



## تحلیل حرارتی دیوار خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز حاوی نانو ذرات

محسن ایرانی، فرامرز سرحدی\*، امین بهزادمهر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

بذیرش:

ارائه آنلاین:

### کلمات کلیدی:

دیوار خورشیدی

ماده تغییر فاز بهبود یافته

نانو لوله‌های کربنی

نانو ذرات کروی اکسید آلومینیوم

**چکیده:** در این مقاله تحلیل حرارتی دیوار خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز حاوی نانو ذرات به صورت عددی بررسی شده است. معادله حاکم بر مسئله انتقال حرارت هدایتی گذرا می‌باشد و توسط تکنیک اختلاف محدود بر پایه روش آنتالپی حل شده است. اعتبارسنجی نتایج عددی تحقیق حاضر با داده‌های تجربی تحقیقات گذشته انجام شده است و توافق مناسبی برقرار است. در مطالعات پارامتری تأثیر کسر حجمی نانو لوله‌های کربنی و نانو ذرات کروی اکسید آلومینیوم و اثر تغییر ضخامت ماده تغییر فاز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهبود مناسبی در عملکرد حرارتی دیوار خورشیدی به واسطه افزودن نانو لوله‌های کربنی و نانو ذرات کروی اکسید آلومینیوم به ماده تغییر فاز پایه حاصل می‌شود. البته نانو لوله‌های کربنی عملکرد بهتری را در اختیار می‌گذارند. دلایل این بهبود شامل افزایش سرعت انتقال حرارت به واسطه افزایش رسانندگی حرارتی و همچنین کامل شدن فرآیندهای ذوب و انجماد در ماده تغییر فاز می‌باشد. برآیند این اتفاقات افزایش راندمان حرارتی دیوار خورشیدی به اندازه ۹٪ برای نانو لوله‌های کربنی با کسر حجمی ۳٪ است. در کل از نتایج تحقیق حاضر می‌توان برای طراحی یک دیوار خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز با راندمان حرارتی در حدود ۴۰٪ استفاده کرد.

### ۱- مقدمه

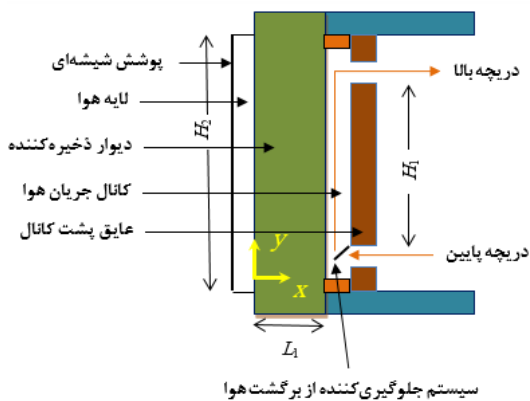
امروزه با رشد فزاینده مصرف انرژی در جوامع بشری، اتمام‌پذیری سوخت‌های فسیلی، آلاینده‌گی و مسائل زیست محیطی ناشی از مصرف آن، استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی خورشیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. ساده‌ترین و متداول‌ترین طرح برای ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی و استفاده از آن جهت گرمایش فضا، دیوار خورشیدی می‌باشد. در یک دیوار خورشیدی باید بتوان انرژی خورشیدی با سرعت بالا ذخیره کرد تا از اتلاف این انرژی جلوگیری شود و با توجه به نیاز در زمان مناسب آزاد کرد. از این رو دیوارهای خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز می‌باشند. راندمان دیوارهای خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز با توجه به نوع ماده تغییر فاز و شرایط اقلیمی مکان مورد استفاده آن در حدود ۳۶-۲۵٪ می‌باشد [۱ و ۲]. مواد تغییر فاز متداول (پارافین و نمک‌های هیدراته) علی‌رغم توانایی مناسب در ذخیره انرژی به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی از سرعت مناسبی در ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی برخوردار نمی‌باشند. افزودن نانو ذرات و نانو لوله‌های کربنی به ماده تغییر فاز می‌تواند راهکاری برای افزایش ضریب هدایت حرارتی آن باشد. تحقیقات متعددی در خصوص بررسی عملکرد دیوارهای خورشیدی انجام شده است. ترومب و همکاران [۳] در سال ۱۹۷۷ در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی

عملکرد یک دیوار خورشیدی معمولی پرداختند. دیوار مورد مطالعه آن‌ها تابش خورشیدی جذب شده را توسط مکانیزم انتقال حرارت هدایتی به اتاق پشت دیوار با زمان تأخیر طولانی منتقل می‌کرد. آن‌ها جهت کاهش اتلافات حرارتی به محیط از یک پوشش شیشه‌ای در قسمت بیرونی دیوار استفاده کردند. با استفاده از پوشش شیشه‌ای، مقدار جریان حرارت منتقل شده به داخل اتاق افزایش یافت. انیسی و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۱ گرمایش یک اتاق مجهز به دیوار خورشیدی و هیتر الکتریکی را توسط دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از مواد تغییر فاز باعث بهبود گرمایش فضا و در نتیجه کاهش مصرف انرژی توسط هیتر الکتریکی می‌شود. خدادادی و حسینی‌زاده [۵] در سال ۲۰۰۷ به بررسی و مطالعه بهبود خواص سیال پایه آب در اثر افزودن نانو ذرات کروی اکسید مس به عنوان منبع ذخیره انرژی در فاز انجماد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ماده تغییر فاز نانوسیال دارای ضریب هدایت حرارتی و نرخ آزادسازی حرارت به مراتب بالاتری نسبت به ماده تغییر فاز معمولی می‌باشد. زالوسکی و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۲ راندمان یک دیوار خورشیدی مقیاس کوچک مجهز به ماده تغییر فاز به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آن‌ها مواد تغییر فاز به صورت بسته‌هایی به فرم آجر حاوی نمک‌های هیدراته با دمای ذوب ۲۷ °C می‌باشد. در مطالعه آن‌ها مجموع انرژی خورشید ورودی به دیوار در حدود ۷۸ kWh/m<sup>۲</sup> و انرژی منتقل شده

خواص ترموفیزیکی منحصر به فردشان می‌توانند به عنوان یک کاندیدای اصلی برای بهبود ضریب هدایت حرارتی مواد تغییر فاز به کار گرفته شوند. در تحقیقات گذشته [۹-۱]، اثر افزودن نانو ذرات و به خصوص نانو لوله‌های کربنی به ماده تغییر فاز پارافین برای بهبود ضریب هدایت حرارتی آن جهت کاربرد در دیوار خورشیدی بررسی نشده است. لذا در تحقیق حاضر با یک دید کاربردی و عملی به مطالعه عددی اثر افزودن نانو ذرات کروی اکسید آلومینیوم و نانو لوله‌های کربنی به ماده تغییر فاز پارافین به منظور بهبود عملکرد حرارتی آن جهت کاربرد در دیوار خورشیدی برای شهر زاهدان پرداخته می‌شود.

## ۲- معادلات حاکم بر مسئله

دیوار مورد بررسی تحقیق حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزاء دیوار مذکور از سمت فضای بیرون به سمت داخل فضای اتاق به ترتیب شامل پوشش شیشه‌ای، لایه هوا، دیوار ذخیره‌کننده انرژی (حاوی ماده تغییر فاز بهبود یافته)، کانال جریان هوا، عایق پشت کانال هوا و دریچه‌های جریان هوا برای انتقال هوای گرم به داخل اتاق می‌باشد. نحوه عملکرد سیستم دیوار خورشیدی بدین گونه است که انرژی خورشیدی پس از عبور از پوشش شیشه‌ای توسط دیوار جذب می‌شود. دیوار خورشیدی قسمت عمده انرژی جذب شده را ذخیره می‌سازد و باقیمانده انرژی را به جریان سیال داخل کانال جهت گرمایش اتاق منتقل می‌کند. شایان ذکر است انرژی ذخیره شده توسط دیوار خورشیدی در زمان مناسب مانند ساعات عدم وجود تابش خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱: دیوار خورشیدی مورد مطالعه

- فرض‌های استفاده شده برای فرمول‌بندی مسئله به شرح زیر می‌باشد [۳]:
- مکانیزم اصلی انتقال حرارت در دیوار ذخیره‌کننده هدایت حرارتی است.
  - انتقال حرارت یک بعدی و در راستای ضخامت دیوار ذخیره‌کننده انجام می‌شود.

