



مدلسازی محیط متخلخل مرطوب تحت شرایط دمایی پایین و مقایسه آن با نتایج تجربی

فاطمه صادقیپور - دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم، تحقیقات و فناوری
حسن بصیرت تبریزی - دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

E-mail: fatima_sadeghpour@yahoo.com

چکیده: در این تحقیق، انتقال حرارت و جرم در محیط‌های متخلخل موئینه در حضور فرآیند انجماد به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، مدل ریاضی برای انتقال حرارت و جرم همزمان با تغییر فاز مایع در محیط متخلخل خیس ارائه شده و انتقال حرارت دو بعدی در یک محفظه مستطیلی با ماده متخلخل اشباع شده از سیال به صورت عددی حل شده است. معادلات در سه فاز آب، یخ و هوا، از دو فرض ساکن بودن سیال آب در محیط متخلخل و تعادل دمایی محلی در نقاط تماس فازهای مختلف نوشته شد. پارامتر کسر حجمی در این معادلات بکار گرفته شد و تأثیر این پارامتر در انتقال حرارت و جرم مورد بررسی قرار گرفت. برای حل معادلات از روش تفاضل محدود و به صورت صریح استفاده شد. نتایج تئوری بدست آمده از این شبیه‌سازی با مطالعات تجربی انجام شده روی قطعه متخلخل مقایسه گردید و اثر پارامترهای مختلف بر انتقال حرارت و جرم مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به عدم قطعیت نتایج تجربی، تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج تجربی و تئوری مشاهده می شود.

واژه های کلیدی: انتقال حرارت و جرم، چند فازی، محیط متخلخل، جابجایی طبیعی.

Modeling of a wet Porous Media under Low Temperature Conditions and its comparison with Experimental Results

F. Sadeghpour, Phd Student, Branch of Science, Research and Technology, Islamic Azad University
H. Basirat Tabrizi, The Faculty of Mech. Eng., Amirkabir University of Technology

E-mail: k.abbaspour@tiau.ac.ir

Abstract: In this paper the heat and mass transfer in a capillary porous media in the case of freezing processes have been studied. Here, the mathematical model for heat and mass transfer simultaneous with the liquid phase change in a wet porous media has been presented. The 2-D heat transfer of water in a rectangular saturated porous media has been solved numerically. The governing equation in each three phase's water, ice and air formulated by assuming thermodynamic equilibrium in the interface of the phases and also being water in static case in the porous media. The volume fractions has been utilized in these equations and the effect of this parameter has been evaluated. The obtained results from modeling have been compared with experimental results.

Keywords: Heat and mass transfer, Multi-phases, Porous media and natural convection.

۱- مقدمه

مطالعه فرآیند های انجماد در محیط متخلخل یکی از جذاب ترین موضوعات در بسیاری از سیستم ها زیست محیطی، انرژی، بیولوژیکی و صنعتی می باشد. برای مثال می توان به انجماد و ذوب طبیعی در نواحی سرد، اثرات انجماد خاک در کشاورزی اشاره نمود. جذب رطوبت در مواد ساختمانی می تواند باعث کاهش کیفیت ساختاری این مواد، خوردگی فلزات و کاهش عملکرد عایق های ساختمانی شود. یکی از اولین مدلها در زمینه انتقال حرارت و رطوبت در محیط های متخلخل بود که توسط لوئیکوف [۱] ارائه گردید. خواص فیزیکی و ترمودینامیکی موجود در معادلات لوئیکوف تابعی از دما یا محتوای رطوبت و یا هر دوی آنهاست. بنابراین، این معادلات غیر خطی می باشند. لوئیکوف و میخائیلوف [۲] پیشنهاد کردند که چنانچه محیط متخلخل به چند ناحیه تقسیم شود در هر ناحیه از میانگین خواص فیزیکی و ترمودینامیکی در محاسبات استفاده شود، این خواص را می توان ثابت در نظر گرفت و معادلات را خطی نمود. همدی و همکارانش [۳] با استفاده از مدل سه مرحله ای لی، انتقال حرارت و رطوبت را طی فرآیند انجماد در محیط متخلخل مرطوب شبیه سازی کرده اند. این محققین از همین مدل برای بررسی انتقال حرارت و انتقال جرم در حین انجماد نان استفاده کرده اند. تعداد کمی از مطالعات در انجماد خاک با استفاده از مدل انتقال رطوبت و حرارت همزمان ارائه شده است (هارلان [۴]، گایمون و لوتین [۵]). بزانت و همکارانش [۷] مدل ریاضی انتقال حرارت و رطوبت همزمان فرآیند انجماد در سیمان را ارائه کردند. اگرچه که به دلیل رابطه تعادلی پیچیده آب غیر منجمد، آنها نتوانستند مدل شغافی را گزارش کنند. چاترچی [۱۴] آسیب سیمان در حین یخ زدن را مطالعه کرده است. انجماد خاک در اطراف لوله های حاوی سیال

