



Numerical Study of Evaporation in a Vertical Porous Channel by the Volume of Fluid Method in OpenFOAM

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gholami H.¹ MSc,
Kouhikamali R.*¹ PhD,
Sharifi N.² PhD

How to cite this article

Gholami H, Kouhikamali R, Sharifi N. Numerical Study of Evaporation in a Vertical Porous Channel by the Volume of Fluid Method in OpenFOAM. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):317-326.

¹Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran

²Engineering Sciences Department, Engineering Faculty (East Guilan), University of Guilan, Rudsar, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran. Postal Code: -

Phone: +98 (13) 16690276

Fax: +98 (13) 16690271
kouhikamali@guilan.ac.ir

Article History

Received: May 09, 2018

Accepted: June 06, 2018

ePublished: February 01, 2019

ABSTRACT

In this study, using volume of fluid method in open source software OpenFOAM, the phenomenon of evaporation in the porous medium was analyzed. At the beginning of the solution, the system consists of a water phase and a porous copper environment. In the next steps of numerical simulation and as a result of partial evaporation of water, the vapor phase appears as the second fluid phase. Water and vapor are assumed to be incompressible and incompatible, and the phenomenon of evaporation occurs unevenly. The interface between phases is modeled by the VOF method and the Lee model has been used to mass transfer between two phases of water and vapor. For surface tension between phases, the continuous surface force (CSF) method was considered. The comparison of simulation results with experimental results showed that the combined solver of porous medium evaporation would well estimate the rate of evaporation at different sections of the channel. In addition, the results of the wall temperature indicate that the channel is divided into two zones of heating and evaporation. In the region of heating, the temperature increases linearly with the channel length to reach saturation temperature. After the point of saturation, the wall temperature first remains constant and eventually forms an oscillatory shape, in which locally there are temperature jumps. The evaporated flow rate also increases at high intensity first, but in the end regions of the porous channel, its growth rate is slow.

Keywords Evaporation; Porous Medium; Vertical Channel; Volume of Fluid Method; OpenFOAM Software

CITATION LINKS

- [1] Study of the effect of wind speed on evaporation from soil through integrated modeling of the atmospheric boundary layer and shallow subsurface [2] Characteristics of evaporation from partially wettable porous media [3] Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media [4] Convection heat and mass transfer along a vertical heated plate with film evaporation in a non-darcian porous medium [5] Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage - wetting cycles [6] Surface heat and mass transfer coefficients for multiphase porous media transport models with rapid evaporation [7] Experimental study and modelling of the water phase change kinetics in soils [8] Numerical simulation of complete liquid-vapour phase change process inside porous media using smoothing of diffusion coefficient [9] Roof cooling by direct evaporation from a porous layer [10] Liquid film evaporation inside an inclined channel: Effect of the presence of a porous layer [11] Experimental investigation on the evaporation of a wet porous layer inside a vertical channel with resolution of the heat equation by inverse method [12] Simulation of liquid-vapour phase change process inside porous media using modified enthalpy formulation [13] Computational methods for two-phase flow and particle transport [14] A piecewise linear interface-capturing volume-of-fluid method based on unstructured grids [15] A volume of fluid method for simulating fluid/fluid interfaces in contact with solid boundaries [16] A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow [17] Principles of heat transfer in porous media [18] Volume-averaged macroscopic equation for fluid flow in moving porous media [19] A continuum method for modeling surface tension [20] Simulation of convective heat transfer of gas-liquid bubble train flow in wet microtube [21] A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques [22] Numerical simulation of bubble condensation using CF-VOF [23] Towards the ultimate conservative difference scheme [24] Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows

مطالعه عددی تبخیر در یک کانال متخلخل قائم با روش حجم سیال در این فوم

حسن غلامی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

رامین کوهی کمالی * PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

نوید شریفی PhD

گروه علوم مهندسی، دانشکده فنی مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر با روش حجم سیال در نرم افزار متن باز این فوم پدیده تبخیر در محیط متخلخل مورد تحلیل قرار گرفته است. در ابتدای حل، سیستم شامل فاز آب و محیط متخلخل مس است. در مراحل بعدی شبیه سازی عددی و در اثر تبخیر قسمتی از آب، فاز بخار به عنوان دومین فاز سیال ظاهر می شود. آب و بخار، غیرقابل تراکم و مخلوط نشدنی فرض شده است و پدیده تبخیر به صورت غیرتعادلی رخ می دهد. فصل مشترک بین فازها با روش حجم سیال، انتقال جرم بین دو فاز آب و بخار با مدل لی و کشش سطحی بین فازها با روش نیروی سطح پیوسته مدل سازی شده است. مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی نشان داد که حلگر ترکیبی تبخیر محیط متخلخل به خوبی نرخ تبخیر در مقاطع مختلف کانال را تخمین می زند. علاوه بر این نتایج مربوط به دمای دیواره به دو ناحیه گرمایشی و تبخیر تقسیم می شود. در ناحیه گرمایش، دما به طور خطی با عمق کانال افزایش می یابد تا اینکه به دمای اشباع برسد. بعد از نقطه اشباع دمای دیواره ابتدا ثابت مانده و در نهایت شکل نوسانی به خود می گیرد که به صورت محلی، پرش های دمایی رخ می دهد. نرخ جرمی تولید بخار نیز ابتدا با شدت زیاد اتفاق می افتد اما در نواحی انتهایی کانال متخلخل، نرخ رشد آن به کندی صورت می گیرد.

کلیدواژه ها: تبخیر، محیط متخلخل، کانال قائم، روش حجم سیال، نرم افزار این فوم

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۱۶

* نویسنده مسئول: kouhikamali@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

تبخیر در محیط متخلخل در بسیاری از فرآیندهای طبیعی و صنعتی رخ می دهد. براساس عامل پدیدآورنده تبخیر در یک محیط متخلخل می توان دو نوع تبخیر را نام برد. حالت اول، تبخیر براساس گرمایش یک محیط متخلخل و حالت دوم، تبخیر سطحی در سطح آزاد محیط متخلخل است [1]. در این تحقیق حالت اول بررسی شده و با در نظر گرفتن شار حرارتی اعمال شده به دیواره کانال، تغییر فاز آب در یک محیط متخلخل مورد مطالعه قرار گرفته است. معمولاً جریان دو فاز مایع-گاز به رژیم های مختلف دسته بندی می شود. این امر براساس توزیع هر فاز در حجم صورت می گیرد. توزیع فاز در حجم تحت تاثیر نیروهای حجمی همچون گرانش و اینرسی و نیروهای سطحی همچون موئینگی و نیروی لزجت قرار دارد [2]. بین جریان دو فاز در کانال متخلخل با جریان دو فاز در کانال معمولی تفاوت هایی وجود دارد. در کانال متخلخل، جریان آرام بوده و مقدار عدد رینولدز معمولاً کمتر از ۱۰۰۰ است. با کوچک تر شدن مجرای عبور سیال در محیط متخلخل، نیروهای سطحی در مقابل نیروهای حجمی اهمیت پیدا می کنند. بنابراین نیروی موئینگی نقش مهمی در جریان های عبوری از محیط متخلخل خواهد داشت [3].