به جریان هوا در کانال در حدود  $23/5 \text{ kWh/m}^2$  می‌باشد که این موضوع یک راندمان در حدود ۳۰ درصد برای دیوار خورشیدی مورد مطالعه در اختیار می‌گذارد. بریگاسا و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۴ یک روش محاسباتی برای بررسی عملکرد حرارتی دیوار خورشیدی دریچه باز و دریچه بسته بر اساس استاندارد (E) ISO ۱۳۹۰۰: ۲۰۰۸ در طول فصول سرد و گرم برای شرایط آب و هوایی کشور پرتغال ارائه دادند. نتایج محاسبات آن‌ها نشان می‌دهد که راندمان دیوار خورشیدی در حالت دریچه باز نسبت به دریچه بسته به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. علاوه بر این آن‌ها مشاهده کردند که اگر برای گرمایش فضا از دیوار خورشیدی استفاده شود مصرف انرژی حرارتی لازم برای فضای مورد نظر در حدود ۱۶ درصد کاهش می‌یابد. عباسی و دهمانی [۷] در سال ۲۰۱۵ عملکرد یک دیوار خورشیدی را که مجهز به فین‌های حرارتی در سمت داخلی اتاق بود به طور آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از فین باعث بهبود انتقال حرارت به اتاق و افزایش ۷ درصدی راندمان دیوار خورشیدی می‌گردد. لویز و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ ارزیابی عملکرد حرارتی یک سیستم اتاق متصل به دیوار خورشیدی را برای داده‌های آب و هوایی دو شهر مختلف در مکزیک ارائه کرد. کد محاسباتی آن‌ها براساس روش حجم محدود بود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در حدود ۶۰٪ از تابش خورشیدی رسیده به سیستم به صورت اتلاف حرارت هدر می‌رود. علی‌رغم درصد بالا اتلاف حرارت، سیستم آن‌ها توانایی حفظ دمای اتاق را در حدود  $35^\circ\text{C}$  دارا بود. همچنین آن‌ها مقدار ذخیره انرژی را در طول سردترین و گرمترین روز به ترتیب  $109 \text{ MJ}$  و  $70 \text{ MJ}$  گزارش کردند. یو و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷ در یک تحقیق آزمایشگاهی عملکرد حرارتی یک دیوار خورشیدی فعال را برای شرایط آب و هوایی شانگهای بررسی کردند. آزمایشات آن‌ها در روزهای نمونه برای فصول تابستان و زمستان انجام شد و نتایج حاصل با یک دیوار خورشیدی معمولی مقایسه شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در روز تابستانی گرمای مفید دریافتی دیوار خورشیدی فعال در حدود ۲ تا ۳ درصد کمتر و شار حرارتی رسیده به اتاق در حدود ۵۵ تا ۶۳ درصد کمتر از دیوار خورشیدی معمولی است که این موضوع برای روز تابستانی مطلوب است چون کاهش دمای اتاق را به دنبال دارد. از سوی دیگر در روز زمستانی گرمای مفید دریافتی حدود ۵ تا ۸ درصد بیشتر و اتلاف حرارت نیز در حدود ۸۰ تا ۸۸ درصد کمتر از دیوار خورشیدی معمولی است. لذا دیوار خورشیدی فعال با کاهش دمای اتاق در تابستان و افزایش دمای اتاق در زمستان عملکرد بهتری را نسبت به دیوار خورشیدی معمولی در اختیار می‌گذارد.

اصولاً مواد تغییر فاز متداول به دلیل گرمای نهان بالا از توانایی مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی برخوردار هستند. ولی به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین، فرایندهای ذوب و انجماد در آن‌ها بسیار کند صورت می‌گیرد و سرعت فرایند آزادسازی و انتقال انرژی در آن‌ها چندان بالا نیست. لذا این موضوع کاربرد مواد تغییر فاز را در بهبود عملکرد دیوارهای خورشیدی بسیار محدود کرده است. نانو ذرات و به خصوص نانو لوله‌های کربنی به دلیل

در این جا  $\Phi_{vol}$  نشان دهنده کسر حجمی نانو ذرات است. گرمای نهان مؤثر مواد تغییر فاز بهبودیافته توسط نانو ذرات به صورت مقابل محاسبه می‌گردد:

$$(\rho L)_{eff} = (1 - \Phi_{vol})(\rho L)_{PCM} \quad (۸)$$

که در آن  $L$  گرمای نهان ماده تغییر فاز می‌باشد.

برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی مؤثر مواد تغییر فاز بهبودیافته توسط نانو لوله‌های کربنی به ترتیب از مدل بهبودیافته نان<sup>۲</sup> در فاز جامد و مدل بهبود یافته یامادا<sup>۳</sup> در فاز مایع استفاده شده است [۱۴-۱۱]. مدل بهبود یافته نان به صورت زیر معرفی می‌گردد [۱۳ و ۱۲]:

$$\frac{k_{eff}}{k_{PCM}} = \frac{3 + \Phi(B_x + B_z)}{3 - \Phi B_x} \quad (۹)$$

که در آن:

$$B_x = \frac{2(k_{11}^c + k_{PCM})}{k_{11}^c + k_{PCM}}, \quad B_z = \frac{k_{33}^c}{k_{PCM}} - 1 \quad (۱۰)$$

در این جا پارامترهای  $k_{11}^c$  و  $k_{33}^c$  به ترتیب معادل با هدایت حرارتی در راستای محورهای عرضی و طولی یک سلول واحد کامپوزیت می‌باشند [۱۳ و ۱۲]:

$$k_{11}^c = \frac{k_{CNT}}{1 + \frac{2a_k}{d} \frac{k_{CNT}}{k_{PCM}}}, \quad k_{33}^c = \frac{k_{CNT}}{1 + \frac{2a_k}{L_{CNT}} \frac{k_{CNT}}{k_{PCM}}}, \quad (۱۱)$$

$$a_k = R_k K_{PCM}$$

پارامترهای  $k_{CNT}$ ،  $R_k$ ،  $L_{CNT}$ ،  $d$  به ترتیب معرف ضریب هدایت حرارتی نانو لوله کربنی، ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز پایه، مقاومت حرارتی سطحی بین نانو لوله کربنی و ماده تغییر فاز، طول نانو لوله کربنی، قطر نانو لوله کربنی می‌باشند. مدل بهبود یافته یامادا به صورت زیر می‌باشد [۱۴ و ۱۵]:

$$\frac{k_{eff}}{k_{PCM}} = \frac{\frac{k_{p,m}}{k_{PCM}} + \alpha - \alpha \Phi_N \left[ 1 - \left( \frac{k_{p,m}}{k_{PCM}} \right) \right]}{\frac{k_{p,m}}{k_{PCM}} + \alpha + \Phi_N \left[ 1 - \left( \frac{k_{p,m}}{k_{PCM}} \right) \right]} \quad (۱۲)$$

که در آن

$$k_{p,m} = \frac{k_{p,N}}{1 + \left( \frac{2k_{p,N}G}{L_N} \right)}, \quad (۱۳)$$

$$\alpha = 2\Phi_N^{0.2} \frac{L_N}{d}, \quad \Phi_N = \eta\Phi$$

• تغییر فاز در صورت وقوع در دمای ثابت خواهد بود.

• فرو سرمایش<sup>۱</sup> و فوق گرمایش رخ نمی‌دهد.

• تغییر حجم ماده‌ی تغییر فاز قابل صرف‌نظر است.

معادله حاکم بر تحلیل انتقال حرارت دیوار ذخیره‌کننده مجهز به مواد

تغییر فاز بهبودیافته توسط نانو ذرات به صورت زیر معرفی می‌شود [۳].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_{eff}}{\rho_{eff} C_{p,eff}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (۱)$$

در معادله (۱) پارامترهای  $T$ ،  $x$ ،  $t$ ،  $k_{eff}$ ،  $C_{p,eff}$  و  $\rho_{eff}$  به ترتیب دما، مکان، زمان، ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی می‌باشند.