مختلف مدفون در خاک [۷]، بقاء و تباهی بافت های بیولوژیکی تحت فرآیندهای دمایی پایین [۸] از موارد انتقال حرارت و جرم طی فرآیند انجماد می باشد. ماتسوموتو و همکارانش [۱۷] انتقال حرارت و رطوبت در مواد ساختمانی را در حالتی که تغییر فاز مایع به جامد یا بالعکس وجود داشته باشد، بررسی و از یک مدل ریاضی که برای مواد متخلخل هاگروسکوپیک معتبر است، استفاده کردند. نکته قابل توجه در این مطالعه وجود آب منجمد نشده موجود در فضاهای خالی محیط متخلخل در دماهای پایین تر از صفر درجه سانتیگراد است. مطالعات فرآیند انجماد در محیط متخلخل به طور گسترده برای محیط هایی با تخلخل پایین (تخلخل پایین تر از ۵۰٪ مانند شن و خاک) انجام گرفته است. برون فن برنر و کورین [۱۱]، میاتا [۱۲] رشد و انتشار یخ در ساختار خاک را بررسی کرده اند. تخمین میدان دما و رطوبت در یک محیط نیازمند درک پدیده فیزیکی و اهمیت پارامترهای مخصوص است. فرآیند های مختلفی همچون تولید غذا (مانند نان)، انجماد خاک و سیمان به کار گرفته شود. در اغلب موقعیت های کاربردی، مدل جریان در محیط متخلخل سه بعدی است. اگرچه که میدان دو بعدی جریان در محیط آزمایشگاه و در طبیعت نیز وجود دارد. این مقاله تحقیقات تجربی و تئوری انتقال حرارت جابجایی آزاد در محیط متخلخل خیس دو بعدی تحت عملکرد دمایی پایین را مورد بررسی قرار می دهد.

۲- بخش آزمایشگاهی و نمونه مدل

در آزمایش های انجام شده برای بررسی تغییرات دما در جسم متخلخل در حضور فرآیند انجماد از یک جسم متخلخل مکعبی که از یک وجه در مجاورت یک صفحه سرد و در سایر وجوه در معرض جریان آرام هوای خشک قرار دارد، استفاده شده-

به منظور توصیف همزمان حرارت و رطوبت در محیط متخلخل خیس همراه با تغییر فاز، از مدل ارائه شده (۱۴) در استفاده می کنیم.

تبادل جرم فاز مایع:

$$\frac{\partial(\rho_l \varepsilon_l)}{\partial t} = -\dot{m} \quad (1)$$

تبادل جرم فاز یخ تولیدی:

$$\frac{\partial(\rho_s \varepsilon_s)}{\partial t} = \dot{m} \quad (2)$$

معادله انرژی مخلوط فازها به صورت زیر است:

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} = k_m \nabla^2 T - \dot{m} h_{ls} \quad (3)$$

که

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_l + \varepsilon_s + \varepsilon_p + \varepsilon_g \\ (\rho c)_m &= \varepsilon_s (\rho c)_s + \varepsilon_l (\rho c)_l + \varepsilon_g (\rho c)_g + \\ \varepsilon_p (\rho c)_p \quad k_m &= \varepsilon_s k_s + \varepsilon_l k_l + \varepsilon_g k_g + \varepsilon_p k_p \end{aligned} \quad (4)$$

