



## شبیه‌سازی عددی جریان فیلم میعان آرام روی صفحه قائم با روش حجم سیال

محمدرضا انصاری<sup>1\*</sup>، نیما سامخانیانی<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 111-14115، mra\_1330@modares.ac.ir

## چکیده

در این مطالعه روش حجم سیال از نرم‌افزار متن باز این فوم برای شبیه‌سازی فرآیند میعان توسعه داده شده است. دوفاز غیرقابل تراکم و مخلوط نشدنی است و فاز بخار در حالت اشباع قرار دارد. فصل مشترک بین دو فاز با روش حجم سیال تابع رنگ (CF-VOF) مدل‌سازی می‌شود، کشش سطحی بین دوفاز با روش نیروی سطح پیوسته (CSF) و انتقال جرم بین دوفاز با مدل انتقال جرم لی (Lee) در نظر گرفته شده است. کوپل بین فشار و سرعت با الگوریتم پی‌زو (PISO) و برای شبکه‌ی ناچابجا برطرف شده است. برای اعتبارسنجی این حلگر، مسئله‌ی یک بعدی استفان شبیه‌سازی شده است. در مسئله‌ی استفان حرکت فصل مشترک از دیوار سرد از حل عددی با حل تحلیلی مقایسه شده است. سپس با این حلگر جریان آرام فیلم میعان روی سطح قائم تحت تأثیر گرانش شبیه‌سازی می‌شود. ضخامت فیلم میعان از حل عددی مقدار کمتری نسبت به حل تحلیلی پیش‌بینی می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که عدد نوسلت تابع گرمای ویژه‌ی فاز بخار است و نیاز است تا روابط تحلیلی و تجربی که تاکنون برای محاسبه‌ی عدد نوسلت جریان فیلم سیال ارائه شده است اصلاح گردد.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 شهریور 1393

پذیرش: 21 آبان 1393

ارائه در سایت: 20 دی 1393

کلیدواژگان:

روش حجم سیال

میعان

انتقال حرارت

تغییر فاز

این فوم

## Numerical Simulation of Laminar Film Condensation over Vertical Plate with VOF Method

Mohamad Reza Ansari\*, Nima Samkhaniani

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, mra\_1330@modares.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 07 September 2014  
Accepted 12 November 2014  
Available Online 10 January 2015

Keywords:  
VOF method  
Condensation  
Heat Transfer  
Phase Change  
Open FOAM

## ABSTRACT

In the present study, volume of fluid method in Open FOAM open source CFD package will be extended to consider phase change phenomena due to condensation process. Both phases (liquid-vapor) are incompressible and immiscible. Vapor phase is assumed in saturated temperature. Interface between two phases is tracked with color function volume of fluid (CF-VOF) method. Surface Tension is taken into consideration by Continuous Surface Force (CSF) model and mass transfer occurring along interface is considered by Lee mass transfer model. Pressure-Velocity coupling will be solved with PISO algorithm in the collocated grid. This solver is validated with Stefan problem. In one dimensional Stefan problem, the desistance of interface motion from cold wall is compared with the analytical solution. Then condensate laminar liquid film flow over vertical plate is simulated in the presence of gravity. Numerical result shows calculated film thickness from numerical simulation is thinner than analytical solution. Also, it shows Nusselt number is a function of vapor specific heat which is neglected in existing correlations, therefore analytical solution and experimental correlation should be modified to consider this effect on the Nusselt Number.

## 1- مقدمه

هندسه‌ی سیستم: سطح صاف، بیرونی، درونی و غیره  
همپوشانی بین دسته‌بندی‌های مختلف وجود دارد و دسته‌بندی براساس حالت میعان معمولاً رایج‌ترین دسته‌بندی و مفیدترین شیوه‌ی دسته‌بندی است.

هرگاه دمای بخار به اندازه‌ی کافی پایین‌تر از دمای اشباع باشد تا قطره جوانه بزند میعان همگن رخ می‌دهد. میعان همگن می‌تواند از برخورد دو جریان بخار با دماهای متفاوت و یا کاهش فشار بخار ایجاد شود. بیشتر فرآیندهای میعان از نوع ناهمگن است جایی که قطرات بر روی سطح جامد تشکیل می‌شوند و رشد می‌کنند. میعان ناهمگن به دو دسته‌ی میعان قطره‌ای

میعان فرآیندی است که با حذف حرارت از سیستم سبب تبدیل بخار به مایع می‌گردد. میعان نقش مهمی در طبیعت ایفا می‌کند و بخش اساسی از چرخه‌ی آب در طبیعت است. علاوه بر این در صنعت، میعان در شکل‌های مختلف در بسیاری از مکان‌ها و موقعیت‌ها رخ می‌دهد. میعان را می‌توان براساس پارامترهای مختلف زیر دسته‌بندی کرد [1]:

حالت میعان: همگن، قطره‌ای، فیلم و تماس مستقیم  
حالت بخار: تک جزیی، چند جزیی که همه‌ی اجزای آن میعان پذیرند، چند جزیی با یک یا چند جز غیر میعان پذیر و غیره

Please cite this article using:

M.R. Ansari, N. Samkhaniani, Numerical Simulation of Laminar Film Condensation over Vertical Plate with VOF Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 214-220, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M.R. Ansari, N. Samkhaniani, Numerical Simulation of Laminar Film Condensation over Vertical Plate with VOF Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 214-220, 2015 (In Persian)

برای مدل‌سازی جریان تغییر فاز ناشی از انتقال حرارت (جوشش) روش‌های عددی دوفازی حاوی فصل مشترک در دهه‌ی گذشته توسعه یافته‌اند و فرآیند تغییر فاز (جوشش) با روش‌های حجم سیال [15]، سطوح همتراز [16]، روش تعقیب جبهه [17] و میدان فاز [18] مدل‌سازی شده است. مروری بر مدل‌سازی‌های جریان تغییر فاز (جوشش و میعان) در مرجع [19] ارائه شده است. با وجود اهمیتی که میعان در یک چرخه‌ی حرارتی داشته است، شبیه‌سازی جریان میعان تقریباً مسکوت مانده است [19] و مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. شبیه‌سازی میعان تک حباب [20] یا چند حباب [21] در جریان جوشش مایع سرد و شبیه‌سازی انتقال حرارت و رژیم‌های جریان میعان در میکروکانال [19] از محدود مطالعات صورت گرفته در این زمینه است.