شرایط مرزی مسئله به صورت زیر معرفی می‌گردد [۳]:

در مرز  $x = 0$

$$\rho_{eff} L \frac{\partial H}{\partial t} = q_1 - U [T(0,t) - T_1] - k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (۲)$$

در مرز  $x = L$

$$\rho_{eff} L \frac{\partial H}{\partial t} = k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_1} - h_2 [T(L_1,t) - T_{mean}] \quad (۳)$$

در معادلات (۲) و (۳) پارامترهای  $q_1$ ،  $U$ ،  $H$ ،  $T_1$ ،  $T_{mean}$  و  $h_2$  به ترتیب شار خورشیدی جذب شده، آنتالپی، ضریب انتقال حرارت کلی، دمای هوای محیط، دمای متوسط هوای داخل کانال و ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌باشند. در مسائل تغییر فاز به دلیل تغییر فاز جامد به مایع یا برعکس مرز متغیر وجود دارد. روش آنتالپی مرز متغیر را به صورت جریان جرمی انرژی ورودی یا خروجی معادل سازی می‌کند. ترم‌های گذار معادلات (۲) و (۳) نشان‌دهنده ورود یا خروج همان جریان جرمی انرژی معادل در مجاورت نقاط مرز ابتدا و انتهای ماده تغییر فاز می‌باشد. پس از محاسبه دمای  $T(L_1,t)$  شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$q_{in} = h_2 (T(L_1,t) - T_{mean}) \quad (۴)$$

راندمان دیوار خورشیدی به صورت زیر معرفی می‌گردد.

$$Efficiency = \frac{q_{in}}{q_1} \times 100 \quad (۵)$$

برای پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی مؤثر مربوط به مواد تغییر فاز بهبودیافته توسط نانو ذرات از تئوری ترکیب استفاده می‌شود [۱۰]. لذا ظرفیت حرارتی ویژه، چگالی و گرمای نهان به صورت زیر معرفی می‌گردند:

$$\rho_{eff} = (1 - \Phi_{vol}) \rho_{PCM} + \Phi_{vol} \rho_{NP} \quad (۶)$$

$$(\rho C_p)_{eff} = (1 - \Phi_{vol}) (\rho C_p)_{PCM} + \Phi_{vol} (\rho C_p)_{NP} \quad (۷)$$

2 Nan  
3 Yamda

1 subcooling

$$H_1^{p+1} = H_1^p + \frac{2\Delta t}{\rho_{eff} \Delta x} [q_1 + U(T_1 - T_1^p) + k_{eff}(T_2^p - T_1^p)] \quad (21)$$

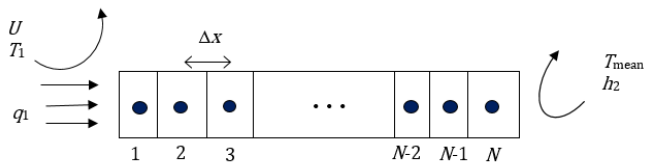
$$H_N^{p+1} = H_N^p + \frac{2\Delta t}{\rho_{eff} \Delta x} [h_2(T_{mean} - T_N^p) + k_{eff}(T_{N-1}^p - T_N^p)] \quad (22)$$

توسط روش آنتالپی معادله حاکم (۱) و شرایط مرزی مربوطه به معادلات (۲۰) تا (۲۲) تبدیل می‌شود. در این معادلات ترم آنتالپی با توجه به دمای ماده تغییر فاز در حوزه حل بر مبنای گرمای محسوس و گرمای نهان (تغییر فاز) محاسبه می‌گردد [۱۸]. یک کد محاسباتی بر اساس معادلات (۲۰) تا (۲۲) برای پیش‌بینی رفتار حرارتی دیوار خورشیدی نوشته شده است. شایان ذکر است که گام زمانی و گام مکانی برای حل عددی مسئله بر مبنای استقلال شبکه تعیین می‌شود. همچنین چون برای حل عددی مسئله از روش صریح استفاده شده است لذا باید گام زمانی و گام مکانی در ملاک پایداری کورانت ۲ به شرح زیر نیز صدق کند [۱۸].

$$\frac{\Delta x^2}{\Delta t} \frac{\rho_{eff} C_{p,eff}}{2k_{eff}} < 1 \quad (23)$$

در این جا  $\Delta t$  گام زمانی و  $\Delta x = L_1 / N$  گام مکانی شبکه حل عددی می‌باشند. مطابق شکل ۲ دیوار ذخیره‌کننده به  $N$  گره تقسیم شده است.

با فرض این که هوا در دمای اتاق وارد کانال جریان هوا می‌شود و انتقال حرارت جریان هوا یک بعدی و در راستای طول کانال باشد دمای هوای داغ خروجی از کانال که به محفظه اتاق وارد می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۰].



شکل ۲: نمای شبکه گسسته‌سازی شده دیوار خورشیدی برای حل عددی

$$T_{UV} = (T_{LV} - T_N^p) \exp^{-\frac{h_2 b}{\dot{m} C_{p,air}} H_2} + T_N^p \quad (24)$$

$$T_{mean} = (T_{LV} + T_{UV}) / 2 \quad (25)$$

$$L_N = \eta L_{CNT} \quad , \quad k_{p,N} = \eta k_{CNT} \quad (14)$$

در معادلات (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) پارامترهای  $\Phi_N$ ،  $G$  و  $\eta$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی سطحی بین نانو لوله کربنی و سیال، کسر حجمی نانو لوله کربنی و طول مؤثر میانگین می‌باشند.

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانو لوله کربنی ( $k_{CNT}$ ) که در روابط بالا استفاده شد از مدل پاپ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] استفاده می‌گردد.

$$k_{CNT} = \left[ 3.7 \times 10^{-7} T + 9.7 \times 10^{-10} T^2 + 9.3 \left( 1 + \frac{0.5}{L_{CNT}} \right) T^{-2} \right]^{-1} \quad (15)$$

برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی مؤثر مواد تغییر فاز بهبود یافته توسط نانو ذرات کرووی اکسیدآلومینیوم از رابطه زیر استفاده شده است [۱۷]:

$$k_{eff} = \frac{k_{NP} + 2k_{PCM} - 2(k_{PCM} - k_{NP})\Phi_{NP}}{k_{NP} + 2k_{PCM} + (k_{PCM} - k_{NP})\Phi_{NP}} k_{PCM} + \beta k_1 s \rho_{PCM} C_{p,PCM} \sqrt{\frac{kT}{\rho_{NP} d_{NP}}} f(T, \Phi_{NP}) \quad (16)$$

در معادله (۱۶) پارامترهای  $\beta$ ،  $k_1$ ،  $k$  و  $s$  به ترتیب کسر جرمی ذوب شده، ثابت حرکت براونی، ثابت بولتزمن و یک رابطه تجربی برای حرکت براونی است [۱۷].

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_{solidus} \\ 1 & \text{if } T > T_{liquidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{if } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \end{cases} \quad (17)$$

$$s = 8.4407 (100\Phi_{NP})^{-1.07304} \quad (18)$$

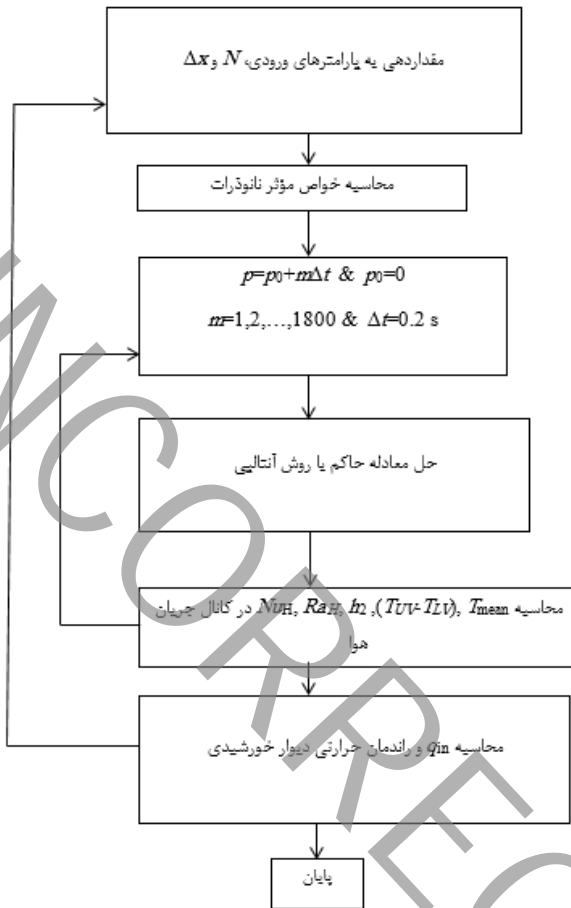
$$f(T, \Phi_{NP}) = (c_1 \Phi_{NP} + c_2) T / 298.15 + (c_3 \Phi_{NP} + c_4) \quad (19)$$

در معادلات قبل پارامترهای  $T_{solidus}$ ،  $T_{liquidus}$ ،  $\Phi_{NP}$  و  $T_{ref}$  به ترتیب دمای انجماد، دمای ذوب، کسر حجمی نانو ذره و دمای مرجع می‌باشند.