لیو و همکاران [4] انتقال حرارت جابه جایی طی تبخیر روی یک صفحه گرم عمودی داخل یک محیط متخلخل غیرداری را بررسی کردند. آنها تاثیر پارامترهای تخلخل، عدد رینولدز مایع و عدد

رینولدز هوای ورودی را بر میزان انتقال حرارت و انتقال جرم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که بهترین شرایط برای انتقال حرارت و انتقال جرم زمانی است که فرآیند تبخیر در مقادیر بیشتر تخلخل و عدد رینولدز هوای ورودی و در مقادیر کمتر عدد رینولدز مایع اتفاق بیافتد. اسمیتس و همکاران [5] به بررسی رسانش حرارتی ماسه ها در درصد رطوبت و تخلخل های گوناگون در دو سیستم ترشونده و زهکشی شده پرداختند. نتایج آنها نشان داد در اثر افزایش رطوبت، ابتدا رسانش حرارتی به شدت افزایش می یابد (تا درصد رطوبت ۲)، سپس این افزایش با نرخ متوسطی ادامه پیدا می کند (تا درصد رطوبت ۱۶) و در مرحله آخر رسانش حرارتی با نرخ بسیار کمی افزایش می یابد و به مقدار ثابتی میل می کند. تاثیر میزان تخلخل بر رسانش حرارتی در درصد رطوبت با مقادیر بیشتر از درصد رطوبت باقیمانده، قابل مشاهده است و درصد رطوبت کمتر از این مقدار تاثیر چندانی بر رسانش حرارتی ندارد. با افزایش اندازه دانه های ماسه در حالت اشباع، رسانش حرارتی ماسه نیز افزایش می یابد. هالدر و داتا [6] به بررسی ضریب انتقال حرارت سطح طی تبخیر سریع داخل محیط متخلخل پرداختند. هدف تحقیق آنها بررسی نحوه خشک شدن غذا در معرض گرمایش ماکروویو بود. نتایج آنها نشان داد که شار حرارتی و جرمی در فصل مشترک جریان آزاد و محیط متخلخل متاثر از دو عامل نفوذ و جابه جایی جریان آزاد است. با افزایش نرخ تبخیر در اثر گرمایش، شار بخار ناشی از جابه جایی جریان آزاد افزایش می یابد، اما مقدار این شار در مقایسه با شار بخار ناشی از نفوذ، مقدار کوچکی است. همچنین طبق نتایج آنها با افزایش شار نفوذ، مقدار ضریب انتقال جرم به میزان ۸٪ افزایش می یابد. میزان انتقال حرارت در فصل مشترک، از موازنه رسانش محیط متخلخل و جابه جایی جریان آزاد به دست می آید. با افزایش جابه جایی جریان آزاد در اثر گرمایش ماکروویو، ضریب انتقال حرارت به میزان ۱۰٪ کاهش می یابد.

لوزانو و همکاران [7] به مدل سازی سینتیک تغییر فاز آب در داخل محیط متخلخل خاک پرداختند. براساس نتایج آزمایش هایی که در زمینه تبخیر در داخل خاک های نم دار انجام شده است، یک دوره زمانی تاخیر (عقب ماندگی) برای انجام تبخیر وجود دارد. یک مساله تغییر فاز غیرتعادلی را در نظر گرفتند و فرض شد که اختلاف پتانسیل شیمیایی بین دو فاز، عامل تغییر فاز باشد. بسته به محدوده فشار جزئی، دو رفتار مختلف مشاهده شد. مورد اول یک دامنه خطی نزدیک به حالت تعادل و مورد دوم یک دامنه غیرخطی بود که از حالت تعادل دور می شود. /عمر و همکاران [8] با استفاده از روش حجم محدود به بررسی تغییر فاز آب به بخار در داخل محیط متخلخل پرداختند. با استفاده از یک الگوریتم هموارسازی برای ضریب نفوذ موثر توانستند مشکل پرش ناگهانی مقادیر خصوصیات در مرز بین دو فاز را حذف کنند. از این الگوریتم هموارسازی می توان برای مسایل گذرا، غیرایزوتروپیک، غیرداری و همچنین حل معادلات انرژی ناهمگن استفاده کرد. شکری کوهنی و همکاران [9] خنک کاری سقف خانه را با استفاده از تبخیر در محیط متخلخل مورد تحلیل قرار دادند. آنها یک سری آزمایش برای ارزیابی راندمان تبخیر لایه متخلخل و همچنین تاثیر اندازه ذرات ماسه بر کاهش دمای سطح سقف طراحی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از لایه متخلخل، نرخ شار حرارتی سقف را کاهش می دهد و باعث صرفه جویی انرژی در منازل می شود. علاوه بر این با کاهش اندازه ذرات ماسه، دمای سقف کاهش می یابد و در نتیجه نرخ تبخیر از سطح سقف کمتر می شود و برای مدت طولانی تری سقف خیس باقی خواهد ماند. تریزی و همکاران [10] تاثیر حضور

$$y = \alpha_L y_L + (1 - \alpha_L) y_G, \quad y \in [\mu, \rho, k, C_p] \quad (2)$$

معادله انتقال فصل مشترک که موقعیت فصل مشترک آب و بخار در هر گام زمانی را مشخص می‌کند از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + U \cdot \nabla \alpha_L + \alpha_L \nabla \cdot U + \nabla \cdot (U_c \alpha_L (1 - \alpha_L)) = - \frac{\rho_L \nabla \cdot U}{(\rho_L - \rho_G)} \quad (3)$$

در رابطه ۳، U سرعت توده سیال است و به صورت میانگین وزنی دو فاز آب و بخار تعریف می‌شود:

$$U = \alpha_L U_L + (1 - \alpha_L) U_G \quad (4)$$

همچنین U_c سرعت فشردگی در فصل مشترک دو فاز آب و بخار است که طبق رابطه ۵ تعریف می‌شود.

$$U_c = C_a |U| \frac{\nabla \alpha_L}{|\nabla \alpha_L|} \quad (5)$$

در رابطه ۵، پارامتر C_a ضریب فشردگی نام دارد و معمولاً برای فصل مشترک‌های تیز، بین ۰/۷ تا یک بوده که در این مطالعه ضریب فشردگی ۱ در نظر گرفته شده است [16].

در فرآیند تغییر فاز، تغییر جرم به صورت محلی است و مقدار جرم کلی تغییر نمی‌کند. بنابراین معادله پیوستگی کلی به صورت رابطه ۶ خواهد بود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (6)$$

که برای جریان غیرقابل تراکم و بدون تغییر فاز $\nabla \cdot U = 0$ است و برای جریان همراه با تغییر فاز مقدار آن از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$\nabla \cdot U = \dot{m}''' \left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \quad (7)$$

با جای‌گذاری رابطه ۷ در رابطه ۳، معادله انتقال فصل مشترک در جریان همراه با تغییر فاز به دست می‌آید.

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + U \cdot \nabla \alpha_L + \nabla \cdot (U_c \alpha_L (1 - \alpha_L)) = -\dot{m}''' \left[\frac{1}{\rho_L} - \alpha_L \left(\frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_G} \right) \right] \quad (8)$$

معادله ممنوم جریان دوفازی آب و بخار در محیط متخلخل مس به صورت رابطه ۹ بیان می‌شود [17].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho U) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \mu [\nabla U + (\nabla U)^T]) - \nabla \cdot \left(\frac{2}{3} \varepsilon \mu \nabla \cdot U \right) + \rho g + F_s + \frac{\mu}{\gamma} U \quad (9)$$

در این رابطه ε و γ به ترتیب پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری هستند. تخلخل به صورت نسبت حجم اشغال شده توسط دو فاز سیال به حجم کل تعریف می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{V_L + V_G}{V_{tot}} \quad (10)$$

آخرین جمله در سمت راست معادله ممنوم نشان‌دهنده تلفات ویسکوز در یک محیط متخلخل است. به این جمله، ترم داریسی نیز گفته می‌شود و نقش کلیدی در افت انرژی جریان هنگام عبور از ناحیه متخلخل دارد [18]. در معادله ممنوم، ترم F_s ناشی از کشش

