kg.K] \quad (7)$$

$\mu$  لزجت دینامیکی سیال و  $T_{salt}$  دمای نمک مذاب بر حسب درجه‌ی کلون است.

برای اطمینان از درستی معادلات فوق، مقادیر حاصل از این معادلات در دمای ورودی 573,15 درجه کلون با مقادیر نظیر آن از مرجع [9] مقایسه گردید.

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، انتقال حرارت در جریان متلاطم سه بعدی درون لوله‌ی دریافت کننده‌ی به ازای مقادیر مختلف شار حرارتی، با در نظر گرفتن تغییرات خواص حرارتی نمک مذاب در دماهای مختلف، مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر عواملی همچون دمای ورودی و سرعت سیال، قطر و ضخامت دیواره‌ی لوله به ازای شارهای حرارتی مختلف، بر بازدهی حرارتی دریافت کننده و دمای ماکزیمم نمک مذاب، تعیین شود.

### 2-2- دریافت کننده‌ی مرکزی با نمک مذاب

#### 1-1- شکل هندسی دریافت کننده‌ی مرکزی

آرایش هندسی آینده‌های مستقر در میدان جمع کننده‌ی انرژی خورشیدی و شکل هندسی دریافت کننده‌ی مرکزی از پارامترهای مهم در طراحی دریافت کننده مرکزی با نمک مذاب می‌باشند [4]. لوله‌های دریافت کننده به صورت جداگانه در سطح خارجی دریافت کننده مرکزی قرار دارند. جنس این لوله‌ها معمولاً از آلیاژ فولاد ضدزنگ است که در برابر خوردگی حاصل از نمک مذاب مقاومت خوبی دارد. در این مقاله طول لوله‌ی دریافت کننده 1,8 متر و جنس آن از فولاد ضد زنگ SUS316 انتخاب شده است که دارای خواص حرارتی زیر می‌باشد:

$$\rho = 7980 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 649 \text{ kJ/kg.K}$$

$$k = 23.9 \text{ W/m.K}$$

که  $\rho$  چگالی،  $C_p$  گرمای ویژه در فشار ثابت و  $k$  ضریب هدایت حرارتی است.

#### 2-2- توزیع شار حرارتی

شار حرارتی که تنها به یک نیمه‌ی سطح خارجی لوله‌ی دریافت کننده می‌تابد، متغیر است [5]. کاهش شار حرارتی متمرکز شده، سبب کاهش هزینه‌های مربوط به آینده‌ها در میدان جمع کننده‌ی انرژی خورشیدی می‌شود؛ بنابراین انتخاب شار حرارتی بهینه از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین ماکزیمم دمایی که لوله‌ی دریافت کننده می‌تواند تحمل کند، در تعیین شار حرارتی مجاز به کار می‌رود. اتلاف حرارتی در سطح خارجی لوله‌ی دریافت کننده از طریق روش‌های جابجایی ( $P_{loss,conv}$ ) و تشعشعی ( $P_{loss,rad}$ ) صورت می‌گیرد. در این مقاله فرض شده است که شار حرارتی در سطح خارجی دریافت کننده یکنواخت است.

$$k_{air@304.15K} = 0.02693 \text{ W/m.K}$$

$$\mu_{air@304.15K} = 186.75 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$$

$$Pr_{air@304.15K} = 0.707$$

که  $\rho_{air@304.15K}$  چگالی،  $k_{air@304.15K}$  ضریب هدایت حرارتی،  $\mu_{air@304.15K}$  لزجت دینامیکی و  $Pr_{air@304.15K}$  عدد پراوتل هوا در دمای 304,15 درجهی کلویین می‌باشند. معمولا روابط زیر در جریان خارجی روی استوانه جهت به دست آوردن عدد بی‌بعد ناسلت در مسائل انتقال حرارت، استفاده می‌شوند [11]:

$$\overline{Nu}_D = 0.683 \times Re_D^{0.466} \times Pr^{1/3} \quad (8)$$

$$\overline{Nu}_D = 0.193 \times Re_D^{0.618} \times Pr^{1/3} \quad (9)$$

رابطه‌ی (8) برای اعداد رینولدز بین 40-4000 و رابطه‌ی (9) برای اعداد رینولدز بین 4000-40000 معتبر است. عدد رینولدز  $(Re_D)$ ، عدد ناسلت متوسط  $(\overline{Nu}_D)$  و ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط  $(\overline{h}_D)$  در جریان خارجی روی لوله‌ی دریافت‌کننده با قطرهای داخلی مختلف در شرایط آب و هوایی شهر کرمان در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1- ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در جریان خارجی روی لوله‌ی دریافت‌کننده در شرایط آب و هوایی شهر کرمان