### ۳- روش حل عددی

با توجه به ماهیت غیرخطی معادله حاکم برای حل آن از روش عددی اختلاف محدود صریح بر پایه روش آنتالپی استفاده شده است [۱۸ و ۱۹]. معادله حاکم به همراه شرایط مرزی بر اساس اختلاف محدود به فرم زیر گسسته‌سازی شده‌اند.

$$H_i^{p+1} = H_i^p + \frac{\Delta t}{\rho_{eff} \Delta x^2} [k_{eff} (T_{i+1}^p - 2T_i^p + T_{i-1}^p)] \quad (20)$$



شکل ۳: الگوریتم حل عددی مسئله

$$\overline{Nu}_H = 0.68 + \frac{0.67 Ra_H^{0.25}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (27)$$

پارامترهای طراحی مسئله جهت حل عددی در جدول ۱ داده شده است. الگوریتم حل عددی مسئله در شکل ۳ داده شده است. در الگوریتم شکل ۳ پارامتر  $m$  تعداد گام‌های زمانی و  $P$  زمان بعدی و  $P_0$  زمان اولیه می‌باشد.

#### ۴- استقلال شبکه و اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت روش عددی باید استقلال شبکه و اعتبارسنجی صورت گیرد. به منظور تعیین گام مکانی و گام زمانی استقلال شبکه برای پارامتر شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق انجام شده است. داده‌های جوی ورودی به کد کامپیوتری از تحقیق زالوسکی و همکاران [۱] اخذ شده است. دمای محیط و شار خورشیدی جذب شده مربوط به تحقیق زالوسکی و همکاران [۱] در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج استقلال شبکه برای پارامتر شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق

$$\dot{m} = \rho_{air} A_s \sqrt{\frac{0.5g \beta_{air} (T_{UV} - T_{LV}) H_2 + \Delta P / \rho_{air}}{0.41 Gr^{0.084} H_2 / D_h + 2.5 (A_s / A_v)^2}} \quad (26)$$

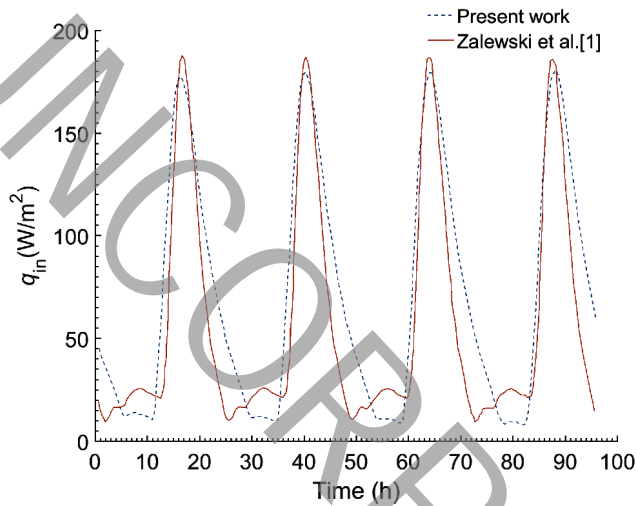
در معادلات قبل  $T_{mean}$ ,  $T_{LV}$ ,  $T_{UV}$ ,  $h_2$ ,  $b$ ,  $\dot{m}$ ,  $C_p$  و  $H_2$  به ترتیب دمای هوا در خروجی کانال، دمای هوا در ورود به کانال، دمای متوسط هوا در کانال، ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان هوا درون کانال، عرض کانال، دبی جرمی جریان هوا در کانال، ظرفیت گرمایی ویژه هوا و ارتفاع کانال می‌باشند. در پروسه حل عددی ضریب انتقال حرارت جابجایی  $h_2$  بر مبنای رابطه نوسلت متوسط محاسبه می‌شود [۲۰]. در این جا عدد رایلی  $(Ra_H)$  بر مبنای مقادیر دمای  $T_N^p$  و  $T_{mean}$  قابل محاسبه است.

جدول ۱: پارامترهای طراحی مسئله جهت حل عددی [۲۴-۲۱]

مقدار	پارامتر
600 J/kg.K	$C_{p,CNT}$
765 J/kg.K	$C_{p,NP}$
(1934,2196) J/kg.K	$C_{p,pcm,paraffin}(s,L)$
(1832,2207) J/kg.K	$C_{p,pcm,hydrated\ salt}(s,L)$
$59 \times 10^{-9}$ m	$d_{NP}$
$1.7 \times 10^{-9}$ m	$d_{CNT}$
$5 \times 10^{-6}$ m	$L_{CNT}$
36 W/m.K	$k_{NP}$
Eq. (15)	$k_{CNT}$
(0.358, 0.148) W/m.K	$k_{PCM,paraffin}(s,L)$
(0.82, 0.58) W/m.K	$k_{PCM,hydrated\ salt}(s,L)$
(865,770) kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{PCM,paraffin}(s,L)$
1070 kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{PCM,hydrated\ salt}$
1350 kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{CNT}$
3600 kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{NP}$
243 kJ/kg	$L_{pcm,paraffin}$
184.976 J/kg.K	$L_{pcm,hydrated\ salt}$
27 °C	$T_{m,pcm,paraffin,hydrated\ salt}$
2 m	$H_1$
2.5 m	$H_2$
0.1 m	$b$
0.025 m	$L_1$
$-3.91123 \times 10^{-3}$	$c_1$
$28.217 \times 10^{-3}$	$c_2$
$3.917 \times 10^{-3}$	$c_3$
$-30.669 \times 10^{-3}$	$c_4$
4 W/m <sup>2</sup> .K	$U$

در شکل ۵ آمده است. جهت مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی خطای نسبی متوسط توسط رابطه زیر محاسبه شده است.

$$Er = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{sim,i} - X_{exp,i}}{X_{exp,i}} \right| \times 100 \quad (28)$$



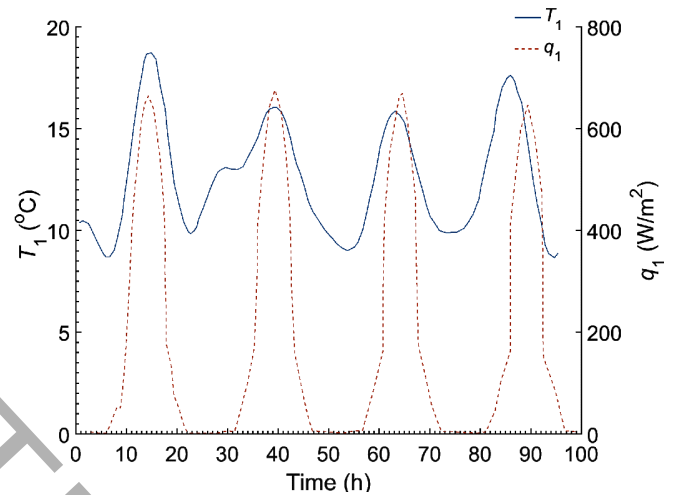
شکل ۶: مقایسه نتایج عددی تحقیق حاضر با داده‌های آزمایشگاهی زالوسکی و همکاران [۱] برای پارامتر شار حرارتی رسیده به فضای اتاق

در این جا  $Er$ ،  $X$  و  $n$  به ترتیب خطای نسبی متوسط، داده عددی یا تجربی و تعداد داده‌های تجربی می‌باشند. همان طور که در شکل ۶ مشخص است توافق مناسبی بین نتایج عددی تحقیق حاضر با داده‌های آزمایشگاهی زالوسکی و همکاران [۱] برای پارامتر شار حرارتی رسیده به فضای اتاق وجود دارد. مقدار خطای متوسط نسبی مشاهده برابر با ۹/۷۳ درصد می‌باشد و همچنین مقدار خطای متوسط نسبی که بر مبنای حداکثر اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی محاسبه شده است در حدود ۴۲ درصد می‌باشد. دلایل خطا می‌تواند به واسطه فرض‌های ساده‌کننده مسئله شامل انتقال حرارت یک بعدی، ثابت در نظر گرفتن ضریب اتلاف حرارت  $U$  و همچنین عدم قطعیت در داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۱] باشد.