در اینجا، متغیرهای میدانی شامل Γ ، کسر حجمی مایع ε_l ، کسر حجمی جامد ε_s ، کسر حجمی گاز ε_g و کسر حجمی محیط ε_p متخلخل است. نرخ تغییر فاز انجماد \dot{m} که به عنوان مولفه منبع مطابق با انجماد رطوبت بر روی سطح ذرات و علامت منفی در معادله (۱) نشان دهنده این است که میزان فاز مایع در طی فرآیند انجماد در حال کاهش است. علامت مثبت در معادله (۲) نشان دهنده این است که میزان فاز یخ در طی فرآیند در حال افزایش است. و یا به عبارت دیگر، فاز آب مایع در حال تبدیل به فاز یخ جامد می باشد. مؤلفه \dot{m} به صورت زیر بیان می شود [۱۵]:

$$\dot{m} = \sigma_c (\dot{x}_{cl} - \dot{x}_l) \quad (5)$$

ضریب انجماد، σ_c :

$$\sigma_c = \frac{Nu * q_l * D_l}{d} \quad (6)$$

است. برای انجام آزمایشها، از دستگاه تجربی تولید برفک که در سال ۱۳۷۴ توسط علیرضا ماهری [۱۸] ساخته شد، استفاده گردید. در شکل (۱) طرحواره دستگاه تشکیل برفک، تجهیزات اندازه گیری و نحوه قرار گیری جسم متخلخل روی صفحه سرد، نشان داده شده اند.

از شن به دلیل کاربرد زیادی که در مصالح ساختمانی دارد، به دلیل کاربردهای زیادی که در مصالح به عنوان ماده متخلخل مؤین استفاده شده است. شن بر روی ورق آلومینیومی به عنوان وجه زیرین قالب استفاده شده است. برای ثابت نگاه داشتن شن در ورق از تور فلزی استفاده شده است. ابعاد قالب $20 \times 20 \times 2 \text{ cm}$ است. از ترموکوپل های نوع K برای اندازه گیری دما درون محیط متخلخل استفاده شده است. ترموکوپل ها درون محیط متخلخل در مکان های مختلفی قرار داده شده است. اندازه گیری دما در طی فرآیند انجماد هر دقیقه انجام گرفته است. دو بلوک شن با تخلخل مختلف در مورد آزمایش قرار گرفت. جدول (۱) دقت تجهیزات تجربی نشان می دهد.

۳- مدلسازی

مسئله فیزیکی شامل انتقال حرارت و جرم در طی فاز انجماد در محیط متخلخل است. در طی انجماد، رطوبت در محیط متخلخل در سه فاز جامد، مایع و گاز وجود دارد. با استفاده از معادلات بقای انرژی و جرم در هر فاز معادلات بدست آمد. معادلات بر اساس فرضیات زیر بدست آمد:

- فازها در تعادل ترمودینامیکی قرار دارند.
- جریان به صورت گذرا و دو بعدی است.
- به دلیل عدم وجود حرکت فیلتری و گرادیان فشار، از معادله مومنتم صرف نظر می شود.
- تمام پارامترها ثابت فرض می شوند.
- در روی مرز انتقال جرم وجود ندارد.

مقادیر n و k را برابر با ۳ و ۰/۰۱ انتخاب شده است [۱۵]. به

منظور تبدیل ε_l به X از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\varepsilon_l = V_l/V = m_l/\rho_l V \quad (14)$$

با استفاده از معادله (۱):

$$\dot{x}_l = \partial \left(\frac{V}{m_0} \times \rho_l \varepsilon_l \right) / \partial t \quad (15)$$

شرایط اولیه و مرزی مطابق با آزمایش انجام گرفته شده به

کار گرفته شد:

$$\varepsilon_s = 0, \varepsilon_l = 0.3, \varepsilon_g = 0.01 \quad \text{at} \quad t=0 \quad (16)$$