$D_{in}$ (mm)	$Re_D$	$\overline{Nu}_D$	$\overline{h}_D$ (W/m <sup>2</sup> .K)
20	3304.5	26.55	35.8
30	4956.8	33.04	29.7
40	6609.1	39.46	26.6
50	8261.3	45.3	24.4

با توجه به جریان متلاطم درون لوله‌ی دریافت‌کننده، در نرم افزار فلونت، مدل تلاطم  $k - \epsilon$  با تابع دیواره‌ی استاندارد برای جریان نزدیک دیواره و حل‌کننده‌ی ضمنی گسسته<sup>1</sup>، انتخاب شده است. معادلات مورد استفاده در مدل فوق عبارتند از:

$$P = \mu_t \cdot \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_t \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P - \rho \epsilon \quad (11)$$

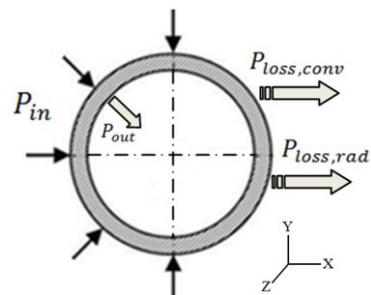
$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{1.3} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + 1.44 \frac{\epsilon}{k} P - 1.92 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (12)$$

$$\mu_t = 0.09 \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

P تولید انرژی جنبشی، k انرژی جنبشی جریان متلاطم،  $\epsilon$  اتلاف انرژی و  $\mu_t$  ضریب لزجت متلاطم است. همچنین روش آپویند<sup>2</sup> مرتبه‌ی دوم برای گسسته‌سازی معادله انرژی و الگوریتم سیمپل<sup>3</sup> برای ارتباط دادن سرعت و فشار به کار رفته است.

### 3- بررسی و تحلیل عوامل موثر در بازدهی حرارتی

در هنگام طراحی و ساخت لوله‌ی دریافت‌کننده، افت فشار و بازدهی حرارتی آن باید در شرایط بهینه قرار داشته باشد تا هزینه‌های مربوط به دریافت‌کننده‌ی مرکزی و آینه‌های جمع‌کننده‌ی انرژی خورشیدی کاهش یابد. نحوه‌ی انتخاب محورها در دستگاه مختصات کارتزین سه بعدی جهت ارائه‌ی نتایج و نیز شار حرارتی روی لوله‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی در شکل 1 نشان داده شده است:



شکل 1- شار حرارتی و مختصات در لوله‌ی دریافت‌کننده

برای محاسبه‌ی مقدار اتلاف حرارتی کل در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده، نیاز به داشتن مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در جریان خارجی روی استوانه و دمای محیط اطراف داریم. با توجه به اطلاعات اداره‌ی کل هواشناسی ایران [10]، سرعت میانگین باد و دمای متوسط هوا در یک دوره 10 ساله (1376-1385) برای شهر کرمان عبارتند از:

$$T_{avg,air} = 31.5 \text{ }^\circ\text{C} = 304.65 \text{ K}$$

$$V_{avg,wind} = 2.66 \text{ m/s}$$

که  $T_{avg,air}$  دمای متوسط هوا و  $V_{avg,wind}$  سرعت میانگین باد می‌باشد. دمای متوسط هوا برای محاسبه‌ی اتلاف حرارت جابجایی و دمای موثر آسمان برای محاسبه‌ی اتلاف حرارت تشعشعی، در سطح خارجی لوله‌ی دریافت‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون روابط متعددی برای محاسبه دمای موثر آسمان ارائه شده ولی در اکثر موارد دمای موثر آسمان را 8 درجه کمتر از دمای محیط اطراف در نظر می‌گیرند:

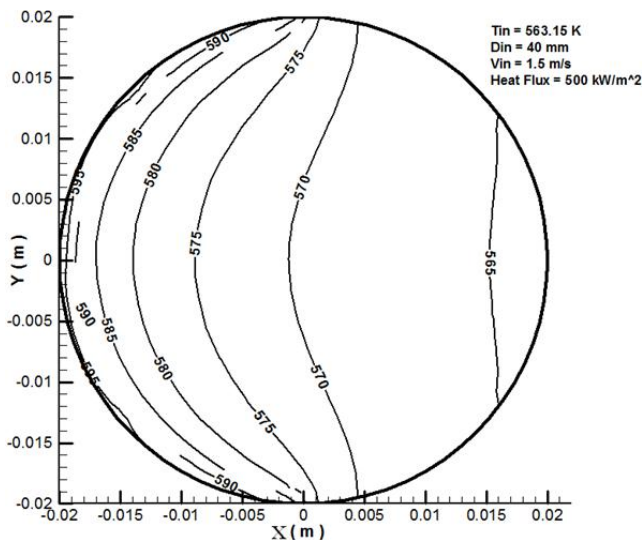
$$T_{eff,sky} = 23.5 \text{ }^\circ\text{C} = 296.65 \text{ K}$$

که  $T_{eff,sky}$  دمای موثر آسمان می‌باشد. با استفاده از جداول خواص حرارتی [11]، خواص هوا در دمای متوسط شهر کرمان عبارتند از:

$$\rho_{air@304.15K} = 1.16 \text{ kg/m}^3$$

شکل 2- نمودار بازدهی حرارتی بر حسب شار حرارتی متمرکز شده

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دمای ورودی نمک مذاب، بازدهی حرارتی لوله ی دریافت کننده ی مرکزی کاهش می یابد در حالی که دمای ماکزیمم سیال و اتلاف حرارتی افزایش می یابد. با وجود اینکه دمای ورودی نمک مذاب افزایش قابل توجهی دارد ولی بازدهی حرارتی تغییر کمی دارد، بنابراین می توان با افزایش دمای ورودی، لزجت نمک مذاب را پایین آورد و در نتیجه افت فشار درون لوله را کاهش داد. همچنین افزایش شار حرارتی در محدوده ی 100 تا 700 کیلووات بر مترمربع، باعث افزایش قابل توجهی در بازدهی حرارتی می شود ولی به ازای شارهای حرارتی بالاتر از 700 کیلووات بر مترمربع، تأثیر افزایش شار حرارتی در افزایش بازدهی حرارتی بسیار کم است. در اشکال 3 و 4 به ترتیب کانتورهای دما و تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله نشان داده شده است. با توجه به این شکل ها، ماکزیمم دمای نمک مذاب 598 درجه کلوین می باشد که با مقدار مندرج در جداول 2 و 3 انطباق دارد.



شکل 3- کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله

1. Implicit Segregated Solver
2. Second Order Upwind
3. Semi – Implicit Method for Pressure Linked Equations Revised

### 3-1- شار حرارتی متغیر و دمای ورودی

اثر دمای ورودی ( $T_{in}$ ) نمک مذاب و شار حرارتی متغیر بر بازدهی حرارتی، اتلاف حرارتی و دمای ماکزیمم نمک مذاب در یک دریافت کننده ی مرکزی در جداول 2 تا 4 و شکل 2 آورده شده است. ضخامت دیواره ی لوله 2 میلی متر است.  $q_{tot,loss}$  اتلاف حرارتی کل و  $T_{max,salt}$  دمای ماکزیمم نمک مذاب است.

جدول 2- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در دماهای ورودی مختلف

$$P_{in} = 500 \text{ kW/m}^2 \text{ و } V_{in} = 1.5 \text{ m/s و } D_{in} = 40 \text{ mm}$$

$T_{in,salt} \text{ (K)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
563.15	598.33	7893.17	86.04
583.15	619.24	8047.03	85.77
603.15	640.16	8208.62	85.48
623.15	661.1	8379.55	85.18

جدول 3- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

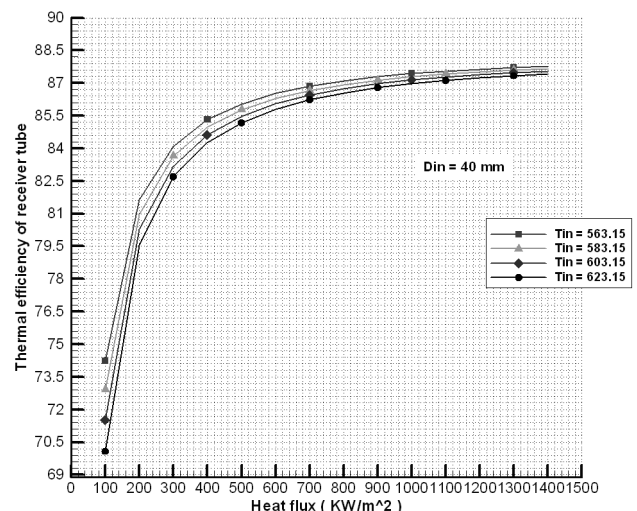
$$T_{in} = 563.15 \text{ (K)} \text{ و } V_{in} = 1.5 \text{ m/s و } D_{in} = 40 \text{ mm}$$