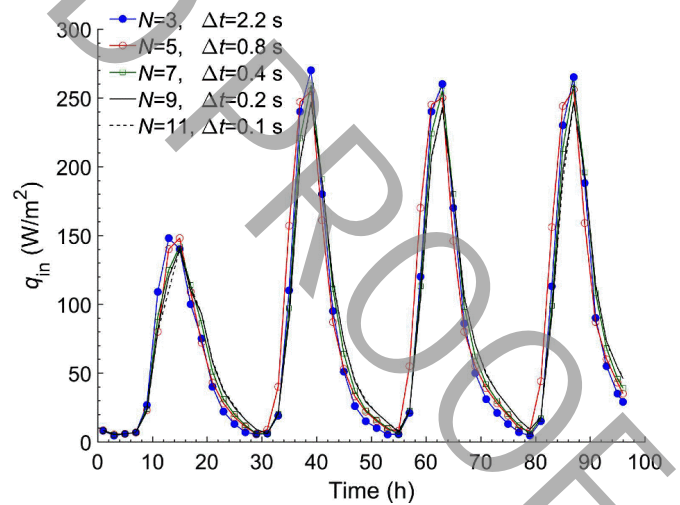
### ۵- بررسی نتایج

در این بخش به مطالعات پارامتری پرداخته شده است و اثر افزودن نانو ذرات کروی اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی به ماده تغییر فاز و همچنین اثر تغییر ضخامت ماده تغییر فاز بر شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق و راندمان دیوار خورشیدی بررسی شده است. با توجه به این که برای انجام محاسبات مربوطه نیاز به شار خورشیدی و دمای محیط می‌باشد از داده‌های آب و هوایی شهر زاهدان (موقعیت جغرافیایی

در شکل ۵ مشاهده می‌شود از گام زمانی ۰/۲ S و تقسیمات مکانی  $N=9$  به بعد تغییرات محسوس در پارامتر شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق دیده نمی‌شود. لذا مقادیر مذکور به عنوان ابعاد مناسب شبکه حل عددی انتخاب شده‌اند. شایان ذکر است مقادیر  $N$  و  $\Delta t$  باید به نحوی انتخاب شوند که حتماً ملاک پایداری کورانت (معادله (۲۳)) برقرار شود. لذا بازه تغییرات آن‌ها نمی‌تواند چندان متنوع باشد. برای اطمینان از صحت روش عددی، نتایج عددی تحقیق حاضر برای پارامتر شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق با داده‌های آزمایشگاهی متناظر در تحقیق زالوسکی و همکاران [۱] مقایسه شده است. نتایج مقایسه پارامتر شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴: دمای محیط و شار خورشیدی جذب شده مربوط به تحقیق زالوسکی و همکاران [۱]

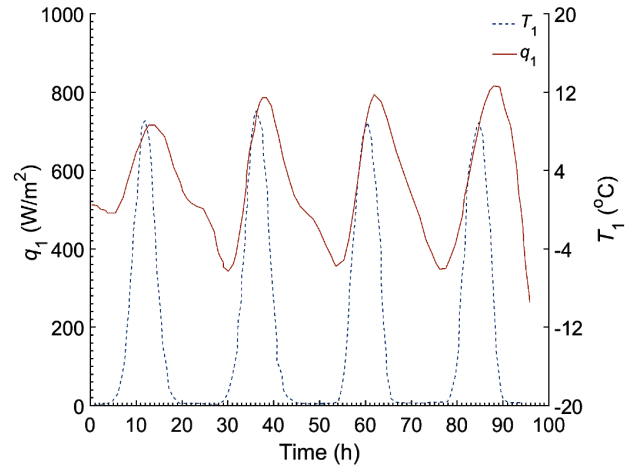


شکل ۵: نتایج استقلال شبکه برای پارامتر شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق

است.

اعداد ارائه شده در جدول ۲ مربوط به حالت پایدار (مقادیر متوسط‌گیری سه روز) می‌باشد و اثر روز اول (زمان گذار) مد نظر قرار نگرفته است. همچنین مقدار متوسط شار خورشیدی برای سه روز مذکور در حدود  $577/86 \text{ W/m}^2$  است.

از نتایج ارائه شده در جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که در یک ضخامت ثابت با افزایش کسر حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی، راندمان دیوار خورشیدی و شار حرارتی ورودی به فضای اتاق نسبت به پارافین معمولی افزایش می‌یابد. عیب اصلی پارافین به عنوان ماده تغییر فاز، پایین بودن ضریب هدایت حرارتی آن می‌باشد. لذا افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی می‌تواند این نقص را برطرف کند و باعث افزایش راندمان دیوار خورشیدی و شار حرارتی ورودی به فضای اتاق مقدار افزایش راندمان دیوار خورشیدی و شار حرارتی ورودی به فضای اتاق برای نانوذرات اکسید آلومینیوم کمتر از نانولوله‌های کربنی می‌باشد یعنی نانولوله‌های کربنی نسبت به نانوذرات اکسید آلومینیوم به نحو مؤثرتری باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز می‌شوند. با افزایش ضخامت پارافین و پارافین حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم راندمان دیوار خورشیدی و شار حرارتی ورودی به فضای اتاق کاهش می‌یابد. ولی برای پارافین حاوی نانولوله‌های کربنی راندمان دیوار خورشیدی و شار حرارتی ورودی به فضای اتاق افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت پارافین، پارافین حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم و پارافین حاوی نانولوله‌های کربنی به معنای افزایش مقدار ماده تغییر فاز و به تبع افزایش توان ذخیره انرژی می‌باشد. ولی چون پارافین و پارافین حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم از ضریب هدایت حرارتی کمتری نسبت به پارافین حاوی نانولوله‌های کربنی برخوردار هستند لذا علی‌رغم افزایش توان ذخیره انرژی در آن‌ها در بازپس‌دهی انرژی ذخیره شده به



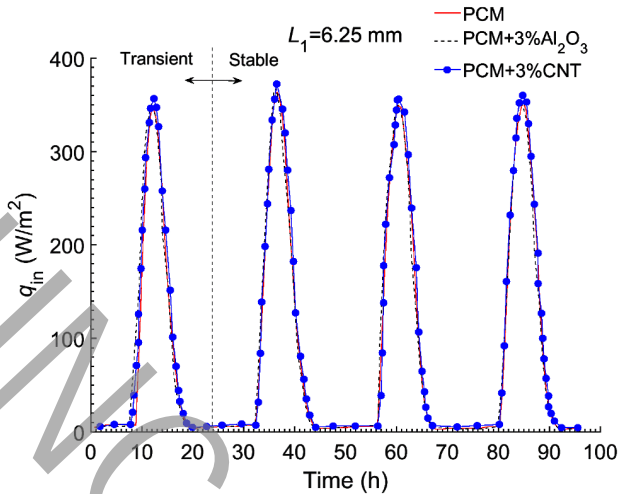
شکل ۷: شار خورشیدی و دمای محیط در شهر زاهدان

۵-۱ اثر افزودن نانو ذرات به ماده تغییر فاز بر راندمان دیوار خورشیدی در این بخش راندمان دیوار خورشیدی برای ماده تغییر فاز معمولی و ماده تغییر فاز بهبودیافته محاسبه و مقایسه شده است. جهت این امر شار حرارتی ورودی به فضای اتاق و راندمان دیوار خورشیدی برای پارافین و پارافین بهبودیافته توسط نانو لوله‌های کربنی و نانو ذرات کروی (اکسید آلومینیوم) با سه کسر حجمی مختلف ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ و سه ضخامت مختلف  $6/25 \text{ mm}$ ،  $12/5 \text{ mm}$  و  $25 \text{ mm}$  محاسبه و در جدول ۲ مقایسه شده

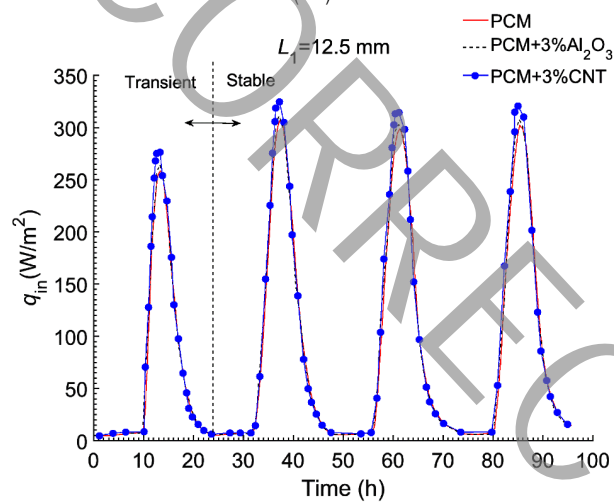
۲: راندمان دیوار خورشیدی و شار حرارتی ورودی به فضای اتاق برای ماده تغییر فاز معمولی و بهبودیافته در ضخامت‌های مختلف

جدول ۲: راندمان دیوار خورشیدی و شار حرارتی ورودی به فضای اتاق برای ماده تغییر فاز معمولی و بهبودیافته در ضخامت‌های مختلف