در این مطالعه با افزودن معادله‌ی انرژی و ترم‌های چشمه‌ی مناسب به روش حجم سیال (حلگر اینترفوم) از بسته محاسباتی این فوم [22]، این حلگر برای مدل‌سازی جریان میعان توسعه یافته است. از آنجا که در این حلگر از روش حجم سیال تابع رنگ استفاده می‌شود با انتخاب مدل انتقال جرم لی نیاز به فصل مشترک اولیه برای مدل‌سازی جریان میعان وجود ندارد و هرچا دمای سیال از دمای اشباع پایین‌تر باشد، میعان رخ می‌دهد. از مزایای گسترش کد در این بسته محاسباتی می‌توان به امکان اعمال این کد به شبکه بی‌ساختار و حل موازی اشاره کرد. بنابراین روش ارائه شده در این مقاله عمومی است و به هندسه و یا فیزیک خاص مثلاً خیزش تک حباب و یا یک رژیم خاص جریان، محدود نمی‌شود. در این مطالعه کد با دو مسئله‌ی استفان تغییر فاز یک بعدی و مساله‌ی جریان فیلم میعان تغییر فاز دو بعدی مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد.

## 2- مدل عددی

### 2-1- معادلات حاکم

در روش حجم سیال، نشانگر فاز بیانگر حجم یک فاز به حجم سلول است. در اینجا، مقدار  $\alpha_L$  در فاز مایع یک، در فاز بخار صفر و در ناحیه‌ی فصل مشترک بین مایع و بخار بین صفر و یک تغییر می‌کند. طبق رابطه (1) داریم:

$$\alpha_L(\bar{x}, t) = \frac{V_L}{V} \quad (1)$$

پارامترهای فیزیکی مسئله همچون چگالی، ویسکوزیته و غیره در فصل مشترک بصورت خطی تغییر می‌کند. طبق رابطه (2) داریم:

$$y = \alpha_L y_L + (1.0 - \alpha_L) y_G \quad (2)$$

که در اینجا  $y$  نماینده‌ی لزجت  $\mu$ ، چگالی  $\rho$ ، ضریب هدایت حرارتی  $k$  و ظرفیت گرمای ویژه  $C_p$  است. در فرآیند تغییر فاز، تغییر جرم بصورت محلی است و مقدار جرم کلی تغییر نمی‌کند بنابراین معادله‌ی پیوستگی کلی بصورت رابطه (3) خواهد بود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (3)$$

با جاگذاری چگالی از رابطه‌ی 2 در رابطه‌ی 3، معادله‌ی انتقال فصل مشترک که موقعیت فصل مشترک در هر گام زمانی را مشخص می‌کند استخراج می‌شود که بصورت رابطه (4) است:

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla \alpha_L + \alpha_L \nabla \cdot \bar{U} = - \frac{\rho_L \nabla \cdot \bar{U}}{(\rho_L - \rho_G)} \quad (4)$$

که برای جریان غیر قابل تراکم و بدون تغییر فاز  $\nabla \cdot \bar{U} = 0$  است. برای فرآیند

و فیلمی تقسیم‌بندی می‌شود. میعان قطره‌ی زمانی اتفاق می‌افتد که مایع حاصل شده از فرآیند میعان نمی‌تواند سطح را خیس و تشکیل فیلم سیال دهد. در این حالت فرآیند میعان قطراتی ایجاد می‌کند که به سطح می‌چسبند. از دیدگاه انرژی، میعان قطره‌ای از میعان فیلم به صرفه‌تر است و نرخ انتقال حرارت در این میعان یک مقیاس بیشتر از میعان فیلم است [2,1]. میعان فیلم رایج‌ترین حالت میعان در اکثر سیستم‌ها است. مایع حاصل از فرآیند میعان که در ابتدا بصورت قطراتی بر روی سطح هستند، بهم متصل می‌شوند و سطح را خیس می‌کنند. سپس فیلم سیال بر اثر نیروی جاذبه جریان می‌یابد. این نوع از میعان در اکثر فرآیندهای صنعتی روی می‌دهد. انتقال جرم در جریان فیلم میعان در صنایع شیمیایی و در فرآیندها به دلیل ایجاد و کنترل آسان فیلم سیال و نسبت بسیار بالای سطح به حجم دارای اهمیت است [1].