لایه متخلخل را در تبخیر داخل یک کانال شیب‌دار بررسی کردند. با استفاده از روش المان محدود، حل عددی فاز لایه متخلخل، اشباع و فاز گاز انجام شد. نتایج آنها نشان داد که استفاده از لایه متخلخل به جای فیلم مایع، میزان انتقال جرم و حرارت در کانال را افزایش می‌دهد. با افزایش سرعت هوای ورودی، کاهش تخلخل و کاهش ضخامت محیط متخلخل، میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ترزی و همکاران [11] با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و به کمک روش معکوس در تحلیل معادله حرارت، تبخیر داخل محیط متخلخل یک کانال عمودی را مورد مطالعه قرار دادند. دما در طول صفحه و نرخ جریان تبخیر داخل بستر اندازه‌گیری شد. نتایج آنها نشان داد که حضور لایه متخلخل باعث می‌شود با نرخ کمتر مایع ورودی، شار حرارتی بیشتری تولید شود. همچنین این نکته قابل توجه بوده که عدد ناسلت نهان نسبت به عدد ناسلت محسوس دارای اهمیت بالاتری است. مقدار عدد ناسلت نهان مربوط به تبخیر مایع داخل لایه متخلخل، بزرگ‌تر از عدد ناسلت محسوس است که در آن دمای فیلم مایع افزایش می‌یابد. ری و العمر [12] با استفاده از روش آنتالپی اصلاح‌شده، تبخیر داخل محیط متخلخل را شبیه‌سازی کردند. جریان به صورت یک‌بعدی و پایدار مدل می‌شود و آب در داخل یک اواپراتور متخلخل دچار تغییر فاز می‌شود. استفاده از روش آنتالپی اصلاح‌شده، زمان محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد. علاوه بر این از هموارسازی ضریب نفوذ موثر برای ارزیابی بردن پرش ناگهانی مقادیر خصوصیات در مرز بین دو فاز استفاده شد.

در این مطالعه با اصلاح ترم‌های گذرا و نفوذ حرارتی براساس درصد تخلخل، ظرفیت حرارتی ذرات جامد و افزودن ترم تلفات ویسکوز (جمله داریسی) به حلگر پایه اینترفوم از بسته محاسباتی این‌فوم، این حلگر برای تغییر فاز حرارتی در محیط متخلخل توسعه داده شد. اسم حلگر جدید، تبخیر محیط متخلخل است و در آن از روش حجم سیال برای فصل مشترک بین فازها استفاده می‌شود. برای انتقال جرم فرآیند تبخیر، مدل تبخیر لی به کار رفته است و با بیشتر شدن دمای آب از دمای اشباع، تغییر فاز رخ می‌دهد [13]. از مزایای گسترش این حلگر در این فوم می‌توان به امکان اعمال این کد به شبکه بدون ساختار و حل موازی اشاره کرد. نحوه توزیع کسر حجمی فازها، توزیع دما و نرخ جرمی تولید بخار در شارهای حرارتی و جرمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و به ماهیت پروفیل دما در دو ناحیه گرمایش و تبخیر اشاره خواهد شد.

۲- معادلات حاکم

در روش‌های اویلری، ردیابی سطح بین فازهای سیال برای تعیین فصل مشترک یک معادله انتقال با تابع نشانگر فاز انجام می‌شود. در روش حجم سیال، نشانگر فاز تابع پله بوده و بیانگر نسبت حجم یک فاز به حجم سلول است [14, 15]. طبق رابطه ۱، کسر حجمی آب به صورت نسبت حجم آب به مجموع دو فاز آب و بخار تعریف می‌شود:

$$\alpha_L(\vec{x}, t) = \frac{V_L}{V} = \begin{cases} 1 & \vec{x} \in \text{فاز مایع} \\ 0 < \alpha_L < 1 & \vec{x} \in \text{فصل مشترک} \\ 0 & \vec{x} \in \text{فاز بخار} \end{cases} \quad (1)$$

پارامترهای فیزیکی مساله همچون چگالی، ویسکوزیته، رسانش حرارتی و غیره در فصل مشترک آب و بخار به صورت خطی تغییر می‌کند.

۳- گسسته‌سازی معادلات

در این مطالعه برای شبیه‌سازی پدیده تبخیر در یک کانال متخلخل، معادلات شامل پیوستگی، ممنوم، انرژی، انتقال سطح مشترک و انتقال جرم تحت حلگری به نام تبخیر محیط متخلخل در نرم‌افزار این فوم پیاده‌سازی شده است. این نرم‌افزار به روش حجم محدود و با استفاده از الگوریتم پیزو به حل معادلات سرعت و فشار می‌پردازد [21]. در این مطالعه، گام زمانی به گونه‌ای تغییر می‌کند تا شرایط پایداری هیدرودینامیک (CFL) ارضا شود. گام زمانی بر حسب عدد کورانت و حداقل گام زمانی که توسط کاربر تعیین شده است، مشخص می‌شود. همچنین حداکثر مقدار عدد کورانت ۰/۱ در نظر گرفته شده است. سپس معادله انتقال سطح مشترک حل می‌شود. معادله انتقال حجم سیال با روش عمومی صریح چندبُعدی کراندار حل می‌شود که به همراه قیدهای اضافی بر پایه روش انتقال شار تصحیح شده (FCT) است [22]. پس از حل تابع انتقال سطح مشترک، متغیرهای فیزیکی شامل چگالی، ویسکوزیته، تخلخل، نفوذپذیری، متغیرهای هدایت حرارتی و گرمای ویژه به‌روزرسانی می‌شوند. در حلقه پیزو، ابتدا شار حجمی براساس حدس اولیه میدان سرعت محاسبه می‌شود، سپس شار حجمی براساس نیروی جاذبه، کشش سطحی و شرایط مرزی تصحیح می‌شود. در انتها، معادله انرژی براساس شار حجمی به‌دست‌آمده از حل حلقه پیزو حل می‌شود. مقدار انتقال جرم در این مرحله براساس رابطه لی محاسبه شده است و به‌عنوان ترم‌های چشمه در معادله کسر حجمی، معادله انرژی و معادله فشار اضافه می‌شود. نحوه گسسته‌سازی هر یک از ترم‌های موجود در معادلات حاکم در جدول ۱ ذکر شده است [23, 24].

جدول ۱) گسسته‌سازی معادلات حاکم

توضیحات	ترم	طرح گسسته‌سازی
مرتبه یک ضمنی	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho U),$ $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f C_{p,f} T)$	اویلر
شبه اسکیم ونلیبر که برای متغیر برداری اصلاح شده است.	$\nabla \cdot (\varepsilon \rho U U)$	گاوس ونلیبر نوع V
مرتبه دوم ضمنی و با الگوی تفاضل مرکزی	$\alpha_L \nabla \cdot U,$ $U \cdot \nabla \alpha_L, \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f C_{p,f} U T)$	گاوس ونلیبر
یک اسکیم محدودکننده و کراندار که شامل تابع محدودکننده شار و پارامتر هموارسازی است.	$\nabla \cdot (U_c \alpha_L (1 - \alpha_L))$	فشرده‌سازی فصل مشترک
استفاده از درون‌یابی خطی برای تخمین ترم نفوذ	$\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T),$ $\nabla \cdot (\varepsilon \mu [\nabla U + (\nabla U)^T])$	گاوس خطی
شبه اسکیم گاوس خطی که در آن گرادینان نرمال روی شبکه‌های غیرمتعامد اصلاح شده است.	$-\nabla \cdot \left(\frac{2}{3} \varepsilon \mu \nabla \cdot U \right), \nabla p$	گاوس خطی اصلاح شده
درون‌یابی خطی ترم چشمه	$\frac{\mu}{\gamma} U$	خطی‌سازی

۴- توصیف مساله

براساس شکل ۱، هندسه مساله به‌صورت یک کانال متخلخل قائم به سطح مقطع $0.1 \times 0.5 \text{ m}^2$ و به طول یک‌متر است. به دیواره سمت چپ کانال، شار حرارتی یکنواخت اعمال می‌شود، در حالی که دیواره سمت راست آن عایق است. دیواره سمت چپ از جنس آلومینیوم و محیط متخلخل داخل کانال از جنس مس است. در واقع از طریق گرمایش دیواره آلومینیومی به ضخامت ۰/۱۲ متر (در جهت X) و عمق ۰/۵ متر، شار حرارتی به آب عبوری از داخل کانال اعمال می‌شود. خصوصیات ناحیه متخلخل در جدول ۲ ذکر شده و

سطحی است. مدل کشش سطحی استفاده‌شده در این شبیه‌سازی، مدل نیروی سطحی پیوسته (CSF) است [19]. نیروی سطحی خارجی به‌صورت رابطه ۱۱ بر حسب کشش سطحی تعریف می‌شود.

$$F_s = \sigma K \nabla \alpha_L \quad (11)$$

کشش سطحی در جهت عمود بر سطح در نظر گرفته شده است و روی سطح مشترک محاسبه می‌شود. انحنای سطح مشترک به‌صورت رابطه ۱۲ به دست می‌آید.

$$K = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha_L}{|\nabla \alpha_L|} \right) \quad (12)$$

معادلات انرژی به‌صورت‌های مختلف برای جریان دوفازی تراکم‌ناپذیر همراه با تغییر فاز ارایه شده است. برخی محققان یکی از فازها را در دمای اشباع در نظر می‌گیرند که در این صورت معادله انرژی تنها برای یکی از فازهای سیال حل می‌شود. در این مطالعه، معادله انرژی برای هر دو فاز آب و بخار حل می‌شود. ترم آخر در سمت راست معادله اثر گرمای نهان در فرآیند تبخیر را لحاظ می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f C_{p,f} T) + \frac{\partial}{\partial t}((1 - \varepsilon) \rho_s C_{p,s} T) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f C_{p,f} U T) =$$

$$\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) - \varepsilon \dot{m}''' h_{LG} \quad (13)$$

در معادله انرژی، پارامتر رسانش حرارتی موثر براساس رسانش حرارتی فازهای سیال و ذرات جامد بیان می‌شود.

$$K_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s \quad (14)$$

رسانش حرارتی فازهای سیال به‌صورت میانگین رسانش حرارتی دو فاز مایع و بخار تخمین زده می‌شود. محاسبه ظرفیت حرارتی ویژه فازهای سیال نیز به همین ترتیب است. از آنجایی که تغییر در پارامترهای فیزیکی به‌صورت پیوسته نیست، این پرش عددی باعث مشکلاتی در حل عددی همچون اضافه جهش در سطح مشترک شده است که باعث ناپایداری و واگرایی حل عددی می‌شود. به همین دلیل با کاهش گرادینان در دو سوی سطح مشترک می‌توان به توزیع بهتری از دما رسید [20].

در این مطالعه فرض شده است که دمای داخل فاز بخار تابع فشار باشد. بنابراین با استفاده از رابطه ساده‌شده کلایوس-کلاپیرون تغییرات جزئی دما تحت تاثیر فشار محلی لحاظ شده است.

$$\ln \frac{P_{sat,1}}{P_{sat,2}} = -\frac{M h_{LG}}{R} \left(\frac{1}{T_{sat,1}} - \frac{1}{T_{sat,0}} \right) \quad (15)$$

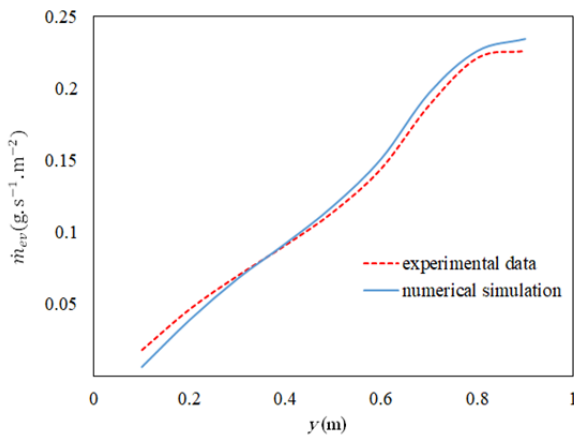
در این رابطه، M جرم مولکولی و R ثابت جهانی گاز است. اکثر مدل‌های انتقال جرمی که برای فرآیند تبخیر ارایه شده‌اند، دمای سطح مشترک را دمای اشباع در نظر می‌گیرند. اما در برخی حالت‌ها انحراف دمای سطح مشترک از دمای اشباع قابل ملاحظه است. برای نمونه در مساله حاضر که جریان دوفازی در داخل یک محیط متخلخل حرکت می‌کند، انحراف دمای سطح مشترک از دمای اشباع قابل ملاحظه است. در این تحقیق برای مدل‌سازی فرآیند انتقال جرم، مدل تغییر فاز لی به کار رفته است. در مدل لی، انتقال جرم در شرایط فشار ثابت و حالت شبه پایدار رخ می‌دهد.

$$\dot{m}''' = r \alpha_L \rho_L \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}}, \quad T > T_{sat} \quad (16)$$

در این رابطه، r شدت انتقال جرم بوده که یک ضریب تجربی است. این مدل انتقال جرم به سطح مشترک اولیه برای پیش‌بینی تغییر فاز نیاز ندارد و هر جا دما از دمای اشباع انحراف داشته باشد، تغییر فاز روی می‌دهد.

شناخته می‌شود. با کاهش شدید فشار آب ورودی به کانال، دمای اشباع آب برای شروع پدیده تبخیر نیز به میزان قابل توجهی کمتر از کانال‌های معمولی بدون محیط متخلخل خواهد بود. در یک کانال متخلخل قائم با ذرات مس و درصد تخلخل ۰/۸، دمای تبخیر آب حدود ۵۰ تا ۵۵°C است، در حالی که در کانال‌های معمولی و میکروکانال‌های با شرایط مشابه، دمای اشباع آب برای شروع پدیده تبخیر به مراتب بیشتر است.

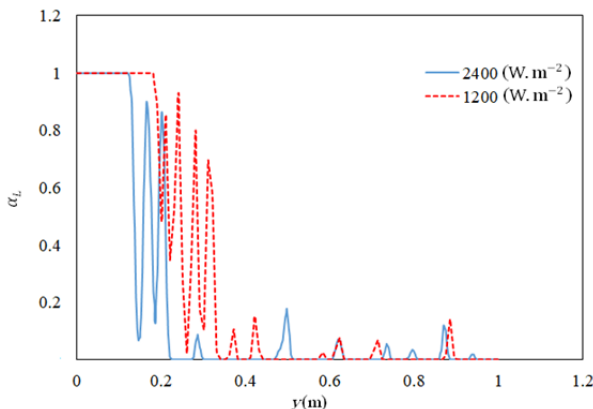
برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، مقدار بخار تولید شده در شارحرارتی ۱۲۰۰ (W.m⁻²) و شار جرمی ورودی ۴/۴۴ (g.s⁻¹.m⁻²) با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت [11]. نتایج نشان داد که نرخ جرمی بخار تولید شده در اغلب نواحی کانال با دقت بالایی از نتایج تجربی تبعیت می‌کند (نمودار ۱).



نمودار ۱) مقایسه نرخ جرمی تولید بخار به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی

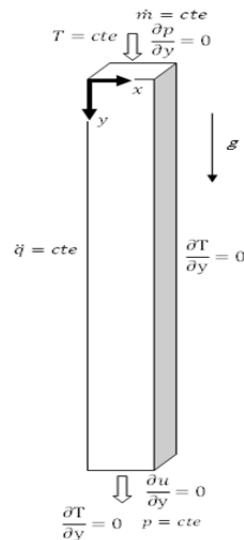
۵-۲- کسر حجمی آب

در اثر افزایش شارحرارتی، محل شروع تبخیر به سمت ابتدای کانال گرایش پیدا می‌کند (نمودار ۲؛ شکل ۲) و مقدار متوسط کسر حجمی بخار افزایش می‌یابد. در اثر افزایش دبی جرمی ورودی به کانال، ناحیه شروع تبخیر به سمت انتهای کانال حرکت می‌کند (نمودار ۳؛ شکل ۳). بررسی تغییرات کسر حجمی آب در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که در ابتدا توده‌های کوچک بخار در ناحیه میانی و انتهایی کانال شکل می‌گیرد، سپس با افزایش اندازه تکه‌های بخار در کانال و پیوستن آنها به یکدیگر، یک ناحیه پوشیده از بخار به پهنای عرض کانال ایجاد می‌شود و تا زمانی که تمامی قطرات آب موجود در ناحیه تبخیر کانال خشک شود، کسر حجمی بخار به طور پیوسته افزایش می‌یابد (نمودار ۴؛ شکل ۴).



نمودار ۲) تغییرات کسر حجمی آب روی دیواره در شارهای حرارتی مختلف

محدوده مقادیر مربوط به دبی جرمی ورودی، دمای آب ورودی، شار اعمال شده به دیواره و شرایط محیط در این شبیه‌سازی عددی به صورت جدول ۳ است. همچنین شبکه‌بندی ناحیه حل به صورت دوبعدی بوده و تعداد ۲۵۰۰۰ المان به صورت جدول ۴ برای این مساله در نظر گرفته شده است.



شکل ۱) هندسه و شرایط مرزی کانال متخلخل

جدول ۲) خصوصیات ناحیه متخلخل

مقادیر	خصوصیات
۰/۰۱	ضخامت (m)
۳۹۰	رسانش حرارتی (W.m ⁻¹ .k ⁻¹)
۰/۸	تخلخل
۸/۵ * ۱۰ ^{-۸}	نفوذپذیری (m ^{-۲})

جدول ۳) شرایط کاری شبیه‌سازی عددی

متغیر	حداقل	حداکثر
شار جرمی ورودی (g.s ⁻¹ .m ⁻²)	۲/۵	۲
دمای آب ورودی (°C)	۱۵	۲۰
شار حرارتی دیواره (W.m ⁻²)	۱۲۰۰	۲۴۰۰
دمای هوای محیط (°C)	۱۵	۲۵
فشار خروجی (kPa)	۱۲	۱۲/۵
رطوبت محیط (درصد)	۴۰	۶۵

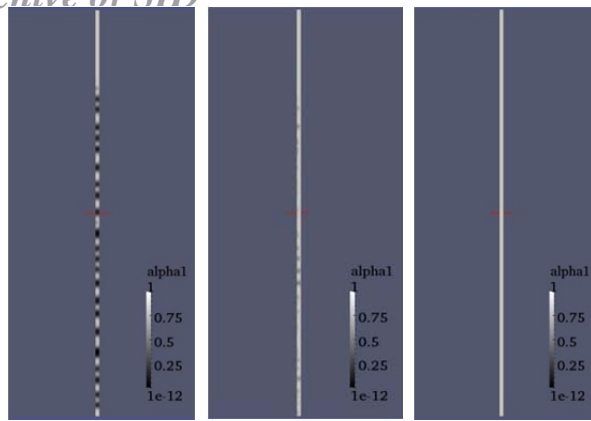
جدول ۴) استقلال نتایج حل از شبکه‌بندی

مرحله	تعداد المان‌ها	نرخ جرمی تولید بخار در خروجی
۱	۱۰۰۰۰	۰/۳۰۳
۲	۱۵۰۰۰	۰/۳۹۵
۳	۲۰۰۰۰	۰/۴۷۱
۴	۲۵۰۰۰	۰/۵۳۸
۵	۳۰۰۰۰	۰/۵۴۲

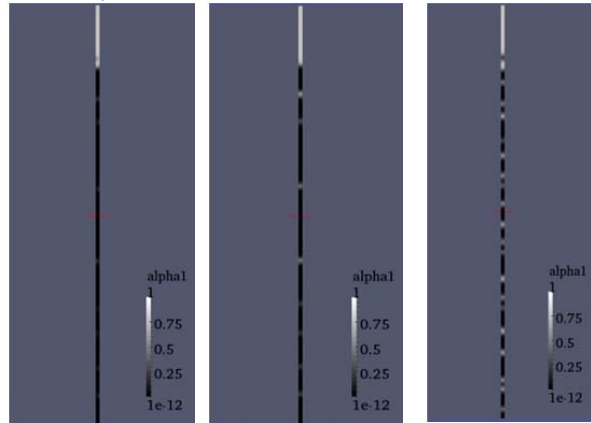
۵- نتایج

۵-۱- صحت‌سنجی نتایج

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی تبخیر در کانال متخلخل قائم با استفاده از حلگر تبخیر محیط متخلخل مورد تحلیل قرار می‌گیرد. حضور محیط متخلخل باعث تلفات انرژی و افت فشار قابل توجه در جریان می‌شود. به طور کلی تلفات انرژی در محیط متخلخل به دو دسته تقسیم می‌شود، دسته اول تلفات ویسکوز و دسته دوم تلفات اینرسی است. معمولاً در اغلب موارد از تلفات اینرسی صرف نظر می‌شود. ترم ناشی از تلفات ویسکوز به صورت ترم دارسی نیز

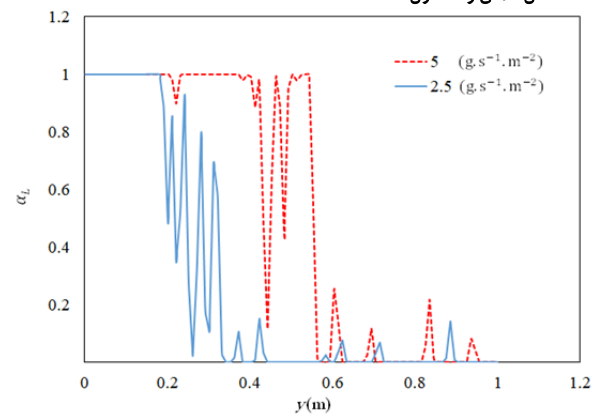


(الف) (ب) (پ)

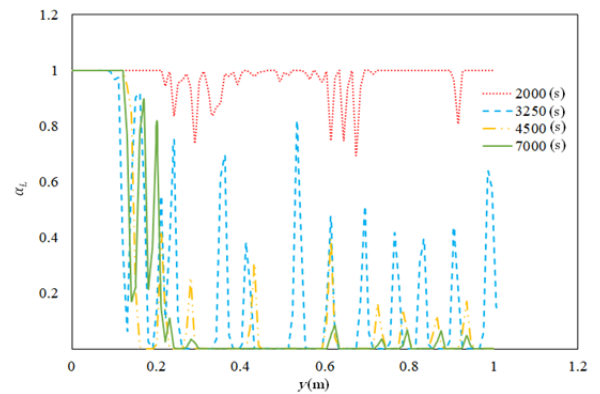


(ت) (ث) (ج)

شکل ۴ کسر حجمی آب در زمان‌های مختلف: الف) صفر ثانیه، ب) ۲۰۰۰ ثانیه، پ) ۲۲۵۰ ثانیه، ت) ۳۲۵۰ ثانیه، ث) ۴۵۰۰ ثانیه، ج) ۷۰۰۰ ثانیه



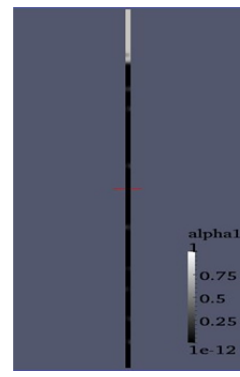
نمودار ۳ تغییرات کسر حجمی آب روی دیواره در شارهای جرمی مختلف



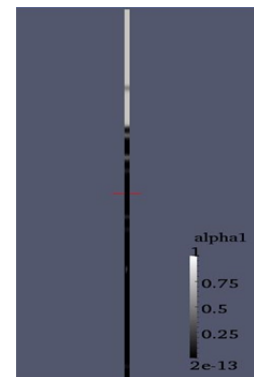
نمودار ۴ کسر حجمی آب روی دیواره در زمان‌های مختلف

۳-۵- توزیع دما

نتایج توزیع دما نشان می‌دهد که دو ناحیه حرارتی در داخل کانال وجود دارد. ناحیه اول در نقاط ابتدایی کانال قرار دارد. آب سرد ورودی به کانال در اثر شار حرارتی دیواره به تدریج گرم می‌شود، بدون این که تغییر فازی رخ دهد. معمولاً در این ناحیه دمای دیواره به صورت خطی با طول کانال تغییر می‌کند. در ناحیه دوم و با رسیدن به دمای اشباع، پدیده تبخیر شروع می‌شود و شکل پروفیل دما تغییر می‌کند. در ابتدای این ناحیه، دما بدون تغییر است و جریان آب دچار یک تغییر فاز بدون افزایش دما می‌شود. در اثر طول‌های بعدی این ناحیه، فاز بخار سوپرهیت می‌شود. در اثر سوپرهیت شدن بخار، پخش دمایی اتفاق می‌افتد و پروفیل دمای دیواره شکل نوسانی به خود می‌گیرد (نمودار ۵). در اغلب موارد، حداکثر دمای ایجاد شده در کانال در نواحی میانی کانال رخ می‌دهد (شکل‌های ۵ و ۶) و تنها در حالتی که دبی جرمی آب ورودی به کانال زیاد و شار حرارتی اندک باشد، محل حداکثر دما تا حدی به سمت پایین دست کانال نزدیک خواهد شد. در اثر افزایش شار حرارتی، دامنه نوسانات دمای دیواره افزایش می‌یابد (نمودار ۶). در اثر افزایش دبی جرمی آب ورودی به کانال، دامنه نوسانات دما کاهش می‌یابد (نمودار ۷). به طور عمومی می‌توان گفت با افزایش شار حرارتی و کاهش دبی جرمی آب ورودی، ناحیه تبخیر به سمت نوسانات بیشتر و جهش‌های ناگهانی دمای دیواره خواهد رفت. علاوه بر این دو عامل، پارامترهای دیگری همچون میزان تخلخل و نفوذپذیری محیط نیز می‌توانند بر دمای اشباع و تا حدی بر دامنه نوسانات دما موثر باشند. در موارد پیچیده‌تر می‌توان حتی تأثیر

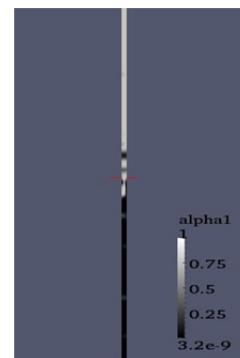


(ب)

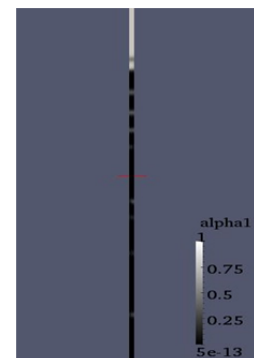


(الف)

شکل ۲ کسر حجمی آب؛ الف) شار حرارتی $(1200 \text{ (w.m}^{-2}\text{)})$ ، ب) شار حرارتی $(2400 \text{ (w.m}^{-2}\text{)})$

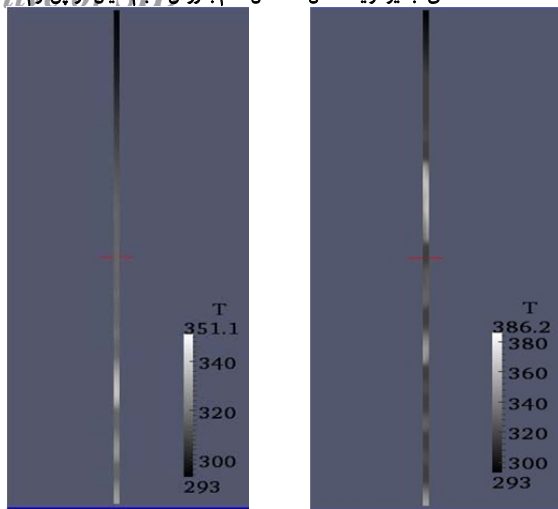


(ب)



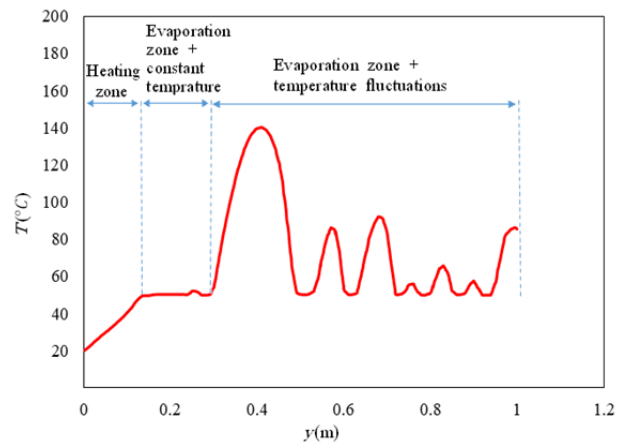
(الف)

شکل ۳ کسر حجمی آب؛ الف) شار جرمی $(2/5 \text{ (g.s}^{-1}\text{.m}^{-2}\text{)})$ ، ب) شار جرمی $(5 \text{ (g.s}^{-1}\text{.m}^{-2}\text{)})$

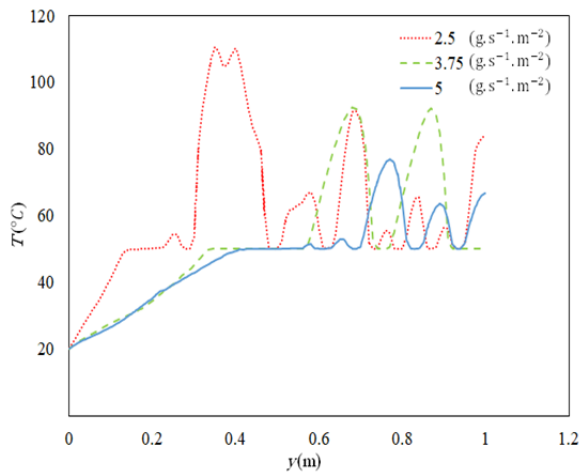


شکل ۶ توزیع دما؛ الف) شار گرمی $2/0 (g.s^{-1}.m^{-2})$ ، ب) شار گرمی $0 (g.s^{-1}.m^{-2})$

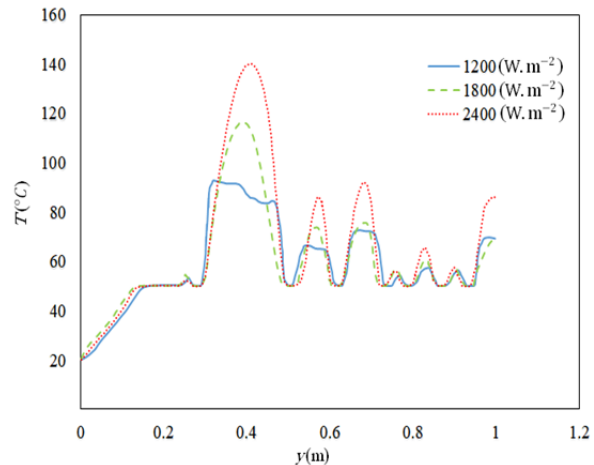
خصوصیات دیواره از جمله زاویه تماس در حالت‌های تعادلی و غیرتعادلی را نیز بررسی کرد که این خصوصیت خود به جنس دیواره، زبری سطح، اندازه قطرات فازهای آب و بخار، نسبت نیروی گرانش به کشش سطحی و غیره وابسته است.



نمودار ۵ نواحی مختلف نمودار دمای دیواره



نمودار ۷ تغییرات دمای دیواره در اثر شارهای گرمی مختلف

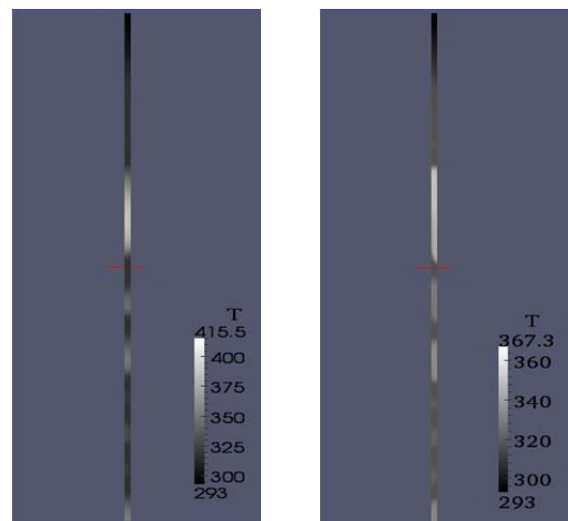


نمودار ۶ تغییرات دمای دیواره در اثر شارهای حرارتی مختلف

۵-۴- نرخ گرمی تولید بخار

مقدار نرخ گرمی بخار تولید شده به عوامل متعددی وابسته بوده که از جمله آنها شرایط حرارتی دیواره، شرایط مرزی ورودی، فصل مشترک بین فازهای آب و بخار، زاویه تماس و خصوصیات ترموفیزیک ذرات جامد است. به طور کلی نتایج مربوط به نرخ گرمی تولید بخار نشان می‌دهد که در ورودی کانال، تولید بخار اتفاق نمی‌افتد، سپس میزان تولید بخار ناگهان افزایش می‌یابد و با شیب زیادی به پیش می‌رود، اما با نزدیک شدن به انتهای کانال به تدریج از شدت تولید بخار کاسته و به مقدار معینی محدود می‌شود. با افزایش شار حرارتی اعمالی به دیواره کانال، مقدار بخار تولید شده در نواحی انتهایی کانال به میزان قابل توجهی بیشتر خواهد شد (نمودار ۸). در اثر افزایش دبی گرمی آب ورودی به کانال، میزان جرم بخار تولید شده به شدت کاهش می‌یابد (نمودار ۹).

با توجه به این که جریان آب ورودی به کانال از زمان شروع تا رسیدن به حالت نهایی، رژیم‌های مختلف جریان دوفازی آب و بخار را در داخل محیط متخلخل مس تجربه می‌کند، بنابراین می‌توان نرخ تولید بخار در هر یک از این رژیم‌های جریان را نیز بررسی کرد. ملاک شروع تغییر فاز، عبور از یک دمای اشباع ثابت در



شکل ۵ توزیع دما؛ الف) شار حرارتی $2400 (W.m^{-2})$ ، ب) شار حرارتی $1200 (W.m^{-2})$

مقایسه قرار گرفت. سپس با بررسی توزیع کسر حجمی آب، تغییرات دما، توسعه فاز بخار طی زمان و نرخ جرمی تولید بخار، خصوصیات این جریان معرفی شد. خلاصه نتایج به دست آمده از این شبیه سازی را می توان به صورت موارد زیر بیان کرد:

۱- در اثر افزایش شار حرارتی، محل شروع تبخیر به سمت ابتدای کانال گرایش پیدا می کند و مقدار متوسط کسر حجمی بخار افزایش می یابد.

۲- در اثر افزایش دبی جرمی آب ورودی به کانال، ناحیه شروع تبخیر به سمت انتهای کانال حرکت می کند.

۳- نتایج توزیع دما نشان می دهد که دو ناحیه حرارتی در داخل کانال وجود دارد. در ناحیه اول، آب سرد ورودی به کانال در اثر شار حرارتی دیواره به تدریج گرم می شود، بدون این که تغییر فازی رخ دهد. در ناحیه دوم و با رسیدن به دمای اشباع، پدیده تبخیر شروع می شود و شکل پروفیل دما تغییر می کند. در ابتدای این ناحیه دما بدون تغییر است و جریان آب دچار یک تغییر فاز بدون افزایش دما می شود. فاز بخار در طول های بعدی این ناحیه، سوپرهیت می شود. در اثر سوپرهیت شدن بخار، پرش دمایی اتفاق می افتد و پروفیل دمای دیواره شکل نوسانی به خود می گیرد.

۴- در اغلب موارد، حداکثر دمای ایجاد شده در کانال در نواحی میانی کانال رخ می دهد و تنها در حالتی که دبی جرمی آب ورودی به کانال زیاد و شار حرارتی اندک باشد، محل حداکثر دما تا حدی به سمت پایین دست کانال نزدیک خواهد شد.

۵- در اثر افزایش شار حرارتی، دامنه نوسانات دمای دیواره افزایش و با افزایش دبی جرمی آب ورودی به کانال، دامنه نوسانات دما کاهش می یابد.

۶- نتایج نرخ جرمی تولید بخار نشان می دهد که در ورودی کانال تولید بخار اتفاق نمی افتد، سپس ناگهان میزان تولید بخار افزایش می یابد و با شیب زیادی به پیش می رود، اما با نزدیک شدن به انتهای کانال به تدریج از شدت تولید بخار کاسته و به مقدار معینی محدود می شود.

۷- با افزایش شار حرارتی اعمالی به دیواره کانال، مقدار بخار تولید شده در نواحی انتهایی کانال به میزان قابل توجهی بیشتر خواهد شد، به طوری که نرخ جرمی تولید بخار از مقدار $0.454 \text{ (g.s}^{-1}.\text{m}^{-2})$ در شار حرارتی $1200 \text{ (W.m}^{-2})$ به مقدار $0.54 \text{ (g.s}^{-1}.\text{m}^{-2})$ در شار حرارتی $2400 \text{ (W.m}^{-2})$ افزایش می یابد.

۸- در اثر افزایش دبی جرمی آب ورودی به کانال، میزان جرم بخار تولید شده به شدت کاهش می یابد، به طوری که نرخ جرمی تولید بخار در مقطع خروجی کانال از مقدار $0.45 \text{ (g.s}^{-1}.\text{m}^{-2})$ در شار جرمی ورودی $2/5 \text{ (g.s}^{-1}.\text{m}^{-2})$ به مقدار $0.29 \text{ (g.s}^{-1}.\text{m}^{-2})$ در شار جرمی ورودی $5 \text{ (g.s}^{-1}.\text{m}^{-2})$ کاهش می یابد.

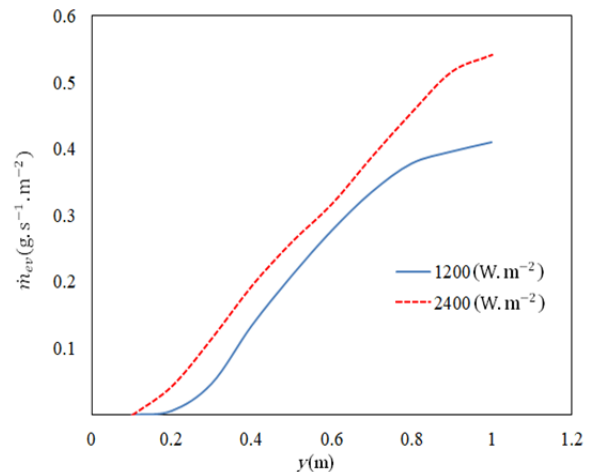
تشکر و قدردانی: نویسندگان از جناب آقای دکتر عباس رامیار بابت رهنمودهای مفیدشان قدردانی می نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

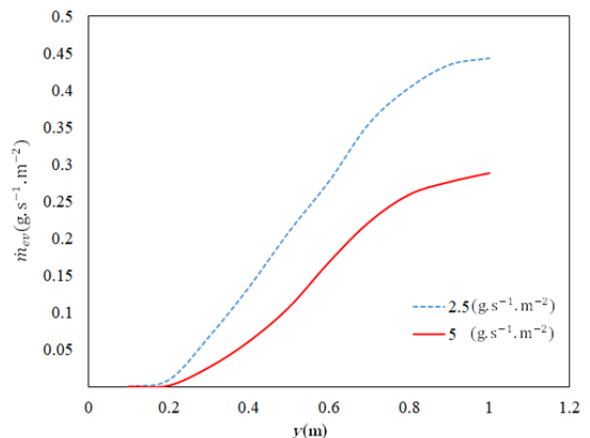
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمانها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: حسن غلامی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ رامین کوهی کمالی

نظر گرفته شد، اما در حالت های پیچیده تر و برای جریان های خاص می توان از دمای اشباع متغیر بر حسب فشار استفاده کرد.



نمودار ۸) نرخ تولید بخار در اثر شارهای حرارتی مختلف



نمودار ۹) نرخ تولید بخار در اثر شارهای جرمی مختلف

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه پدیده تبخیر در محیط متخلخل یک کانال قائم با استفاده از حلگر تبخیر محیط متخلخل در نرم افزار متن باز این فوم مورد تحلیل قرار گرفت. این حلگر از طریق توسعه حلگر اینترفوم طی دو مرحله ایجاد شد. ابتدا با افزودن شرایط تغییر فاز به حلگر پایه، حلگر تغییر فاز حرارتی شامل پدیده تبخیر تولید شد و در نهایت با لحاظ کردن خصوصیات هیدرودینامیک و ترموفیزیک ناحیه متخلخل، حلگر نهایی به دست آمد. نرم افزار این فوم به روش حجم محدود و با استفاده الگوریتم پیروزو به حل معادلات سرعت و فشار می پردازد. عامل تغییر فاز، شار حرارتی دیواره است که تبخیر با عبور دمای جریان از دمای اشباع آغاز خواهد شد. مدل استفاده شده برای تخمین انتقال جرم طی تبخیر، مدل لی است. معادله انتقال حجم سیال با روش عمومی صریح چندبُعدی کراندار حل شد که در آن قیدهای اضافی بر پایه روش FCT به کار می رود. برای کشش سطحی از مدل CSF استفاده شد. شرایط محیط متخلخل از نظر تخلخل و نفوذپذیری، همگن در نظر گرفته شد. جنس کانال متخلخل از مس و جنس دیواره گرم از آلومینیوم بوده و شار حرارتی اعمال شده یکنواخت است. ابتدا نتایج عددی به دست آمده از حلگر تبخیر محیط متخلخل با نتایج تجربی مورد

3- Lehmann P, Assouline S, Or D. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. *Physical Review E*. 2008;77(5):056309.

4- Leu JS, Jang JY, Chou WC. Convection heat and mass transfer along a vertical heated plate with film evaporation in a non-darcian porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(23-24):5447-5450.

5- Smits KM, Sakaki T, Limuwat A, Illangasekare TH. Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage - wetting cycles. *Vadose Zone Journal*. 2010;9(1):172-180.

6- Halder A, Datta AK. Surface heat and mass transfer coefficients for multiphase porous media transport models with rapid evaporation. *Food and Bioproducts Processing*. 2012;90(3):475-490.

7- Lozano AL, Cherblanc F, Cousin B, Bénet JC. Experimental study and modelling of the water phase change kinetics in soils. *European Journal of Soil Science*. 2008;59(5):939-949.

8- Alomar OR, Mendes MAA, Trimis D, Ray S. Numerical simulation of complete liquid-vapour phase change process inside porous media using smoothing of diffusion coefficient. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014;86:408-420.

9- Shokri Kuehni SMS, Bou-Zeid E, Webb C, Shokri N. Roof cooling by direct evaporation from a porous layer. *Energy and Buildings*. 2016;127:521-528.

10- Terzi A, Foudhil W, Harmand S, Ben Jabrallah S. Liquid film evaporation inside an inclined channel: Effect of the presence of a porous layer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;109:136-147.

11- Terzi A, Foudhil W, Harmand S, Ben Jabrallah S. Experimental investigation on the evaporation of a wet porous layer inside a vertical channel with resolution of the heat equation by inverse method. *Energy Conversion and Management*. 2016;126:158-167.

12- Ray S, Alomar OR. Simulation of liquid-vapour phase change process inside porous media using modified enthalpy formulation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;105:123-136.

13- Lee WH. *Computational methods for two-phase flow and particle transport*. Singapore: World Scientific Publishing Company; 2013. pp. 241-398.

14- Huang M, Wu L, Chen B. A piecewise linear interface-capturing volume-of-fluid method based on unstructured grids. *Numerical Heat Transfer Part B Fundamentals*. 2012;61(5):412-437.

15- Mahady K, Afkhami Sh, Kondic L. A volume of fluid method for simulating fluid/fluid interfaces in contact with solid boundaries. *Journal of Computational Physics*. 2015;294:243-257.

16- Weller HG. A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow [Internet]. London: OpenCFD Ltd; 2008 [cited 2017 september 25]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/271831018>

17- Kaviany M. *Principles of heat transfer in porous media*. 2nd Edition. New York: Springer; 1999. pp. 427-503.

18- Wang L, Wang LP, Guo Z, Mi J. Volume-averaged macroscopic equation for fluid flow in moving porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;82:357-368.

19- Brackbill JU, Kothe DB, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*. 1992;100(2):335-354.

(نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ نوید شریفی (نویسنده سوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

۷- پی‌نوشت

شرح	علامه اختصاری
ضریب فشردگی	C_a
ظرفیت حرارتی ویژه فازهای سیال ($Jkg^{-1} K^{-1}$)	$C_{p,f}$
ظرفیت حرارتی ویژه فازهای سیال ($Jkg^{-1} K^{-1}$)	$C_{p,s}$
نیروی سطحی خارجی (N)	F_s
شتاب گرانش (ms^{-2})	g
انحنای سطح مشترک (m^{-1})	K
رسانش حرارتی ذرات جامد (WmK^{-1})	k_s
رسانش حرارتی فازهای سیال (WmK^{-1})	k_f
رسانش حرارتی موثر (WmK^{-1})	K_{eff}
گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})	h_{LG}
جرم مولکولی ($kgmol^{-1}$)	M
نرخ تغییر فاز ($kgm^{-3}s^{-1}$)	\dot{m}'''
فشار (pa)	p
فشار اشباع (pa)	P_{sat}
ثابت جهانی گاز	R
شدت انتقال جرم (s^{-1})	r
دمای (K)	T
دمای اشباع (K)	T_{sat}
زمان (s)	t
سرعت فازهای سیال (ms^{-1})	U
ضریب فشردگی (ms^{-1})	U_c
حجم سلول (m^3)	V
حجم فاز گاز (m^3)	V_G
حجم فاز مایع (m^3)	V_L
عرض کانال (m)	x
طول کانال (m)	y
علامه یونانی	
لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
چگالی فازهای سیال (kgm^{-3})	ρ_f
چگالی ذرات جامد (kgm^{-3})	ρ_s
چگالی فاز گاز (kgm^{-3})	ρ_L
چگالی فاز گاز (kgm^{-3})	ρ_G
کسر حجمی فاز مایع	α_L
نفوذپذیری (m^2)	γ
کشش سطحی (Nm^{-1})	σ
تخلخل	ε
زیرنویس‌ها	
فازهای سیال	f
فاز گاز	G
فاز مایع	L
ذرات جامد	s
اشباع	sat
موثر	eff

منابع

1- Davarzani H, Smits K, Tolene RM, Illangasekare T. Study of the effect of wind speed on evaporation from soil through integrated modeling of the atmospheric boundary layer and shallow subsurface. *Water Resources Research*. 2014;50(1):661-680.

2- Shokri N, Lehmann P, Or D. Characteristics of evaporation from partially wettable porous media. *Water Resources Research*. 2009;45(2):W02415.

Energy. 2016;89:120-131.

23- Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. II. monotonicity and conservation combined in a second-order scheme. Journal of Computational Physics. 1974;14(4):361-370.

24- Jasak H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows [Dissertation]. London: University of London/Imperial College; 1996.

20- Samkhaniani N. Simulation of convective heat transfer of gas-liquid bubble train flow in wet microtube. Heat Transfer Asian Research. 2017;46(4):331-346.

21- Weller HG, Tabor G, Jasak H, Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. Computers in Physics. 1998;12(6):620.

22- Samkhaniani N, Ansari MR. Numerical simulation of bubble condensation using CF-VOF. Progress in Nuclear