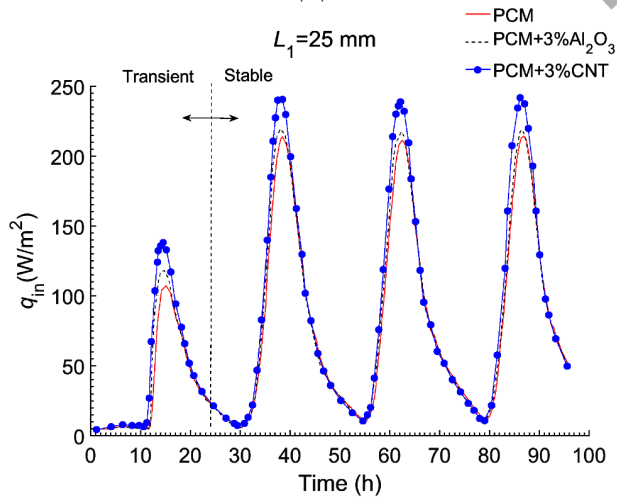
ضخامت ماده تغییر فاز						نوع ماده تغییر فاز
۲۵ mm		۱۲/۵ mm		۶/۲۵ mm		
شار حرارتی ورودی به فضای اتاق ( $\text{W/m}^2$ )	راندمان (%)	شار حرارتی ورودی به فضای اتاق ( $\text{W/m}^2$ )	راندمان (%)	شار حرارتی ورودی به فضای اتاق ( $\text{W/m}^2$ )	راندمان (%)	
۲۳۴/۹۹	۴۰/۶۶	۲۳۸/۹۱	۴۱/۳۴	۲۴۳/۷	۴۲/۱۷	PCM
۲۳۹/۸۸	۴۱/۵۱	۲۴۳/۰۷	۴۲/۰۶	۲۴۵/۷۳	۴۲/۵۲	PCM+%۲Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۲۴۲/۰۴	۴۱/۸۸	۲۴۴	۴۲/۲۲	۲۴۶	۴۲/۵۷	PCM+%۵Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۲۴۳/۴	۴۲/۱۲	۲۴۴/۴۸	۴۲/۳	۲۴۶/۸	۴۲/۷	PCM+%۱۰Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۲۵۲/۳۹	۴۳/۸۴	۲۴۸/۶۱	۴۳/۰۲	۲۴۸/۲	۴۲/۹۵	PCM+%۰.۳CNT
۲۵۴/۱	۴۳/۹۷	۲۴۹/۴۲	۴۳/۱۶	۲۴۸/۸۹	۴۳/۰۷	PCM+%۰.۵CNT
۲۵۵/۱۲	۴۴/۱۴	۲۴۹/۷۳	۴۳/۲۱	۲۴۹/۴	۴۳/۱۶	PCM+%۱.۰CNT



(الف)



(ب)



(ج)

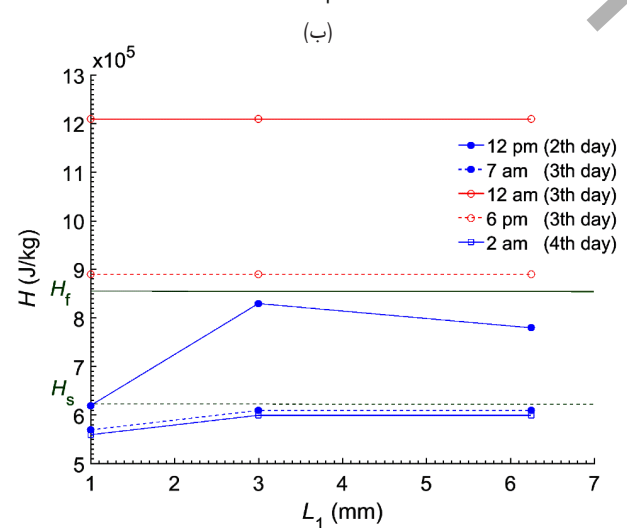
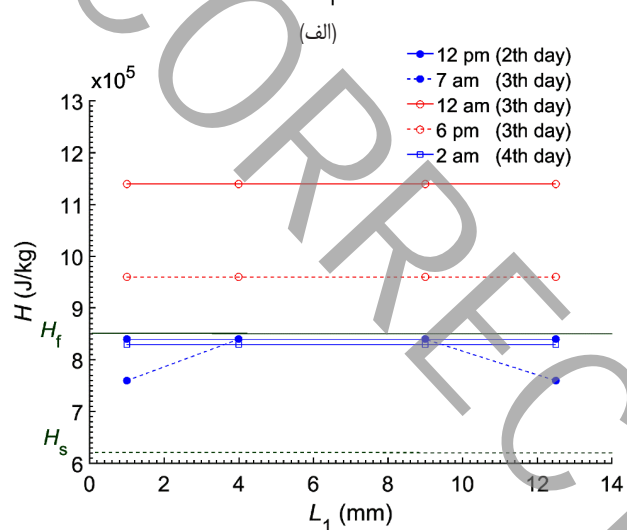
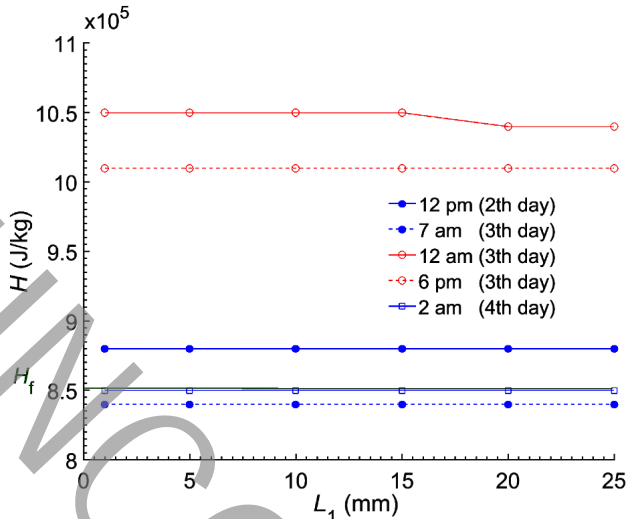
شکل ۸: شار حرارتی ورودی به فضای اتاق برای ماده تغییر فاز و ماده تغییر فاز بهبود یافته توسط نانو لوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید آلومینیوم (الف) ضخامت ۶/۲۵ mm، (ب) ضخامت ۱۲/۵ mm و (ج) ضخامت ۲۵ mm

فضای اتاق خوب عمل نمی‌کنند و راندمان دیوار کاهش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به نتایج جدول ۲ می‌توان دریافت که بیشترین مقدار راندمان دیوار خورشیدی در میان تمام ضخامت‌ها و تمام کسر حجمی‌ها مربوط به حالت نانولوله‌های کربنی با کسر حجمی ۱۰٪ و ضخامت ماده تغییر فاز ۲۵ mm است. با توجه به این که نانو لوله‌ی کربنی تأثیر بیشتری در بهبود ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز و افزایش راندمان دیوار خورشیدی دارد در نتیجه در تحقیق حاضر به عنوان بهبوددهنده ماده تغییر فاز انتخاب می‌شود. نکته‌ی مهمی که باید به آن توجه داشت این است که اختلاف راندمان دیوار خورشیدی بین کسر حجمی‌های مختلف چندان زیاد نیست. لذا با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و به منظور کاهش هزینه‌ها بهترین انتخاب نانولوله‌ی کربنی با کسر حجمی ۳٪ می‌باشد. علی‌رغم بهبود خواص ترموحرارتی ماده تغییر فاز به واسطه افزودن نانوذرات مسئله عدم پایداری، رسوب و ته‌نشینی نانوذرات یک مشکل اساسی در موارد استفاده عملی آن می‌باشد. به نحوی جهت جلوگیری از ته‌نشینی نانوذرات مقادیر کسر حجمی بالاتر از ۳٪ اصلاً توصیه نمی‌شود. لذا در ترسیم کلیه نمودارهای بعدی از کسر حجمی ۳٪ استفاده شده است. در ادامه به بررسی این که آیا ضخامت انتخاب شده مناسب است یا نه، پرداخته شده است.

در شکل ۸ شار حرارتی ورودی به فضای اتاق در طول چهار روز مورد مطالعه برای سه ضخامت ۶/۲۵ mm، ۱۲/۵ mm و ۲۵ mm نشان داده شده است.