شرط مرزی مربوط به سطح سرد، دمای سطح ثابت:

$$T = T_s \quad (17)$$

در سایر وجوه، جسم در تبادل حرارت با محیط اطراف قرار

دارد و شرایط مرزی حرارتی در این سطوح از رابطه بدست

می آید:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_{inf}) = 0 \quad (18)$$

۴- نتایج و بحث:

در این گزارش، اثرات تغییرات تخلخل محیط، ضخامت،

شرایط اولیه و دمای سطح زیرین به صورت تحلیلی مورد

بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج استفاده از نرخ تغییر فاز و

بدون آن نیز با هم مقایسه شد. در دو مورد نتایج تحلیلی و

تجربی با هم مقایسه شد.

که در آن ناسلت بر روی ذرات کروی در انتقال حرارت

جابجایی آرام به صورت زیر تعریف می شود [۱۶]:

$$Nu_D = 2 + \frac{0.589 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.5}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} \quad (7)$$

که در آن عدد بی بعد رایلی:

$$Ra_D = g\beta(T_{inf} - T_s)d^3/\alpha\nu \quad (8)$$

و عدد بی بعد پراتل:

$$Pr = \nu/\alpha \quad (9)$$

مقدار رطوبت در محیط متخلخل اشباع در روی سطح ذرات

جامد محیط، x_{cl} تابعی از دما و مقدار رطوبت بر روی ذره به

صورت زیر می باشد [۱۵]:

$$\dot{x}_{cl} = \Phi_1(T) \times \Phi_2(X) \quad (10)$$

توانع بالا می تواند بر اساس کشش سطحی رطوبت و

خصوصیات جذب سطحی از رطوبت جامد در سیستم محاسبه

شود. تقریب های زیر باید در نظر گرفته شود (۱۵):

$$\varphi_1(T) = 0.622 * \left(\frac{P_w}{760000P_w}\right) \quad (11)$$

$$\varphi_2(X) = x^n(x_{sc}^n + l)/(x_{sc}^n(x^n + l)) \quad (12)$$

$$P_w = 10E(0.622 + \frac{7.5 \times T_{inf}}{238 + T_{inf}}) \quad (13)$$

تخلخل بالاتر، دو فرآیند همزمان رخ می دهد، ابتدا، به دلیل اینکه کسر حجمی مایع نسبت به قبل زیادتر می شود، تأثیر رطوبت بیشتر می شود، دوم آنکه، کسر حجمی یخ نیز افزایش می یابد، سطح انتقال حرارت کاهش می یابد و این دو فرآیند عکس هم عمل می کنند، در نتیجه تأثیری در دمای تعادل نهایی ندارد.

۵- نتیجه گیری:

مطالعه عددی انتقال حرارت و جرم در محیط متخلخل دو بعدی با استفاده از معادلات چند فازی ارائه شد. پارامتر به کار گرفته شده، کسر حجمی بود که بیان کننده حجم هر فاز به حجم کل محیط بود. کسر حجمی آب و یخ در طی مدلسازی بر اساس نرخ تغییر فاز تغییر می کرد. اما کسر حجمی هوای محبوس در محیط تقریباً ثابت می ماند. به این دلیل که ما از ابتدا فرض کردیم که هوا بدون رطوبت و خشک است. به منظور ارزیابی مدل نمونه، تحقیقات تجربی انجام گرفته شد و که دمای محیط متخلخل را اندازه می گرفت. اطلاعات تجربی بدست آمد و آزمایش های عدم قطعیت تجهیزات نیز انجام شد. تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج تجربی و تئوری بدست آمد. نرخ تغییر فاز رفتار انتقال حرارت و جرم را پیش بینی کرد.

۶- فهرست علائم

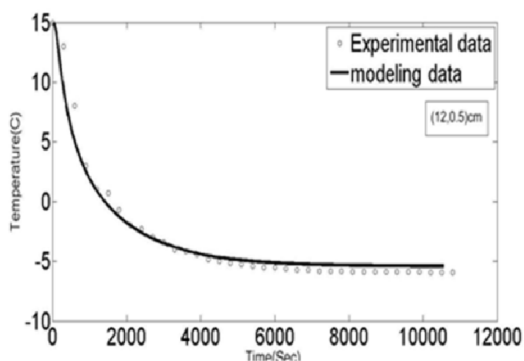
| | |
|----------|--------------------|
| c | گرمای ویژه |
| d | قطر ذره |
| D | ضریب دیفیوژن |
| h | آنتالپی |
| k | ضریب هدایت حرارتی |
| t | زمان |
| x,y | مختصات لایه متخلخل |
| Φ_1 | تابع دمای پالانز |

شکل ۲ (الف، ب، پ و ت) تغییرات دما تحلیلی با اطلاعات آزمایشگاهی در نقاط (۰/۵، ۱۲)، (۰/۵، ۶)، (۱۳، ۱۲) و (۱۳، ۶) نشان داده شده است. به دلیل ضخامت نازک محیط متخلخل، گرادیان شدید دما نه تنها در راستای عرضی بلکه در راستای طولی نیز وجود دارد. گرادیان عرضی دما در شکل ۲ (الف و ب) و گرادیان طولی دما در (ب و ت) نشان داده شده است. دمای حاصل از مدلسازی حدود ۳٪ پایین تر از دمای اندازه گیری از نتایج تجربی است. خطای مطلق به جزء در زمان های اولیه آزمایش از عدم قطعیت ترموکوپل ها کمتر است. بنابراین تطابق خوبی بین نتایج تئوری و تجربی وجود دارد.

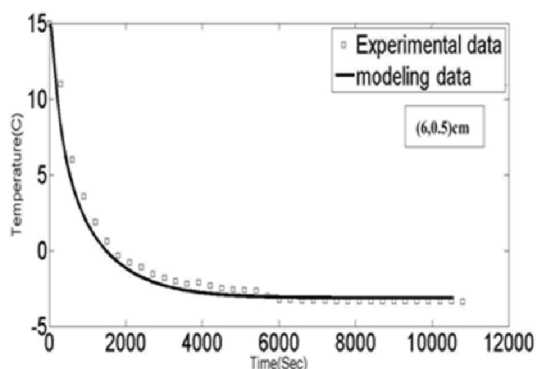
مقایسه تأثیر استفاده از نرخ تغییر فاز و بدون آن و نتایج آزمایشگاهی در شکل ۳ در نقطه (۰/۵، ۱۲) نشان داده شده است. این شکل تأثیر رابطه پالانز در این مسأله را نشان می دهد. شکل ۴ (الف و ب) اثر تغییر دمای اولیه و دمای سطح زیرین را نشان می دهد. هرچه دمای اولیه بالاتر باشد، دمای تعادل نهایی بالاتر و زمان رسیدن به تعادل افزایش می یابد. هرچه دمای سطح زیرین پایین تر باشد، دمای تعادل نهایی کمتر می شود.

شکل ۵ تأثیر ضخامت محیط متخلخل را نشان می دهد، اگر تمام پارامترهای مدل به ضخامت شن، ثابت نگه داشته شود، هر چه ضخامت محیط کمتر باشد، زمان رسیدن به دمای تعادل کمتر و دمای تعادل بالاتر خواهد بود. در زمان های کوتاه، ضخامت محیط نقش مهمی را در نرخ تغییر فاز دارد. به این دلیل که هوای سرد نمی تواند در زمان کوتاه در محیط نفوذ کند. میتوان نوع ماده متخلخل را تغییر داد و نقش جنس ماده را نیز به صورت تئوری و تحلیلی بررسی کرد. در نهایت شکل ۶ تأثیر تخلخل ماده را نشان می دهد. با توجه به شکل مشخص است که تخلخل تأثیر عمده در دمای نهایی تعادل ندارد. در

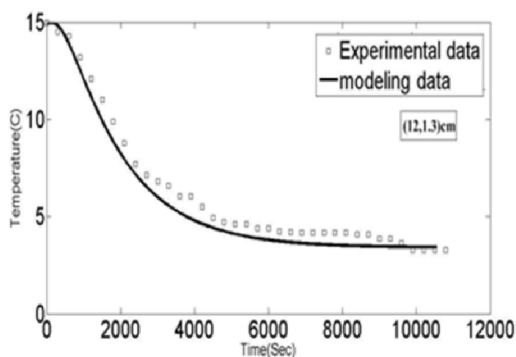
- [6] W. Liu, S. Shen and S. B. Riffat, "Heat transfer and phase change of liquid in an inclined enclosure packed in unsaturated porous media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 26, pp. 5209–5219, 2002.
- [7] Z. P. Bazant, J. Chern, A. N. Rosenberg and J. M. Gaidis, "Mathematical model for freeze and thaw Durability of Concrete" *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 71, no. 9, pp. 776–783, Sep. 1988.
- [8] V. J. Lunardini, "Problem for soils systems," *Journal of Energy Resources. Technology*, vol. 103, no. 1, pp. 76-81, 1981.
- [9] B. Rubinsky and G. Onik, "Cryosurgery: advances in the application of low temperatures to medicine," *Int. J. Refrigeration*. vol. 14, no. 4, 1991.
- [10] A. C. Cleland, *Food Refrigeration Processes, Analysis, Design and Simulation*, New York: Elsevier Applied Science, 1990.
- [11] L. Bronfenbrenner and E. Korin, "Kinetic model for crystallization in porous media," *Int. J Heat Mass Transfer*, vol. 40, no. 5, pp. 1053–1059, 1997.
- [12] Y. Miyata, "A thermodynamic study of liquid transportation in freezing porous media," *JSME Int. Journal*, vol. 41, pp. 601–609, 1998.
- [13] L. Bronfenbrenner, "Instability of the phase front in the soils freezing process," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 48, no. 1, pp. 476–484, 2009.
- [14] S. Chatterji, "Aspects of the freezing process in a porous material-water system part 1 freezing and the properties of water and ice," *Cement Concrete Res*, vol. 29, no. 4, pp. 627–30, 1999.
- Φ_2 تابع رطوبت پالانز
- x میزان رطوبت
- علائم یونانی:
- β ضریب انبساط دمایی
- v ویسکوزیته سینماتیکی
- ρ دانسیته ذره
- زیرنویس ها:
- 0 ابتدایی
- g گاز
- l مایع
- s جامد
- p ذره
- sc محتوای رطوبت بحرانی جامد
- ۷- مراجع
- [1] A. V. Luikov, *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies*. Oxford: Pergamum Press, 1966, ch. 10, pp. 447–473.
- [2] A.V. Luikov, Y.A. Mikhailov, *Theory of Energy and Mass Transfer*. Oxford: Pergamum Press, 1965.
- [3] N. Hamdami, J. Y. Monteau and A.L. Bail, "Heat and mass transfer in par-baked bread during freezing," *Food Res Int.*, vol. 37, no. 6, pp. 477–488, 2004.
- [4] R. L. Harlan, "Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil," *Water Resource Research*, vol. 9, no. 5, pp. 1314–1323, 1973.
- [5] G. L. Guymon and J. N. Lutin, "A coupled heat and moisture transport model for arctic soil," *Water Resource Research*, vol. 10, no. 5, pp. 995-1001, 1974.



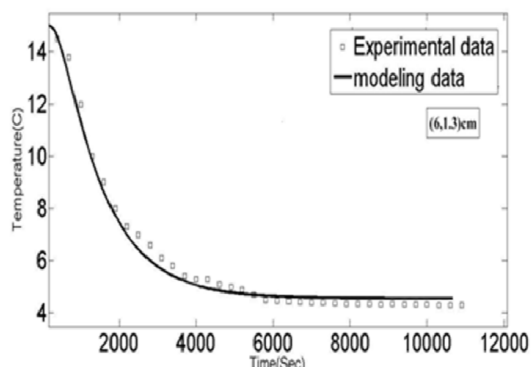
(الف)



(ب)



(پ)



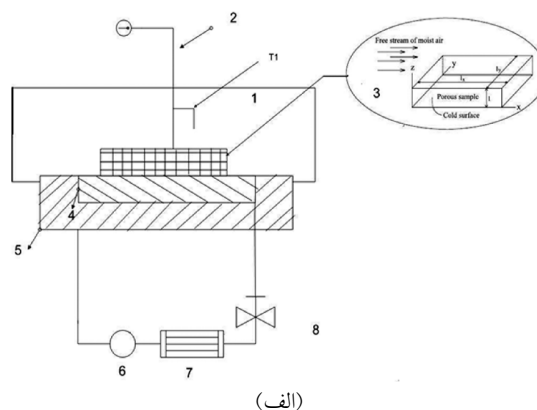
(ت)

[15] B. Palancz, "A mathematical model for continuous fluidized bed drying," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 38, no. 7, pp. 1045-1059, Jan. 1983.

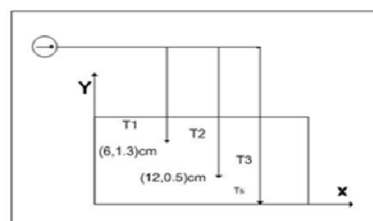
[16] K. Jafarpur and M. M. Yovanovich, "Laminar free convective heat transfer from isothermal spheres: A new analytical method," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 35, no. 9, pp. 2195-2201, Aug, 1992.

[17] Mamoru Matsumoto, Shuichi Hokoi, Masanori Hatano, "Model for simulation of freezing and thawing processes in building materials," *Building and Environment* vol. 36, pp.733-742, 2001.

[۱۸] علیرضا ماهری، بررسی تجربی رشد لایه یخ و مشخصات آن بر روی صفحات سرد در جریان هوای مرطوب، تز کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۷۴.



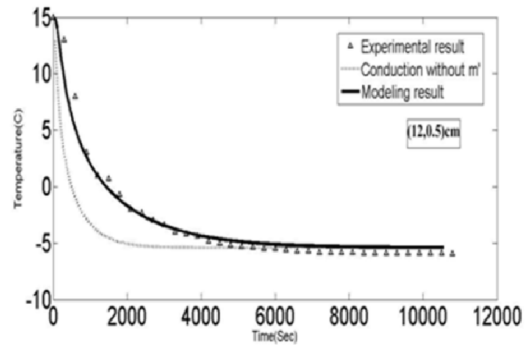
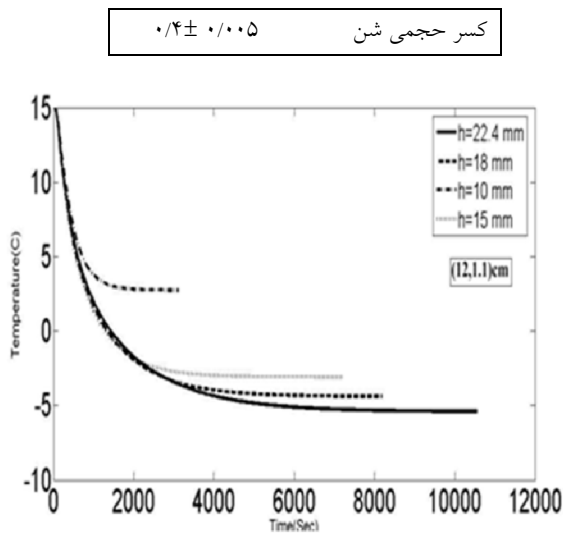
(الف)



(ب)

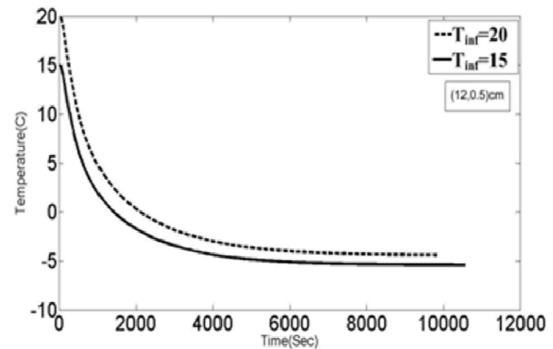
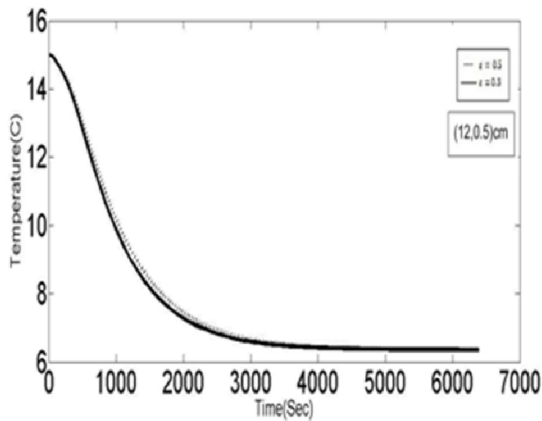
شکل (۱): (الف) نمایش شماتیک دستگاه تشکیل برفک، (۱) کانال هوا، (۲) ترمومتر، (۳) نمونه مکعبی محیط متخلخل، (۴) سطح سرد، (۵) عایق، (۶) کمپرسور، (۷) کندانسور، (۸) شیر انبساط، (ب) مکان قرارگیری ترموکوپل ها بر روی نمونه

شکل (۲) مقایسه مقادیر دمای بدست آمده از شبیه سازی عددی و نتایج تجربی



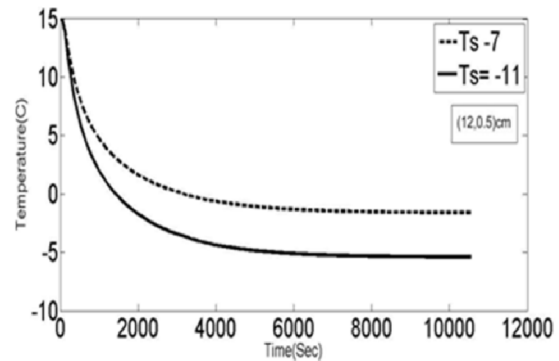
شکل (۳) مقایسه نتایج دمای حاصل از مدل سازی و حل تحلیلی معادله انتقال حرارت بدون نرخ تغییر فاز

شکل (۵) نتایج دمای حاصل از مدل سازی با ضخامت متفاوت



(الف)

شکل (۶) مقایسه مقادیر دما بدست آمده از شبیه سازی عددی در تخلخل مختلف



(ب)

شکل (۴) مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی دمای با دمای (الف) دمای سطح متفاوت (ب) دمای اولیه متفاوت

جدول (۲) مشخصات ترموفیزیکی مربوط به آزمایش های انجام شده و مدل سازی بر روی جسم متخلخل

| کمیت | مقدار | کمیت | مقدار |
|---------------------|----------|-----------------|---------|
| $g, m/s^2$ | 9.81 | $K_l, W/mk$ | 0.614 |
| T_{inf}, C | 15 | $K_g, W/k$ | 0.02624 |
| T_s, C | -11 | $K_s, W/mk$ | 0.566 |
| $Deff, m$ | 0.03 | $K_{po}, W/mk$ | 0.65 |
| $\rho_l, kg/m^3$ | 995 | $C_l, J/kg k$ | 4179 |
| $\rho_s, kg/m^3$ | 999 | $C_g, J/kg k$ | 1.0057 |
| $\rho_g, kg/m^3$ | 1.2 | $C_s, J/kg k$ | 4225 |
| $\rho_{po}, kg/m^3$ | 1500 | $C_{po}, J/kgk$ | 840 |
| $D_l, m^2/s$ | 0.000025 | L, m | 0.24 |
| V, m^3 | $8.8E-4$ | h, m | 0.022 |
| m_0, kg | 1.429 | $h_{ls}, J/kg$ | 330000 |

جدول (۱) دقت تجهیزات تجربی

| دقت | فرآیند |
|--------------------------------|------------|
| $15 \pm 0.7 \text{ } ^\circ C$ | دما هوا |
| $-7 \pm 0.7 \text{ } ^\circ C$ | دما دیواره |
| $5.00 \pm 3 \text{ g}$ | جرم شن |