در جریان داخلی میعان در سیستم‌های تهویه مطبوع و در یخچال‌ها اتفاق می‌افتد. میعان در جریان داخلی منجر به رژیم‌های پیچیده‌ی دوفازی می‌گردد. رژیم‌های جریان دو فازی در فرآیند میعان متفاوت از رژیم‌های رایج دوفازی است. انتقال حرارت (نرخ میعان) و هیدرودینامیک جریان بهم وابسته‌اند و شدیداً به رژیم جریان حساس است. همچنین رژیم جریان تابعی از شکل کانال، جهت جریان نسبت به جاذبه و غیره است [4,3]. روابط آزمایشگاهی برای میعان جریان بخار خالص در برخی از هندسه‌های ساده همچون کانال دایره‌ای افقی وجود دارد [3]. میعان در مینی کانال‌ها در مبدل‌های حرارتی در سیستم‌های تهویه مطبوع خانگی و ماشین‌ها رخ می‌دهد. در میکروکانال‌ها [5] میعان بخشی از یک چرخه‌ی انتقال حرارت فشرده است که با جوشش کار می‌کند و برای خنک‌سازی میکرو ابزارها بکار می‌رود. پیش‌بینی انتقال حرارت و افت فشار در جریان میعان هم اکنون از طریق روابط نیمه تجربی صورت می‌گیرد که تنها برای سیالی مشخص و تحت شرایط خاص عمل‌کرد دستگاه صادق است [6] یا روابط کلی از طریق هم افزایی داده‌های پایگاه‌های مختلف اطلاعاتی برای سیال‌های مختلف و شرایط مختلف شامل هندسه‌های مختلف استخراج شده است. با این وجود نیاز به گسترش کدهای دوفازی برای درک مکانیزم میعان وجود دارد. مهم‌ترین مزیت شبیه‌سازی عددی پس از اعتبارسنجی نتایج آن با روابط تجربی موجود، امکان اعمال آن برای هندسه‌های پیچیده و رژیم‌های مختلف جریان است.

روش‌های مدل‌سازی عددی جریان دوفازی در 3 دهه‌ی اخیر گسترش زیادی داشته‌اند [7]. روش‌های تعقیب سطح همچون روش حجم سیال [8]، روش سطوح همتراز [9] و روش تعقیب جبهه [10] برای مدل‌سازی جریان دو فازی بارها مورد استفاده قرار گرفتند. از این روش‌ها به عنوان روش مستقیم مدل‌سازی جریان دوفازی نام برده می‌شود [11]. روش حجم سیال به دلیل پیاده‌سازی آسان‌تر و نیز حفظ بهتر بقای جرم مورد توجه گسترده قرار گرفته است و شیوه‌های مختلف حجم سیال گسترش یافته است [12] که آن‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی روش حجم سیال تابع رنگ [13] و روش حجم سیال با بازسازی سطح [8] نام برد. در روش حجم سیال از تابع پله برای تفکیک دوفاز از هم استفاده می‌شود. روش حجم سیال تابع رنگ از روش‌های تفاضلی مرتبه بالا برای حفظ کران‌داری و فشرده‌گی فصل مشترک استفاده می‌شود [14]. از مزایای این شیوه می‌توان به امکان اعمال این روش به شبکه‌های بی‌ساختار، کاهش زمان محاسبات به دلیل حذف پروسه بازسازی فصل مشترک و شبیه‌سازی جریان تغییر فاز بدون نیاز به فصل مشترک اولیه اشاره کرد. از معایب این روش عدم دستیابی به فصل مشترک تیز می‌توان اشاره کرد.

2- بروز رسانی متغیرهای فیزیکی (رابطه‌ی 2)

3- حل معادله‌ی منتم و محاسبه‌ی مقدار اولیه‌ی سرعت (رابطه‌ی 7)

4- حل معادله‌ی انرژی

به دلیل پایداری حل عددی از رابطه‌ی (13) برای حل معادله‌ی انرژی استفاده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla \cdot (\rho \bar{U} T) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{C_p} \nabla T \right) - \dot{m}''' \frac{h_{LG}}{C_p} \quad (13)$$

رابطه‌ی (13) و رابطه‌ی (9) جز در فصل مشترک کاملاً با هم معادل‌اند.

5- حل الگوریتم پی‌زو برای محاسبه‌ی فشار و تصحیح سرعت

6- افزایش گام زمانی و رفتن به مرحله‌ی 1

در اینجا از گام زمانی تطبیقی استفاده می‌شود. در این مدل‌سازی‌ها عدد کورانت به صورت رابطه (14) محاسبه می‌شود و عدد کورانت 0/5 برای محاسبات انتخاب شده است.

$$Co = \frac{\sum_f \bar{U}_f \cdot \bar{S}_f}{2V} \times \Delta t \quad (14)$$

که زیر نویس  $f$  بیانگر مرکز صفحه است و  $S$  اندازه‌ی سطح سلول و  $V$  بیانگر حجم سلول است.

### 3- اعتبارسنجی

#### 3-1- مسئله استغان

مسئله استغان، ابتدا برای محاسبه‌ی حرکت فصل مشترک در فرآیند چگالش معرفی شد [30]، سپس این مسئله به عنوان مثال نمونه برای اعتبارسنجی کدهای جوشش بارها بکار گرفته شد [15, 18, 31]. شماتیک مسئله‌ی استغان برای پدیده‌ی میعان در شکل 1 نشان داده شده است. در این حالت لایه‌ی نازکی از مایع، سطح مادون سرد را از بخار اشباع جدا می‌کند. این لایه‌ی مایع، حرارت را از بخار اشباع می‌گیرد و به دیوار مادون سرد می‌دهد بدین ترتیب فصل مشترک از دیواره دور می‌شود.

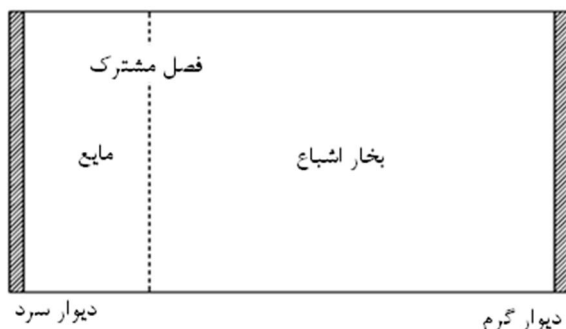
حل تحلیلی مسئله بصورت روابط (15) و (16) است:

$$x(t) = 2\eta \sqrt{d_L t} \quad (15)$$

$$T(x, t) = T_w + \left( \frac{T_{sat} - T_w}{\text{erf}(\eta)} \right) \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{d_L t}}\right) \quad (16)$$

که  $x(t)$  موقعیت فصل مشترک از دیواره‌ی سرد و  $d_L = k_L / \rho_L C_L$  ضریب پخش حرارتی مایع است و  $\eta$  از رابطه‌ی (17) محاسبه می‌شود. که  $h_{LG}$  گرمای نهان میعان و  $C_{pL}$  ظرفیت ویژه‌ی گرمایی مایع است.

$$\eta \exp(\eta^2) \text{erf}(\eta) = \frac{C_{pL}(T_w - T_{sat})}{\sqrt{\pi} h_{LG}} \quad (17)$$



شکل 1 شرایط مسئله‌ی استغان

تغییر فاز می‌توان  $\nabla \cdot \bar{U}$  را از معادله‌ی پیوستگی محلی بصورت رابطه (5) محاسبه کرد:

$$\nabla \cdot \bar{U} = \dot{m}''' \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \quad (5)$$

با جاگذاری رابطه‌ی (5) در رابطه‌ی (4)، رابطه (6) را خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla \alpha_L = -\dot{m}''' \left[ \frac{1}{\rho_L} - \alpha_L \left( \frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_G} \right) \right] \quad (6)$$

معادلات ناوبر استوکس بصورت رابطه (7) است.

$$\frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) - \nabla \cdot (\mu(\nabla \bar{U}^T + \nabla \bar{U})) = -\nabla p + \sigma \kappa n \delta(x - x_s) \quad (7)$$

ترم آخر بیانگر اثر کشش سطحی بین دوفاز است که از مدل CSF استفاده می‌شود [23] و انحنای سطح از رابطه‌ی (8) محاسبه می‌شود.

$$\kappa = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla \alpha_L}{|\nabla \alpha_L|} \right) \quad (8)$$

معادله‌ی انرژی بصورت رابطه (9) تعریف می‌شود. ترم آخر به دلیل تغییر فاز اضافه شده است و  $h_{LG}$  گرمای نهان میعان است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p \bar{U} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \dot{m}''' h_{LG} \quad (9)$$

برای بستن معادلات نیاز به مدل مناسب برای انتقال جرم است. که در اینجا از مدل لی [24] استفاده شده است. طبق رابطه (10) داریم:

$$\dot{m}''' = r(1 - \alpha_L) \rho_G \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (10)$$

که  $r$  ضریب شدت انتقال جرم است و مقدار آن از 0/1 تا 100 [26, 25] گزارش شده است. این مدل انتقال جرم نیازی به فصل مشترک اولیه برای پیش بینی تغییر فاز ندارد و هرچا دما از دمای اشباع کمتر باشد، میعان روی می‌دهد.

#### 2-2- الگوریتم و روش گسسته‌سازی

نرم افزار این فوم یک نرم افزار متن باز دینامیک سیالات محاسباتی است. این نرم افزار از روش حجم محدود و از شبکه‌ی ناجابجا استفاده می‌کند به عبارت دیگر در این نرم افزار تمامی متغیرها اعم از سرعت و فشار در مرکز سلول‌ها تعریف می‌شوند و از الگوریتم پی‌زو برای حل معادلات سرعت و فشار استفاده می‌شود و مدل رهی-چپو برای جلوگیری از مشکل شطرنجی شدن میدان فشار استفاده می‌شود. الگوریتم حل بصورت زیر است:

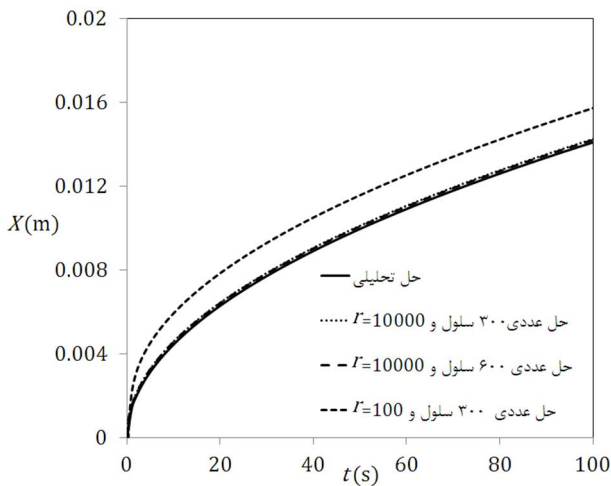
1- حل معادله‌ی انتقال حرکت فصل مشترک

در اینجا بجای رابطه‌ی (6) از رابطه‌ی (11) برای انتقال فصل مشترک استفاده می‌شود. ترم اضافی  $\nabla \cdot (\alpha_L(1.0 - \alpha_L)\bar{U}_c)$  برای حفظ کران‌داری و جلوگیری از انتشار فصل مشترک به رابطه‌ی (6) اضافه شده است و تنها در فصل مشترک دارای مقدار است. طبق رابطه (11) داریم:

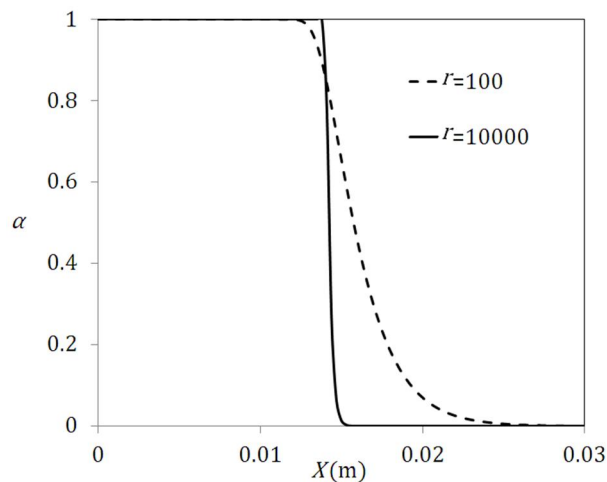
$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla \alpha_L + \nabla \cdot (\alpha_L(1 - \alpha_L)\bar{U}_c) = -\dot{m}''' \left[ \frac{1}{\rho_L} - \alpha_L \left( \frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_G} \right) \right] \quad (11)$$

$U_c$  بصورت زیر تعریف می‌شود که در این رابطه  $C_\alpha$  ضریب فشردگی است و مقدار آن بین 1-4 است [28, 29]. طبق رابطه (12) داریم:

$$\bar{U}_c = \min\{C_\alpha |\bar{U}|, \max(|\bar{U}|)\} \frac{\nabla \alpha_L}{|\nabla \alpha_L|} \quad (12)$$



شکل 2 تأثیر ضریب شدت انتقال جرم  $r$  بر روی جریان تغییر فاز در مسئله‌ی استفان



شکل 3 توزیع حجم سیال در زمان  $t=100\text{sec}$  در مسئله‌ی استفان، تیز شدن فصل مشترک با افزایش ضریب شدت انتقال جرم

جدول 2 پارامترهای فیزیکی برای جریان فیلم میعان بر روی صفحه قائم

واحد	مایع	بخار
چگالی ( $\rho$ )	10	1
ویسکوزیته ( $\nu$ )	$10^{-5}$	$10^{-5}$
گرمای ویژه ( $C_p$ )	1000	1000 و 100
هدایت حرارتی ( $k$ )	1	0/1

برای این مسئله با فرضیات زیر حل تحلیلی وجود دارد [1]:

- ✓ جریان فیلم میعان آرام و پایا باشد.
- ✓ دمای دیواره ثابت باشد.
- ✓ بخار اشباع و ساکن است.
- ✓ در فصل مشترک جریان برشی صفر است.
- ✓ اینرسی فیلم مایع ناچیز است.
- ✓ دمای فیلم سیال بصورت خطی از دیواره تغییر می‌کند.

ضخامت فیلم سیال در حل تحلیلی از رابطه‌ی (18) محاسبه می‌شود:

$$\delta_F = \left[ \frac{4\mu_L k_L (T_{sat} - T_w) Z}{g h_{LG} \rho_L (\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/4} \quad (18)$$

عدد نوسلت در حل تحلیلی برای جریان فیلم آرام از رابطه‌ی (19) محاسبه می‌شود. این رابطه حدود 50% خطا دارد [1].

حلگر نوشته شده، حلگری سه بعدی است برای حل مسائل یک بعدی در نرم افزار این فوم از شرط مرزی خاصی با نام امپتی<sup>1</sup> استفاده می‌شود. بدین ترتیب جریان در راستای عمود بر این صفحات حل نمی‌گردد. در این مسئله صفحات بالا، پایین، جلو و عقب از این شرط مرزی استفاده شده است. برای فشار  $p$  و حجم سیال  $\alpha_L$  در دیواره‌ها از شرط مرزی گرادیان صفر و برای سرعت شرط مرزی عدم لغزش استفاده شده است. پارامترهای فیزیکی این مدل‌سازی در جدول 1 آمده است. در مسئله‌ی استفان فصل مشترک در دمای اشباع قرار دارد، بنابراین ضریب هدایت بالاتری به بخار اختصاص داده شده است تا هرگونه انحراف دمای فصل مشترک از دمای اشباع را سریع مستهلک کند.

در شکل 2 نتایج عددی با حل تحلیلی مقایسه شده است. شبیه‌سازی بر روی دو شبکه درشت و ریز به ترتیب با 300 و 600 سلول شش وجهی انجام گرفته است. نتایج عددی بر روی شبکه‌ی درشت با 300 سلول مستقل از شبکه است. از آنجا که در روش حجم سیال تابع رنگ، فصل مشترک بازسازی نمی‌شود، کانتر هم سطح  $\alpha_1 = 0.5$  به عنوان فصل مشترک در نظر گرفته می‌شود. نتایج تابع ضریب شدت انتقال جرم  $r$  است و باید مقدار مناسب به  $r$  اختصاص یابد. در مقادیر پایین ضریب شدت انتقال جرم  $r = 0.1, 1$  سطح به حدی پخشی است که نتایج عددی کاملاً غیرواقعی به دست می‌آید. با افزایش مقدار  $r$ ، از پخشندگی سطح کاسته می‌شود و حل به حل تحلیلی نزدیک‌تر می‌گردد. شکل 3 توزیع حجم سیال را نشان می‌دهد. پخشندگی فصل مشترک در فاز گاز بیشتر از فاز مایع است و با افزایش  $r$  ناحیه‌ی فصل مشترک فشرده‌تر می‌شود و از پخشندگی فصل مشترک مخصوصاً در فاز گاز کاسته می‌شود.

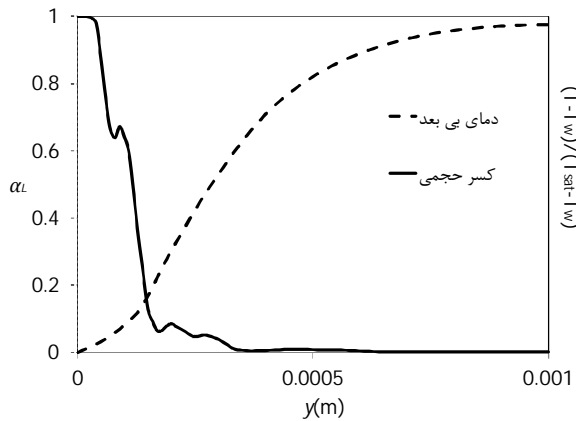
### 2-3- مسئله‌ی جریان آرام فیلم مایع بر روی سطح قائم

در این مسئله جریان دائم میعان طبیعی (و نه اجباری) آرام بر روی سطح صاف قائم هم‌دمای شبیه‌سازی شده است. شماتیک این مسئله در شکل 4 الف نشان داده شده است و پارامترهای فیزیکی مدل‌سازی مطابق با جدول 2 داده شده است. ابعاد صفحه  $1/2 \times 0/2 \text{ cm}^2$  است و از 36000 سلول شش وجهی برای این مدل‌سازی استفاده شده است. شرط مرزی دیواره از نوع عدم لغزش دیواره از دو بخش (1) ادیاباتیکی و (2) دما ثابت تشکیل شده است. دمای دیواره 10 درجه از دمای اشباع پایین‌تر است و گرادیان فشار و کسر حجمی بر روی دیواره صفر است. فشار کل در مایقی مرزها فشار اتمسفر است و مقدار سرعت از روی فشار محاسبه می‌شود. کل میدان در لحظه‌ی صفر با بخار اشباع پر شده است. با انتقال حرارت از بخار به دیواره، بخار میعان می‌شود، در صورتی که مقدار کشش سطحی کوچک باشد، دیگر قطرات میعان شکل نمی‌گیرد و جریان فیلم میعان راه می‌افتد. در این شبیه‌سازی مقدار کشش سطحی  $1 \mu\text{N/m}$  در نظر گرفته شده است. با افزایش سرعت فیلم سیال، رژیم جریان به ترتیب از آرام به موجی سینوسی، موجی هارمونیک و توربولانس تغییر می‌کند. جریان فیلم میعان برای  $Re_F < 33$  آرام است [1].

جدول 1 پارامترهای فیزیکی برای مسئله‌ی استفان

واحد	مایع	بخار
چگالی ( $\rho$ )	1	1
ویسکوزیته ( $\nu$ )	$10^{-5}$	$10^{-5}$
گرمای ویژه ( $C_p$ )	1000	1000
هدایت حرارتی ( $k$ )	0/1	1

1- empty



شکل 7 توزیع دمای بی بعد و کسر حجمی در مقطع (z = 0/001)

$$Nu_{F,z} = \left[ \frac{gh_{LG}(\rho_L - \rho_g)Z^3}{4\mu_L k_L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4} \quad (19)$$

مقدار عددی نوسلت از رابطه‌ی (20) محاسبه می‌شود.

$$Nu_{F,z} = \frac{\partial T}{\partial x} \frac{z}{T_w - T_{sat}} \quad (20)$$

ضخامت فیلم سیال با حل تحلیلی در شکل 5 مقایسه شده است. حل عددی مقدار کمتری برای ضخامت فیلم سیال پیش‌بینی می‌کند، هم‌چنین در شکل 6 مقدار نوسلت از حل عددی با حل تحلیلی مقایسه شده است. انحراف حل عددی از حل تحلیلی به دلیل فرضیاتی است که در استخراج حل تحلیلی لحاظ شده است. مثلاً در شکل 7 دیده می‌شود، دما در داخل فیلم مایع ( $\alpha_L > 0.5$ ) خطی تغییر نمی‌کند و غیرخطی است و یا در شکل 4 ج و یا شکل 5 بر روی فصل مشترک موج‌هایی دیده می‌شود که اثر این نوسانات فصل مشترک بر روی مقدار نوسلت لحاظ نشده است، باید توجه شود که با وجود نوسانات فصل مشترک، فیلم میعان همچنان در محدوده‌ی جریان آرام قرار دارد.

مقدار رینولدز از رابطه‌ی (21) محاسبه می‌شود. حداکثر رینولدز فیلم جریان  $Re_F$  در این مطالعه در حدود 20 است.

$$Re_F = \frac{4}{v_L} \int_0^{\delta_F} u dy \quad (21)$$

برای بررسی بیشتر، نتایج عددی با رابطه‌ی تجربی (22) مقایسه شده است این رابطه برای جریان آرام میعان تحت تأثیر نیروی گرانش، جایی که نیروی برشی ناچیز است و جریان میعان اجباری نیست و برای مردهایی همچون CFC11، CFC123 و HCFC123 پیشنهاد شده است [1].

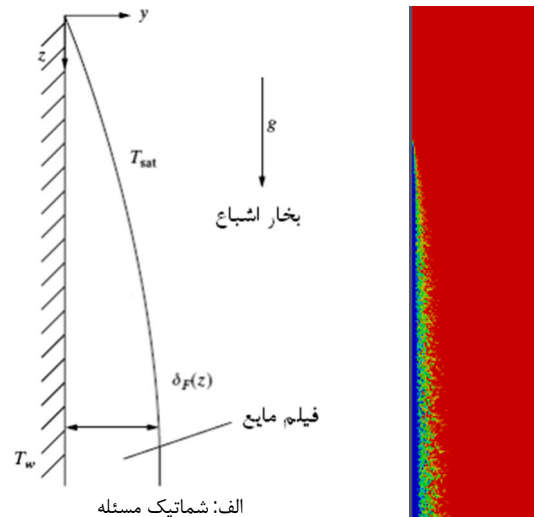
$$Nu_{F,z} = 0.707 \times \left( \frac{Gr_z Pr_L}{Ja} \right)^{0.25} \quad (22)$$

که  $Gr_z$ ،  $Pr_L$  و  $Ja$  به ترتیب اعداد بی‌بعد گرافش، پراتل و ژاکوب هستند و از رابطه‌های (23-25) محاسبه می‌شوند.

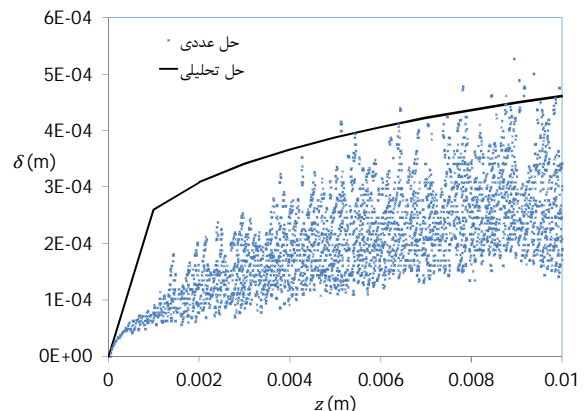
$$Gr_z = \left( \frac{gz^3}{v_L^2} \right) \left( \frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_L} \right) \quad (23)$$

$$Pr_L = \frac{c_{pL} \mu_L}{k_L} \quad (24)$$

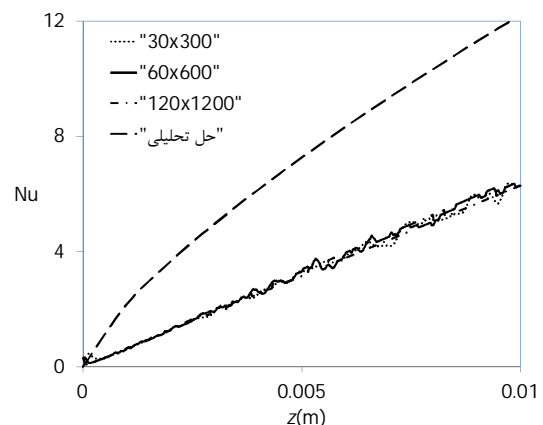
$$Ja = \frac{c_{pL} (T_{sat} - T_w)}{h_{LG}} \quad (25)$$



شکل 4 جریان فیلم میعان بر روی سطح قائم  
ب: نتایج مدل‌سازی (توزیع حجم کسری) ج: بزرگنمایی نتایج قسمت ب



شکل 5 ضخامت فیلم میعان در مسئله‌ی جریان فیلم میعان در صفحه قائم از حل عددی و حل تحلیلی



شکل 6 مقایسه‌ی نوسلت از حل عددی (Cp = 1000) با رابطه‌ی تحلیلی

علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\sigma$	کشش سطحی ( $\text{kgs}^{-2}$ )
$\kappa$	انحنای سطح ( $\text{m}^{-1}$ )
$\delta$	ضخامت فیلم میعان (m)

زیرنویس‌ها

f	مرکز صفحه
F	فیلم میعان
G	بخار
L	مایع
sat	اشباع
w	دیواره

6- مراجع

[1] S. M. Ghiaasiaan, Two-Phase Flow, Boiling and Condensation in conventional and miniature system Cambridge University Press, 2008.

[2] Z. Yang, Y.-Y. Duan, Z. Zhu, W. Gong, X.-C. Ma, Y. Chen, D. Wu, Flow and heat transfer enhancement in condensing water drops in steam flows, *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 7, pp. 074101, 2014.

[3] J. R. Thome, J. El Hajal, A. Cavallini, Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 18, pp. 3365-3387, 2003.

[4] S. Lips, J. P. Meyer, Two-phase flow in inclined tubes with specific reference to condensation: a review, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 37, No. 8, pp. 845-859, 2011.

[5] H. Wu, P. Cheng, Condensation flow patterns in silicon microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 11, pp. 2186-2197, 2005.

[6] H. Lee, I. Mudawar, M. M. Hasan, Flow condensation in horizontal tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, pp. 31-45, 2013.

[7] M. Worner, Numerical modeling of multiphase flow in microfluidics and micro process engineering: a review of methods and applications, *Microfluid NanoFluid*, Vol. 12, pp. 841-886, 2012.

[8] L. D. Youngs, Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion, in *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, in: K. W. Morton, M. J. Baines, Eds., pp. 273-285, New York: Academic Press 1982.

[9] M. Sussman, P. Smereka, S. Osher, A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow, *J. Comput. Phys.*, Vol. 114, pp. 146-159, 1995.

[10] S. unverdi, G. Tryggvason, A front-tracking method for viscous, incompressible, multifluid flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, No. 1, pp. 25-37, 1992

[11] D. Lakehal, M. Meier, M. Fulgosi, Interface tracking towards the direct simulation of heat and mass transfer in multiphase flows, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, pp. 242-257, 2002.

[12] D. J. Benson, Volume of fluid interface reconstruction methods for multi-material problems, *Appl Mech* Vol. 55, No. 2, 2002.

[13] O. ubbink, R. Issa, A method for capturing sharp fluid interface on arbitrary meshes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 153, No. 1, pp. 26050, 1999.

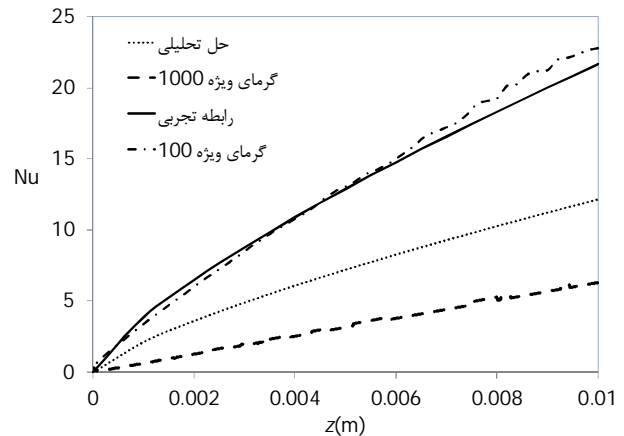
[14] J. Klostermann, K. Schaake, R. Schwarze, Numerical simulation of a single rising bubble by VOF with surface compression, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 71, No. 8, pp. 960-982, 2013.

[15] S. W. J. Welch, J. Wilson, A Volume of Fluid Based Method for Fluid Flows with Phase Change, *J. Comput. Phys.*, Vol. 160, pp. 662-682 2000.

[16] F. d. r. Gibou, L. Chen, D. Nguyen, S. Banerjee, A level set based sharp interface method for the multiphase incompressible Navier-Stokes equations with phase change, *Computational Physics*, Vol. 222, pp. 536-555, 2007.

[17] D. Juric, G. t. Tryggvason, computations of boiling flows, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 24, pp. 387-410, 1998.

[18] K. Tsujimoto, Y. Kambayashi, T. Shakouchi, T. Ando, Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow with phase change using Cahn-Hilliard equation, *Turbulence, Heat and Mass Transfer* Vol. 6, 2009.



شکل 8 مقایسه نوسلت از حل عددی به ازای گرمای ویژه‌های متفاوت بخار با حل تحلیلی (19) و رابطه‌ی تجربی (22)

همان طور که در رابطه تحلیلی (19) و رابطه‌ی تجربی (22) دیده می‌شود، عدد نوسلت به مقدار گرمای ویژه‌ی بخار اشباع بستگی ندارد، اما بررسی‌های عددی این مطالعه در شکل 8 نشان می‌دهد که نوسلت وابسته به گرمای ویژه‌ی بخار است. شکل رژیم جریان (نوسانات فصل مشترک) و ضخامت فیلم سیال با تغییر اندازه‌ی گرمای ویژه‌ی بخار تغییر می‌کند. بنابراین رابطه‌ی تجربی و تحلیلی نیاز به تصحیح دارند و نیاز است تا اثرات گرمای ویژه‌ی بخار سیال در آن لحاظ شود.

4- جمع بندی

در این مطالعه، نحوه‌ی شبیه‌سازی جریان میعان به کمک روش حجم سیال تابع رنگ در نرم افزار اوپن فوم ارائه شده است. کد نوشته شده با دو مسئله‌ی استفان و مسئله فیلم آرام میعان مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی فیلم آرام میعان بر روی صفحه‌ی قائم مشخص شد که مقدار نوسلت وابسته به گرمای ویژه‌ی فاز بخار است که در رابطه‌ی تجربی و رابطه‌ی تحلیلی لحاظ نشده است. در کارهای آینده توصیه می‌شود تا مطالعه پارامتری بر روی جریان میعان فیلم سیال صورت بپذیرد تا تأثیر هر یک از پارامترها بر روی ضخامت فیلم سیال و مقدار نوسلت مشخص شود و رابطه‌ی نوسلت براساس آن اصلاح گردد.

5- فهرست علائم

$C_p$	گرمای ویژه ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$d$	ضریب پخش حرارتی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$g$	گرانش ( $\text{ms}^{-2}$ )
Gr	گراشف
$h_{LG}$	گرمای نهان ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ )
Ja	ژاکوب
$k$	هدایت حرارتی ( $\text{kgms}^{-3}\text{K}^{-1}$ )
Nu	نوسلت
$\rho$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
Pr	پرانتل
$r$	شدت انتقال جرم ( $\text{s}^{-1}$ )
$T$	دما (K)
$U$	سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$V$	حجم ( $\text{m}^3$ )

- [25] A. Alizadehdakheel, M. Rahimi, A. A. Alsairafi, CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosyphon *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol. 37, pp. 312–318, 2010.
- [26] S. C. K. De Schepper, G. J. Heynderick, G. B. Marin, CFD modeling of all gas–liquid and vapor–liquid flow regimes predicted by the Baker chart, *Chem. Eng. J* Vol. 138, pp. 349–357, 2008.
- [27] Z. Yang, X. F. Peng, P. Ye, Numerical and experimental investigation of two phase flow during boiling in a coiled tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 1003–1016, 2008
- [28] N. Samkhaniani, A. Gharehbaghi, Z. Ahmadi, Numerical simulation of reaction injection molding with polyurethane foam, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 49, No. 5, 405-421, 2013.
- [29] E. Berberović, N. P. v. Hinsberg, S. Jakirlić, I. V. Roisman, C. Tropea, Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution, *The American Physical Society*, Vol. 79, No. 3, pp. 03036, 2009
- [30] V. Alexiades, *Mathematical modeling of melting and freezing processes*: CRC Press, 1992.
- [31] S. Hardt, F. Wondra, Evaporation model for interfacial flows based on a continuum-field representation of the source terms, *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, pp. 5871-5895, 2008
- [19] H. Ganapathy, A. Shoostari, K. Choo, S. Dessiatoun, M. Alshehhi, M. Ohadi, Volume of fluid-based numerical modeling of condensation heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 62-72, 2013.
- [20] S.-S. Jeon, S.-J. Kim, G.-C. Park, Numerical study of condensing bubble in subcooled boiling flow using volume of fluid model, *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, No. 23, pp. 5899-5909, 2011.
- [21] Z. Liu, B. Sunden, J. Yuan, Numerical Modelling of Condensation of Multiple Bubbles in Subcooled Flow Boiling With VOF Method, in *Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers*, pp. V001T03A014-V001T03A014.
- [22] H. G. Weller, G. Taboral, H. Jasak, C. Fureby, A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, *Comput. Phys.*, Vol. 12, No. 6, pp. 620-632, 1998.
- [23] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, A Continuum Method for Modeling Surface Tension, *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354, 1992.
- [24] W. Lee, Pressure iteration scheme for two-phase flow modeling, In " *Multiphase Transport: Fundamentals, Reactor Safety, Applications*". pp. 407-432, 1980.