در شکل ۸ شار حرارتی ورودی به فضای اتاق برای روز اول نسبت به سایر روزها کمتر می‌باشد. به خصوص این موضوع برای ضخامت ۲۵ mm (شکل ۸-ج) بسیار مشهودتر از سایر ضخامت‌ها می‌باشد. دلیل این موضوع این است که ماده تغییر فاز در روز اول به صورت جامد است و قسمت عمده‌ای از شار خورشیدی دریافت شده صرف تغییر فاز و افزایش محتوای انرژی آن می‌گردد. لذا شار حرارتی کمتری در روز اول به فضای اتاق می‌رسد. همان طور که ذکر شد این اختلاف با افزایش ضخامت ماده تغییر فاز بیشتر می‌شود. چون افزایش ضخامت ماده تغییر فاز به معنای افزایش مقدار ماده تغییر فاز بوده و لذا انرژی بیشتری برای تغییر حالت ماده تغییر فاز از حالت جامد به مایع نیاز می‌باشد. اما پس از گذشت روز اول، ماده تغییر فاز به دلیل ذخیره بخشی از انرژی دریافتی و افزایش محتوای انرژی به طور کامل به فاز جامد بر نمی‌گردد و درصد بیشتری شار خورشیدی دریافتی را به فضای اتاق منتقل می‌کند. شایان ذکر است به دلایل گفته شده برای ضخامت ۶/۲۵ mm مقدار گرمای منتقل شده به اتاق در روز اول تقریباً مساوی با مقدار آن در سایر روزها می‌باشد. دلیل آن کم بودن ضخامت ماده تغییر فاز و در نتیجه نیاز به انرژی کمتر برای افزایش محتوای انرژی و تغییر حالت ماده تغییر فاز در روز اول است. با توجه به این که روز اول مربوط حالت گذار می‌باشد لذا در محاسبات بررسی عملکرد دیوار خورشیدی مد نظر قرار نمی‌گیرد. همچنین از مقایسه دو شکل ۸-الف و ۸-ب مشاهده می‌شود که در ضخامت‌های پایین افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های





شکل ۹: اثر تغییر ضخامت ماده تغییر فاز حاوی نانولوله‌های کربنی بر محتوای انرژی کل (آنتالپی) در ساعات مختلف روز سوم (الف) ضخامت ۶/۲۵ mm (ب) ضخامت ۱۲/۵ mm و (ج) ضخامت ۲۵ mm

کربنی اثر قابل ملاحظه‌ای بر شار حرارتی ورودی به فضای اتاق ندارد. ولی زمانی که ضخامت افزایش می‌یابد افزودن نانولوله‌های کربنی تأثیر چشم‌گیری در مقدار شار حرارتی ورودی به فضای اتاق می‌گذارد. دلیل این موضوع این است که در ضخامت زیاد، پایین بودن ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز بیشتر به چشم می‌آید لذا اثر افزودن نانولوله‌های کربنی در بهبود ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز بیشتر آشکار می‌شود. نکته دیگری که از مشاهده شکل ۷ استنباط می‌شود این است که با افزایش ضخامت از ۶/۲۵ mm به ۲۵ mm مقدار گرمای منتقل شده به فضای اتاق در زمان حداکثر تابش (نقاط قله نمودار) کاهش می‌یابد و در زمان عدم تابش (نقاط گودی نمودار) افزایش می‌یابد. به این صورت که در ضخامت ۶/۲۵ mm مقدار گرما منتقل شده به فضای اتاق در طول شب تقریباً صفر است. لذا می‌توان استدلال کرد که در ساختمان‌های اداری و آموزشی باید از دیوار خورشیدی با ضخامت کم استفاده شود چون فضای داخل این ساختمان‌ها در طول شب نیاز به دریافت حرارت ندارد و این ساختمان‌ها فقط در زمان تابش مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی برای ساختمان‌های مسکونی که در تمام طول شبانه روز مورد استفاده قرار می‌گیرند دیوار خورشیدی با ضخامت بزرگتر مناسب‌تر است.

#### ۵-۲- بررسی اثر تغییر ضخامت بر محتوای انرژی کل (آنتالپی) لایه ذخیره‌کننده انرژی

در شکل ۹ اثر تغییر ضخامت ماده تغییر فاز حاوی نانولوله‌های کربنی بر محتوای انرژی کل (آنتالپی) در ساعات مختلف روز سوم بررسی شده است. در ترسیم شکل مربوطه کسر حجمی نانولوله‌های کربنی ۳٪ می‌باشد. از مقایسه نمودارهای شکل ۹ (الف، ب و ج) می‌توان دریافت که کاهش ضخامت لایه ذخیره‌کننده انرژی، باعث افزایش محتوای انرژی در زمان اوج تابش (ساعت ۱۲ ظهر) و کاهش محتوای انرژی در زمان بامداد (ساعت ۲ بامداد) می‌گردد. لذا در اوج تابش بیشترین شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق مربوط به لایه نازک است و در زمان بامداد نیز بیشترین شار حرارتی منتقل شده به فضای اتاق مربوط به لایه ضخیم می‌باشد. در شکل ۹ (الف، ب و ج) خطوط  $H_f$  و  $H_s$  به ترتیب آنتالپی ماده تغییر فاز را در حالت جامد و مایع نشان می‌دهد. نکته قابل ذکر دیگر این است که با توجه به فلسفه استفاده از دیوار خورشیدی که براساس ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی در فرآیند تغییر فاز بنیان نهاده شده است می‌توان گفت مطلوب‌ترین حالت برای استفاده از دیوار خورشیدی حالتی است که ماده مورد استفاده توانایی تغییر فاز را به طور کامل داشته باشد. در حالی که در ضخامت ۲۵ mm تمام ماده تغییر فاز نمی‌دهد و فقط بخش بسیار کوچکی از آن تغییر فاز می‌دهد و نمی‌توان از تمام ظرفیت ماده تغییر فاز استفاده کرد و در واقع استفاده از ماده تغییر فاز با ضخامت ۲۵ mm هزینه بیهوده در بر خواهد داشت. همچنین با مقایسه نمودارهای مربوط به محتوای انرژی کل برای ضخامت‌های مختلف می‌توان دریافت که تنها در حالتی که ماده پارافین

۱- اگر فقط افزایش راندمان حرارتی دیوار خورشیدی مد نظر باشد به طبع ضخامتی که بیشترین مقدار راندمان حرارتی را در اختیار می‌گذارد مناسب می‌باشد. برای پارافین حاوی نانولوله‌های کربنی بیشترین راندمان مربوط به بزرگترین ضخامت (۲۵ mm) است.

۲- اگر علاوه بر راندمان حرارتی به مسائل اقتصادی نیز توجه شود می‌توان این گونه گفت که با توجه به این که در ضخامت ۲۵ mm تمام ماده به طور کامل تغییر فاز نمی‌دهد و در واقع از تمام ظرفیت آزادسازی و ذخیره‌سازی ماده تغییر فاز استفاده نمی‌شود، بهتر است که ضخامت ۶/۲۵ mm به کار برده شود چرا که تمام ماده در شب هنگام به طور کامل به فاز جامد تبدیل می‌شود و انرژی نهان خود را آزاد می‌کند و در طول روز به فاز مایع در آمده و با تمام ظرفیت انرژی دریافت شده از خورشید را ذخیره می‌کند. لذا با توجه به بحث مطرح شده در نهایت ضخامت ۶/۲۵ mm توصیه می‌گردد. همچنین در کسر حجمی‌های بالا نانو لوله‌های کربنی با افزایش ضخامت لایه ذخیره‌کننده انرژی مقدار گرمای منتقل شده به فضای اتاق به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز و در نتیجه کاهش محتوای انرژی کل در آن افزایش می‌یابد.

### فهرست علائم

علائم انگلیسی

$A$	مساحت دیوار	$m^2$
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه	$\frac{J}{(kg.K)}$
$d$	قطر نانوذره کروی و نانو لوله کربنی	m
$Er$	خطای نسبی متوسط	
$H$	آنتالپی	$\frac{J}{kg}$
$h_2$	ضریب انتقال حرارت جابجایی درون کانال هوا	$\frac{W}{m^2.K}$
$U$	ضریب انتقال حرارت کلی از دیوار خورشیدی محیط	$\frac{W}{m^2.K}$
$k$	ضریب هدایت حرارتی	$\frac{W}{m.K}$
$L$	طول نانو لوله کربنی و گرمای نهان ماده تغییر فاز	$\mu m$ و $\frac{J}{kg}$
$L_1$	ضخامت دیوار ذخیره‌کننده انرژی	mm
$q_1$	شار خورشیدی	$\frac{W}{m^2}$
$q_{in}$	شار حرارتی رسیده به فضای اتاق	$\frac{W}{m^2}$
$T$	دما	oC
$T_1$	دمای محیط	oC