$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	569.62	2914.1	74.23
300	583.99	5396.94	84.1
500	598.33	7893.17	86.04
700	612.69	10405.43	86.86

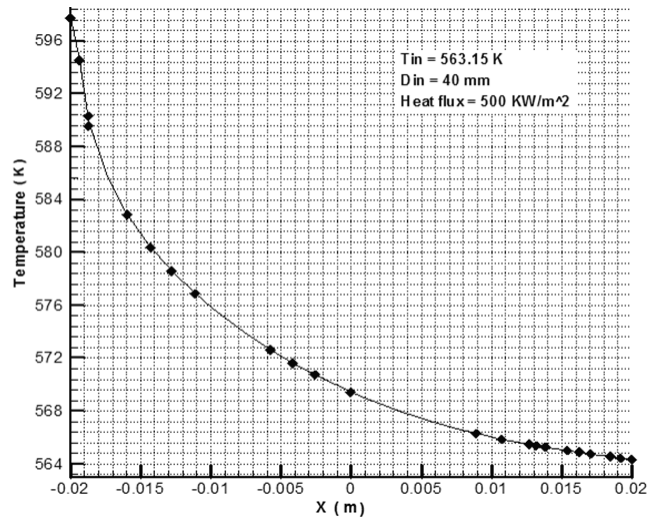
جدول 4- مشخصه های دریافت کننده مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

$$T_{in} = 583.15 \text{ (K)} \text{ و } V_{in} = 1.5 \text{ m/s و } D_{in} = 40 \text{ mm}$$

$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	589.75	3064.81	72.9
300	604.5	5548.81	83.65
500	619.24	8047.04	85.77
700	633.97	10562.06	86.66



افزایش سرعت ورودی نمک مذاب در شارهای حرارتی مختلف، سبب کاهش دمای ماکزیمم و اتلاف حرارتی می شود. در شارهای حرارتی پایین، افزایش سرعت تأثیر بسیار کمی در بازدهی حرارتی دارد اما در شارهای حرارتی بالا، تنها در صورتی که سرعت ورودی نمک مذاب کم باشد، افزایش سرعت مطلوب است. در اشکال 6 و 7 به ترتیب کانتورهای دما و تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله نشان داده شده است. با توجه به این شکل ها، ماکزیمم دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله 591 درجه کلوین می باشد که با مقدار مندرج در جدول 6 انطباق دارد.



شکل 4- تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله

### 2-3- شار حرارتی متغیر و سرعت ورودی

اثر شار حرارتی متغیر بر بازدهی حرارتی، اتلاف حرارتی و دمای ماکزیمم نمک مذاب در یک دریافت کننده مرکزی با سرعت های ورودی  $V_{in}$  1,5 و 3 متر بر ثانیه به ترتیب در جداول 5 و 6 و شکل 5 آورده شده است. ضخامت دیواره ی لوله 2 میلی متر است.

جدول 5- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

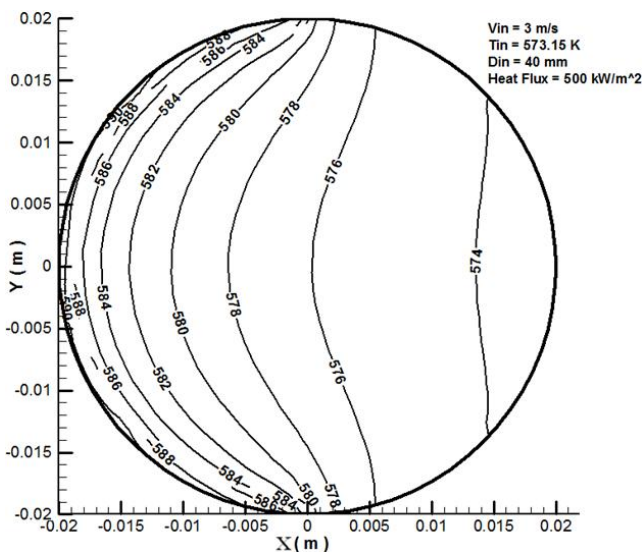
$T_{in} = 573.15 \text{ (K)}$  و  $V_{in} = 1.5 \text{ m/s}$  و  $D_{in} = 40 \text{ mm}$

$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	579.68	2988.7	73.57
300	594.25	5471.9	83.87
500	608.8	7968.91	85.91
700	623.33	10482.27	86.76

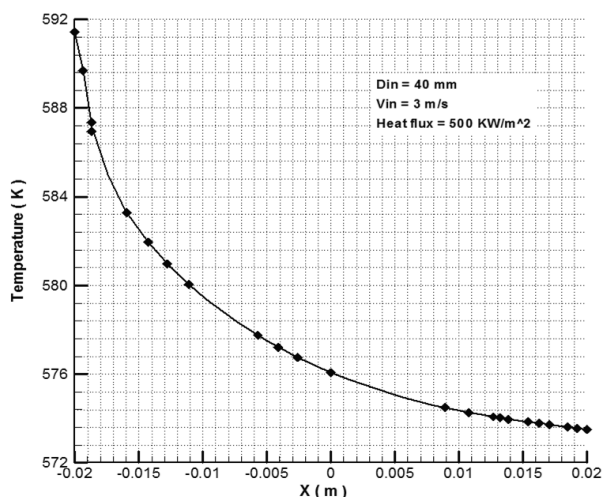
جدول 6- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

$T_{in} = 573.15 \text{ (K)}$  و  $V_{in} = 3 \text{ m/s}$  و  $D_{in} = 40 \text{ mm}$

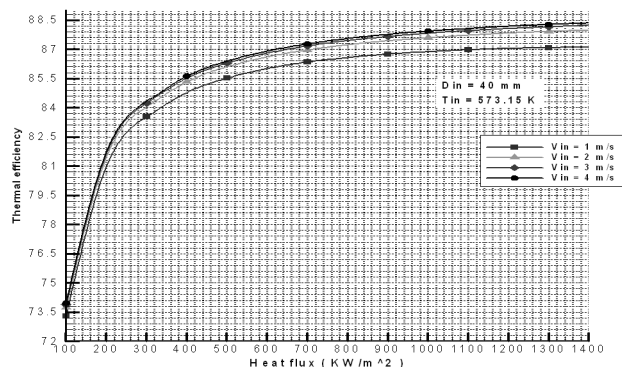
$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	576.5	2954.33	73.88
300	584.14	5350.69	84.23
500	591.78	7751.8	86.29
700	599.41	10158.24	87.17



شکل 6- کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله

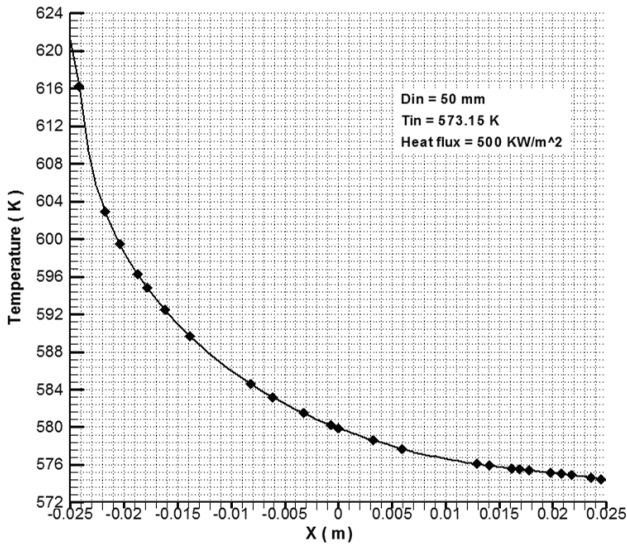


شکل 7- تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله



شکل 5- نمودار بازدهی حرارتی بر حسب شار حرارتی متمرکز شده

مذاب و اتلاف حرارتی می شود. برای تمامی قطرها، شار گرمی ثابت در نظر گرفته شده است. در اشکال 9 و 10 به ترتیب کانتهورهای دما و تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله نشان داده شده است. با توجه به این شکلها، ماکزیمم دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله 622 درجه کلوین می باشد که با مقدار مندرج در جدول 8 انطباق دارد.



شکل 10- تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله

### 3-4- شار حرارتی متغیّر و ضخامت دیواره ی لوله

اثر شار حرارتی متغیّر بر بازدهی حرارتی، اتلاف حرارتی و دمای ماکزیمم نمک مذاب در یک دریافت کننده ی مرکزی با ضخامت های دیواره (t) 3 و 5 میلی متر به ترتیب در جداول 9 و 10 و شکل 11 آورده شده است. سرعت ورودی نمک مذاب 1,5 متر بر ثانیه است.

جدول 9- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

$T_{in} = 573.15 \text{ (K)}$  و  $t = 3 \text{ mm}$  و  $D_{in} = 40 \text{ mm}$

$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	579.68	2993.98	73.53
300	594.23	5493.87	83.81
500	608.77	8009.8	85.84
700	623.29	10544.95	86.68

جدول 10- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

$T_{in} = 573.15 \text{ (K)}$  و  $t = 5 \text{ mm}$  و  $D_{in} = 40 \text{ mm}$

$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	579.67	3004.56	73.43
300	594.2	5538.03	83.68
500	608.71	8092.68	85.69
700	623.2	10673.13	86.52

### 3-3- شار حرارتی متغیّر و قطر ورودی

اثر شار حرارتی متغیّر بر بازدهی حرارتی، اتلاف حرارتی و دمای ماکزیمم نمک مذاب در یک دریافت کننده ی مرکزی با قطرهای داخلی ( $D_{in}$ ) 20 و 50 میلی متر به ترتیب در جداول 7 و 8 و شکل 8 آورده شده است. ضخامت دیواره ی لوله 2 میلی متر است.

جدول 7- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

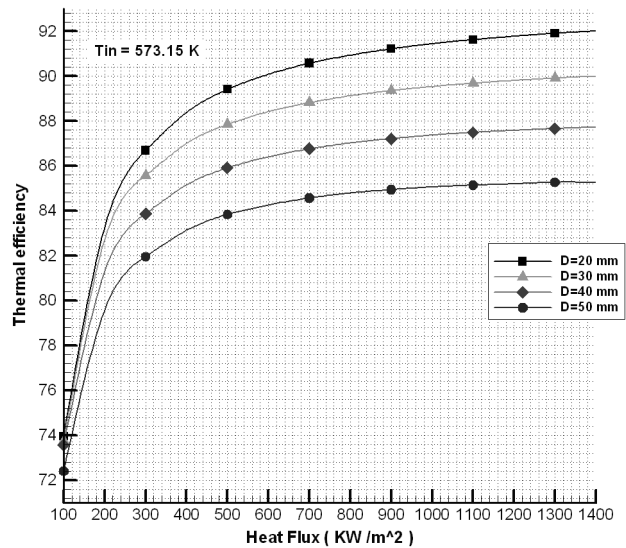
$T_{in} = 573.15 \text{ (K)}$  و  $V_{in} = 1.5 \text{ m/s}$  و  $D_{in} = 20 \text{ mm}$

$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	575.27	1524.01	73.95
300	580.42	2259.35	86.68
500	585.57	2995.65	89.41
700	590.72	3732.98	90.57

جدول 8- مشخصه های دریافت کننده ی مرکزی در شارهای حرارتی مختلف

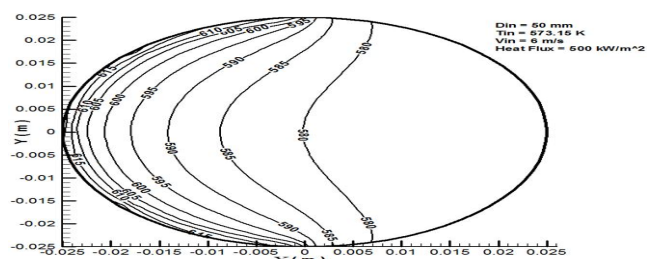
$T_{in} = 573.15 \text{ (K)}$  و  $V_{in} = 6 \text{ m/s}$  و  $D_{in} = 50 \text{ mm}$

$P_{in} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$T_{max,salt} \text{ (K)}$	$q_{tot,loss} \text{ (W)}$	$\eta_{th}$
100	582.28	3900.31	72.41
300	602.39	7652	81.96
500	622.47	11423.46	83.84
700	642.5	15270.76	84.57



شکل 8- نمودار بازدهی حرارتی بر حسب شار حرارتی متمرکز شده

کاهش قطر لوله در شارهای حرارتی مختلف، سبب افزایش بازدهی حرارتی دریافت کننده ی مرکزی و کاهش دمای ماکزیمم نمک

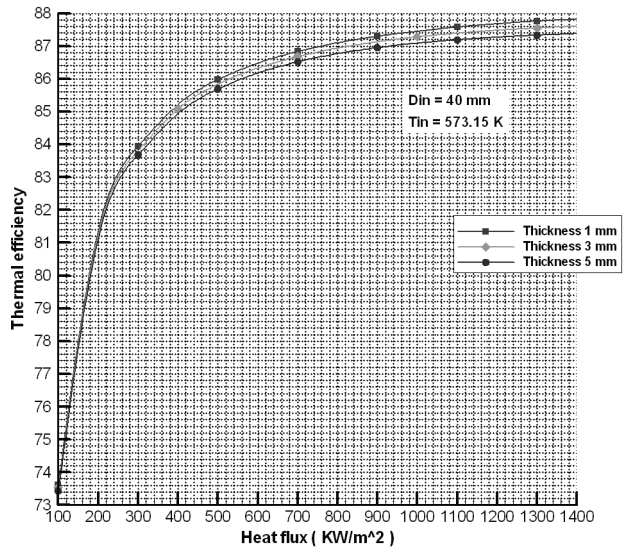
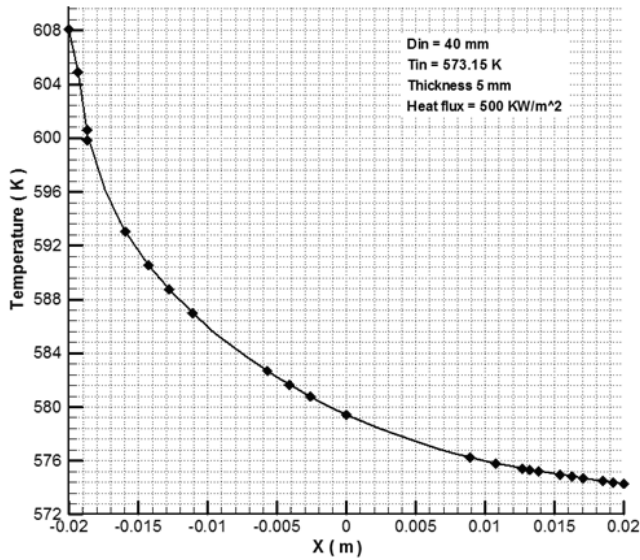


شکل 9- کانتهورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله

شکل 12- کانتورهای دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله

در شکل های 12 و 13 به ترتیب کانتورهای دما و تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله نشان داده شده است.

شکل 13- تغییر شعاعی دمای نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله



شکل 11- نمودار بازده حرارتی بر حسب شار حرارتی متمرکز شده

#### 4- نتیجه گیری و جمع بندی

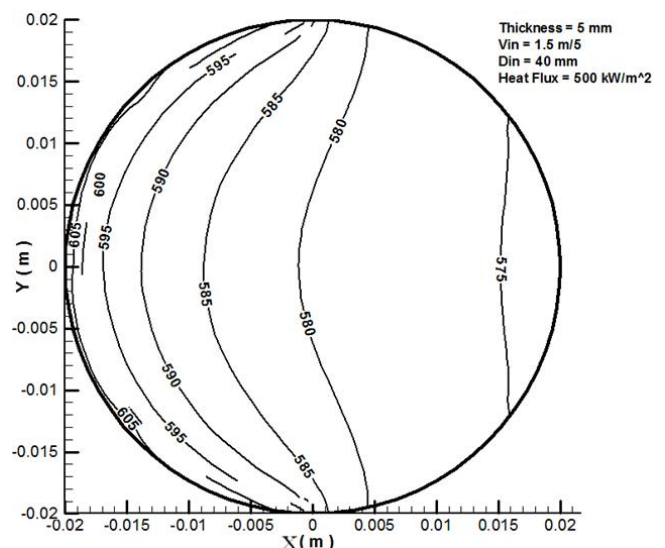
بازدهی حرارتی و دمای ماکزیمم نمک مذاب از عوامل موثر در طراحی دریافت کننده های مرکزی و میدان جمع کننده ای انرژی خورشیدی می باشند؛ از این رو بررسی عوامل موثر در بازدهی حرارتی دریافت کننده های مرکزی از اهمیت خاصی برخوردار است. با استفاده از نتایج حاصله در این مقاله، استنتاج می شود که افزایش شار حرارتی باعث افزایش بازدهی حرارتی می شود ولی به تدریج با بالا رفتن شار حرارتی، اثر آن بر بازدهی حرارتی کم می شود؛ به طوری که جهت کاهش هزینه ها، بهتر است انرژی خورشیدی را برای دستیابی به شار حرارتی در بازه ای 400 الی 700 کیلووات بر مترمربع متمرکز نمود.

افزایش ضخامت دیواره ی لوله ی دریافت کننده در شارهای حرارتی مختلف، تأثیر بسیار کمی بر دمای ماکزیمم نمک مذاب دارد ولی اتلاف حرارتی را افزایش می دهد.

در شارهای حرارتی بالاتر از 400 کیلووات بر مترمربع، افزایش ضخامت دیواره سبب کاهش بازدهی حرارتی دریافت کننده ی مرکزی می شود ولی در شارهای حرارتی پایین تر از 400 کیلووات بر مترمربع تأثیری بر بازدهی حرارتی ندارد. درجه حرارت ماکزیمم

افزایش دمای ورودی نمک مذاب تأثیر کمی در کاهش بازدهی حرارتی دارد؛ در نتیجه می توان با افزایش دمای ورودی لزجت نمک مذاب را کاهش داد که این امر، کاهش افت فشار و انرژی مصرفی پمپ و در نتیجه افزایش بازدهی کل نیروگاه خورشیدی را در پی خواهد داشت.

کاهش قطر لوله در تمامی شارهای حرارتی، بازدهی حرارتی را افزایش می دهد؛ در حالی که افزایش سرعت سیال حامل انرژی و کاهش ضخامت دیواره ی لوله تنها در شارهای حرارتی بالا باعث افزایش بازدهی حرارتی می شوند و به ازای شارهای حرارتی پایین، تأثیری در بازدهی حرارتی ندارند. باید توجه داشت که افزایش سرعت در شارهای حرارتی پایین اثری نامطلوب است زیرا افزایش



نمک مذاب در سطح مقطع خروجی لوله با توجه به شکل های زیر 608 درجه کلونین می باشد که با مقدار مندرج در جدول 10 انطباق دارد.

افت فشار را در پی دارد در حالی که بر بازدهی حرارتی لوله‌ی دریافت‌کننده‌ی مرکزی خورشیدی بی‌تأثیر است.

## 5- مراجع

- [1] G. Carli and M. T. Keating, Design and Fabrication of absorber panels for a 5MWt molten salt test solar receiver, *Solar Engineering*, 488-493, 1987.
- [2] E. M. Sparrow and S. H. Lin, Turbulent heat transfer in a tube with circumferentially-varying temperature or heat flux, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.6, 866-867, 1963.
- [3] D. Gartner, K. Johanssen and H. Ramm, Turbulent heat transfer in a circular tube with circumferentially varying thermal boundary conditions, *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 17. 1003-1018, 1973.
- [4] H. Hasuike, Y. Yoshizawa, A. Suzuki and Y. Tamaura, Study on design of molten salt receivers for beam-down solar concentrator, *Solar Energy* (80), 1255-1262, 2006.
- [5] C. Chang, Z. Wang, X. Li, F. Bai, Y.H. Kang and J.K. Kim, Analysis of turbulent heat transfer in solar power tower molten salt receiver tube, *Ises Solar World Congress*, Beijing, China, 1701-1705, 2007.
- [6] J.M. Lata, M. Rodríguez and M.A. Lara, High flux central receivers of molten salts for the new generation of commercial stand-alone solar power plants. in *Solar PACES: 13th Internationalon Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*. 2006. Sevilla, SP.
- [7] J.I. Ortega, J.I. Burgaleta and F.M. Téllez, Central Receiver System (CRS) Solar Power Plant using Molten Salt as Heat Transfer Fluid. in *SolarPACES: 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, 2006, Sevilla,SP.
- [8] [Http://ras.material.tohoku.ac.jp/~molten](http://ras.material.tohoku.ac.jp/~molten).
- [9] Japan society of Thermophysical Properties (Ed.), *Thermophysical Properties Handbook*, Second ed. Yokendo Ltd., Tokyo, pp.107-108.
- [10] [Http://www.irimo.ir/farsi/amar/map/index.asp](http://www.irimo.ir/farsi/amar/map/index.asp).
- [11] F. Incropera and D. DeWitt (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Third Edition. New York, NY: John Wiley and Sons.