بهبودیافته توسط نانولوله‌های کربنی با کسر حجمی ۳ درصد و ضخامت ۶/۲۵ mm است تغییر فاز به طور کامل رخ می‌دهد و فرآیند انجامد به طور کامل رخ می‌دهد. با توجه آن چه گفته شد می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که اگر معیار در انتخاب نوع ماده تغییر فاز و ضخامت آن تکمیل فرآیند آزادسازی و ذخیره‌سازی انرژی باشد، بهترین انتخاب استفاده از ماده تغییر فاز بهبودیافته توسط نانو لوله‌های کربنی با کسر حجمی ۳% و ضخامت ۶/۲۵ mm می‌باشد. لذا استفاده از ماده تغییر فاز پایه و یا افزایش ضخامت که باعث ناقص شدن فرآیند ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی می‌شوند و همچنین استفاده از لایه ذخیره‌کننده انرژی با ضخامت کمتر که موجب کاهش مقدار ماده تغییر فاز و در نتیجه کاهش محتوای انرژی می‌گردد، توصیه نمی‌شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی عددی عملکرد یک دیوار خورشیدی حاوی مواد تغییر فاز بهبودیافته بررسی شد. به این منظور اثر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی به ماده تغییر فاز، تغییر کسر حجمی آن‌ها و تغییر ضخامت لایه ذخیره‌کننده انرژی بر راندمان حرارتی دیوار خورشیدی و مقدار شار حرارتی رسیده به فضای اتاق بررسی شد. بخش مهمی از مطالعه حاضر، به بررسی راندمان حرارتی دیوار خورشیدی اختصاص دارد. راندمان حرارتی را می‌توان با افزایش انتقال حرارت در کانال جریان هوا و کاهش اتلاف حرارت به محیط افزایش داد. این هدف با افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی به منظور افزایش ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز قابل دستیابی است. با توجه به بیشتر بودن مقدار ضریب هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی مشخص شد که آن تأثیر بیشتری در بهبود خواص ماده تغییر فاز دارد. از میان کسر حجمی‌های مختلف نانولوله‌های کربنی نیز کسر حجمی ۳% با توجه افزایش قابل قبول راندمان و رعایت مسائل اقتصادی و امکان رسوب و ته‌نشینی کمتر نسبت به سایر کسر حجمی‌ها ترجیح داده شد. بخش دیگر مطالعه به بررسی اثر ضخامت لایه ذخیره‌کننده انرژی بر عملکرد حرارتی دیوار خورشیدی اختصاص دارد. نتایج مربوطه نشان داد که در طول روز محتوای انرژی کل با افزایش ضخامت لایه ذخیره‌کننده انرژی افزایش می‌یابد. ولی در زمان عدم تابش (شب هنگام) محتوای انرژی کل کاهش می‌یابد. بنابراین، افزایش ضخامت بسته به کاربرد دیوار خورشیدی می‌تواند مفید یا غیرمفید باشد. اگر دیوار خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی استفاده شود افزایش ضخامت یک تغییر مفید است چرا که مقدار انرژی انتقال داده شده به فضای اتاق در انتهای روز افزایش می‌یابد. ولی در ساختمان‌های تجاری، اداری و آموزشی افزایش ضخامت یک تغییر نامناسب است چرا که یک ساختمان تجاری نیازمند دریافت تابش خورشید و انرژی حداکثر در طول روز بوده و در شب هنگام در پایین‌ترین حالت مصرف انرژی قرار دارند. اگر استفاده از دیوار خورشیدی برای تمام شبانه روز مد نظر باشد برای انتخاب ضخامت مناسب دو معیار می‌توان در نظر گرفت:

Trombe wall associated with internal thermal fins”. Energy and Buildings, 105, pp. 119-128.

- [8] Hernández-López, I., Xamán, J., Chávez, Y., Hernández-Pérez, I. and Alvarado-Juárez, R., 2016. “Thermal energy storage and losses in a room-Trombe wall system located in Mexico”. Energy, 109, pp. 512-524.
- [9] Yu, G., Zhao, P., Chen, D. and Jin, Y., 2017. “Experimental verification of state space model and thermal performance analysis for active solar walls”. Solar Energy, 142, pp. 109-122.
- [10] Fan, L., 2011. “Enhanced Thermal Conductivity and Expedited Freezing of Nanoparticle Suspensions Utilized as Novel Phase Change Materials”. PhD Thesis, Auburn University; 2011.
- [11] Yamada, E. and Ota, T., 1980. “Effective thermal conductivity of dispersed materials”. Heat and Mass Transfer, 13(1), pp. 27-37.
- [12] Nan, C.W., Liu, G., Lin, Y. and Li, M., 2004. “Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites”. Applied Physics Letters, 85(16), pp. 3549-3551.
- [13] Song, P.C., Liu, C.H. and Fan, S.S., 2006. “Improving the thermal conductivity of nanocomposites by increasing the length efficiency of loading carbon nanotubes”. Applied Physics Letters, 88(15), pp. 153111.
- [14] Zheng, Y. and Hong, H., 2007. “Modified model for effective thermal conductivity of nanofluids containing carbon nanotubes”. Journal of thermophysics and heat transfer, 21(3), pp. 658-660.
- [15] Harish, S., Ishikawa, K., Einarsson, E., Aikawa, S., Chiashi, S., Shiomi, J. and Maruyama, S., 2012. “Enhanced thermal conductivity of ethylene glycol with single-walled carbon nanotube inclusions”. International Journal of heat and mass transfer, 55(13), pp. 3885-3890.
- [16] Pop, E., Mann, D., Wang, Q., Goodson, K. and Dai, H., 2006. “Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature”. Nano letters, 6, pp. 96-100.
- [17] Arasu, A.V., Sasmito, A.P. and Mujumdar, A.S., 2011. “Thermal performance enhancement of paraffin wax with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanoparticles—a numerical study”. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2(4), pp. 043005.
- [18] Voller, V. and Cross, M., 1981. “Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method”. International Journal of Heat and Mass Transfer, 24(3), pp. 545-556.
- [19] Crank, J., 1987. Free and moving boundary problems. Oxford University Press.

oC	$T_{mean}$	دمای متوسط در کانال جریان هوا
s	$t$	زمان
m	$x$	مکان
		علائم یونانی
	$\beta$	کسر حجمی ذوب شده
$\frac{kg}{m^3}$	$\rho$	چگالی
	$\Phi_{vol}$	کسر حجمی نانو ذرات
m	$\eta$	طول مؤثر میانگین
$\frac{J}{K}$	$i$	ثابت بولتزمن
		زیرنویس‌ها
	$CNT$	نانولوله کربنی
	$eff$	خواص مؤثر
	$NP$	نانو ذره
	$PCM$	ماده تغییر فاز

## مراجع

- [1] Zalewski, L., Joulin, A., Lassue, S., Dutil, Y. and Rousse, D., 2012. “Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material”. Solar Energy, 86, pp. 208-219.
- [2] Kara, Y.A. and Kurnuç, A., 2012. “Performance of coupled novel triple glass and phase change material wall in the heating season: an experimental study”. Solar Energy, 86(9), pp. 2432-2442.
- [3] Trombe, F., Robert, J.F., Cabanot, M. and Sesolis, B., 1977. “Concrete walls to collect and hold heat”. Solar Age, 2(8), pp. 13-19.
- [4] Onishi, J., Soeda, H. and Mizuno, M., 2001. “Numerical study on a low energy architecture based upon distributed heat storage system”. Renewable Energy, 22, pp. 61-66.
- [5] Khodadadi, J.M. and Hosseinizadeh, S.F., 2007. “Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage”. International Communications in Heat and Mass Transfer, 34, pp. 534-543.
- [6] Briga-Sá, A., Martins, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, J.C. and Paiva, A., 2014. “Energy performance of Trombe walls: Adaptation of ISO 13790: 2008 (E) to the Portuguese reality”. Energy and Buildings, 74, pp. 111-119.
- [7] Abbassi, F. and Dehmani, L., 2015. “Experimental and numerical study on thermal performance of an unvented

- conference, Netherlands.
- [23] Vajjha, R.S., Das, D.K. and Namburu, P.K., 2010. "Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31(4), pp. 613-621.
- [24] Alawadhi, E.M., 2008. "Thermal analysis of a building brick containing phase change material". *Energy and Buildings*, 40(3), pp. 351-357.
- [20] Bergman, T.L. and Incropera, F.P., 2011. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed., John Wiley & Sons.
- [21] Hone J. Carbon nanotubes: thermal properties. In: Schwarz, J.A., Contescu, C.I. and Putyera, K. editors, 2004. *Dekker encyclopedia of nanoscience and nanotechnology* (Vol. 3). CRC press.
- [22] Younsi, Z., Zalewski, L., Rouse, D., Joulin, A. and Lassue, S., 2008. "Thermophysical characterization of phase change materials with heat flux sensors". In *Proceedings of 5th European thermal-sciences*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Irani, F. Sarhaddi, A. Behzadmehr, Thermal Analysis of a Solar Wall Equipped to Nano Phase Change Material, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-12.

DOI:

