

شبیه سازی عددی پدیده انجماد آب در لوله‌ها

محمد حسن جوارشکیان^۱ و امیر کریمی^۲

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تبریز

چکیده

در این پژوهش، یک فرآیند عددی برای شبیه سازی جریان آب در حال انجماد درون یک لوله توسعه داده شده است. در این فرآیند از روش آنتالپی-تخلخل برای پیش بینی مرز مشترک مایع/جامد، استفاده شده که توانایی تشخیص محل انجماد در هر لحظه را دارد. روش به کار رفته یک روش ضمنی است که در آن فشار به عنوان متغیر اصلی می باشد. در روال فوق معادلات ناویر-استوکس با استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه جابجا شده برای محاسبه متغیرها حل شده است. ضمن بررسی خواص فازهای مایع و جامد و تأثیر آنها بر فرآیند انجماد، زمان انجماد و طول سرمایش لازم برای گرفتگی جریان برحسب فاکتورهای مؤثر مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای مؤثر شامل قطر لوله، سرعت متوسط سیال، دمای دیواره و دمای اولیه سیال است. به دلیل تعدد پارامترهای مؤثر، علاوه بر استخراج نتایج در حالت بی بعد، رابطه ای بی بعد برای ارتباط فاکتورهای مختلف به دست آمده است. به منظور بررسی اعتبار شبیه سازی، مقایسه ای بین نتایج بدست آمده و نتایج تجربی موجود در حالتی خاص انجام شده که همخوانی مطلوبی بین آنها دیده می شود. نتایج نهایی به دست آمده نیز همخوانی خوبی با نتایج تجربی معتبر موجود دارد.

واژه‌های کلیدی: انجماد آب، آنتالپی تخلخل، زمان انجماد، لوله ها

Numerical Simulation of Water Solidification in Pipes

M.H. Djavarehshkian and A. Karimi

Mech. Eng. Group, School of Eng., Tabriz Univ.

ABSTRACT

In this research, a finite volume numerical approach was developed to simulate physical details of convection-dominated water solidification in pipes. Our approach was based on the enthalpy-porosity method, which is used to track the motion of liquid-solid fronts and to obtain freezing length and time of solidifications. The Navier-Stokes equations were solved on a staggered grid, using a pressure-based implicit procedure. The results, which were validated against experimental data, show a remarkable quality of our simulation.

Key Words: Water Solidification, Enthalpy-Porosity, Freezing Time, Pipes

۱- دانشیار

۲- کارشناس ارشد (نویسنده پاسخگو): rima_karimi@yahoo.com

۱- مقدمه

بر عوامل پخش، متأثر از جمله های جابجایی نیز می‌شوند، کائو^{۱۳} و همکاران [۸] تأثیر جابجایی و تغییر فاز در مسائل ذوب و انجماد را بررسی کردند.

در ادامه بررسی فرآیندهای ذوب و انجماد تحقیقات زیادی با استفاده از روش های عددی و تجربی صورت گرفته که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. تأثیر جابجایی آزاد بر انجماد سیال آرام درون لوله توسط هانگ^{۱۴} و همکاران (۹) و همچنین توسط کری^{۱۵} و همکاران [۱۰] به صورت تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. محققین مذکور محدوده دمای ورودی که امکان انجماد کامل سیال وجود دارد را بررسی نمودند. تشریح مفاهیم انجماد در سال ۲۰۰۲ توسط آکیورت^{۱۶} و همکاران [۱۱] با تأکید ویژه بر ناحیه تغییر فاز خمیری^{۱۷} صورت گرفت. کندا^{۱۸} و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۴ با استفاده از یک نرم افزار تجاری مسائل انجماد در لوله‌های با قطر میلیمتری را مورد بررسی قرار دادند. در اکثر تحقیقات انجام شده برای حل مسأله انجماد، اولاً تنها، فاکتور خاصی مورد مطالعه قرار گرفته است و به زمان لازم برای انجماد کامل سیال کمتر پرداخته شده است، دوم اینکه در خیلی از پژوهش های انجام شده خواص فازهای مایع و جامد سیال در فرآیند انجماد ثابت فرض شده است و در نهایت در اکثر مطالعات صورت گرفته، نتایج به صورت نموداری ارائه شده است.

هدف از این تحقیق توسعه یک نرم افزار جهت شبیه سازی جریان سیال در حال انجماد درون لوله با استفاده از روش روش آنتالپی- تخلخل و بررسی و مطالعه مواردی است که تاکنون کمتر به آنها اشاره شده است. ۱- با توجه به اینکه افزایش زمان انجماد باعث مصرف بیشتر ماده سرماساز، و به تبع آن بالا رفتن هزینه را بهمراه دارد، پس محاسبه زمان انجماد و طول سرمایش لازم جهت گرفتگی بر حسب پارامترهای موثر مورد بررسی قرار گرفته است. ۲- از طرفی با توجه به اینکه، تغییرات خواص فیزیکی فاز های مایع و جامد سیال با دما می‌تواند تاثیر چشمگیری را بر روی پارامترهای بررسی شده به همراه داشته باشد، تاثیر ثابت و

فرآیندهای ذوب و انجماد در بسیاری از زمینه‌ها از جمله سرمایش غذا، ساخت شیشه و مواد بلوری، فرآوری فلزات، ذوب و ریخته‌گری آلیاژها در قالب ها و همچنین تغییر فاز مواد در سیستم های نگهداری که از پارافین‌ها، نمک ها یا اسیدهای چرب استفاده می‌شود، به دلیل گرمای نهان آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۱]. در این فرآیندها، ماده دارای تغییر فاز خواهد بود. بنابراین، در طول فرآیند مرز جدا کننده دو فاز مختلف، پیشرفت کرده و در حال حرکت است. خواص انتقالی در نتیجه اختلاف کلی نرخ-هایی از انتقال انرژی، جرم و ممنتوم از یک فاز به فاز دیگر بطور چشمگیری بین فازها تغییر می‌کنند. در این مسائل موقعیت مرز متحرک نمی‌تواند به صورت دقیق تشخیص داده شود، اما باید به عنوان عامل مهم تشکیل دهنده در حل تعیین شود [۲].

روش های مختلفی برای شبیه سازی مسائل ذوب و انجماد وجود دارند که از جمله می‌توان به روش های شبکه ثابت شده^۱، شبکه متغیر^۲، ظرفیت ظاهری^۳، ظرفیت مؤثر^۴، چشمه مبنا^۵، تابع جریان گردابی^۶، متغیر اولیه^۷ و روش آنتالپی^۸ اشاره نمود [۳].

در این تحقیق با تلفیق دو روش شبکه ثابت و آنتالپی که روش آنتالپی - تخلخل نامیده می‌شود، مسأله انجماد در لوله ها شبیه سازی شده است. نظریه آنتالپی ابتدا توسط اریس^۹ و همکاران [۴]، به منظور جلوگیری از ایجاد جمله های غیرخطی در مسائل رسانش ارائه شد. بسط این روش توسط الینیک^{۱۰} [۵] و همچنین اتهی^{۱۱} [۶] انجام و فرمول های دقیقی برای حل مسائل ذوب و انجماد ارائه گردید. به منظور حل مسائل یک بعدی انجماد، وولر^{۱۲} و همکاران [۷]، دقیق ترین جواب ها را از روند فوق به دست آوردند. با توجه به اینکه فرآیندهای تغییر فاز علاوه

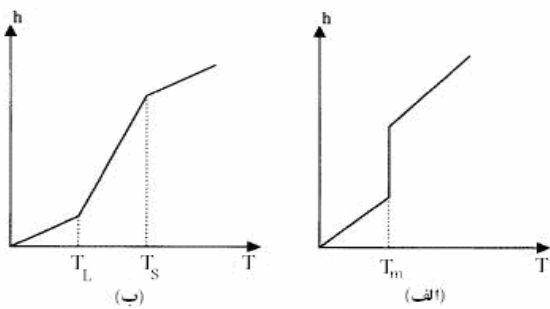
- 1- Fixed Grid
- 2 - Variable Grid
- 3 - capacity Apparent
- 4-Effective Capacity
- 5- Source Based
- 6 - Stream Function Vorticity
- 7 - Primitive Variable
- 8- Enthalpy
- 9 - Eyres
- 10 -Oleinik
- 11 - Atthey
- 12- Voller

- 13 - Cao
- 14 - Hwang
- 15 - Keary
- 16- Akyurt
- 17 - Mushy Zone
- 18 - Conda

به وضوح از هم جدا نیستند، در هر سلول از درصد حجمی مایع (f) که مبین نسبت حجم مایع به کل حجم سلول محاسباتی است، استفاده می‌شود. ناحیه‌ای که مقدار درصد مایع بین صفر و یک بوده و دمای آن محدوده‌ای بین یکی از فازهای مایع یا جامد را دارد، ناحیه خمیری^۱ گفته می‌شود. مقادیر مربوط به درصد حجمی مایع برای هر سلول را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [۱۴]:

$$f = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ (T - T_s) / \Delta T & T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (6)$$

برای مواد غیر همدما، $\Delta T = T_l - T_s$ بوده که T_l و T_s مبین دمای مایع و یخی می‌باشند که تغییر فاز در آن اتفاق می‌افتد. اما در مواد همدما به دلیل متساوی بودن دماهای T_l و T_s با دمای نقطه ذوب، مقدار ΔT برابر صفر می‌شود و ناحیه خمیری شکل نخواهد گرفت (شکل ۱).



شکل ۱: آنتالپی بر حسب تابعی از دما برای (الف) تغییر فاز همدما (ب) تغییر فاز غیر همدما [۱۴].

در نهایت، معادله بقای انرژی برای مسائل انجماد را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho cT + \rho fL) + \nabla \cdot (\rho cTU) = \nabla \cdot (k\nabla T) + \rho gU \quad (7)$$

در معادله (۷) علاوه بر دما، سرعت و درصد حجمی مایع نیز مجهول هستند. درصد حجمی مایع با توجه به روابط موجود در معادله (۶) بر حسب تابعی از دما محاسبه می‌شود و با توجه به در نظر گرفتن سرعت از قدم زمانی قبل، حل عددی برای به دست آوردن توزیع دما امکان پذیر می‌شود.

متغیر بودن خواص فیزیکی فازهای مایع و جامد سیال دما نیز بررسی شده است. ۳- همچنین بمنظور فشرده سازی نتایج، داده های استخراجی بصورت بدون بعد تنظیم، و با استفاده از روش برازش حداقل مربعات رابطه ریاضی بر حسب اعداد بی بعد ارائه شده است. پس از تکمیل روند عددی توسعه داده شده، به منظور بررسی اعتبار نتایج این شبیه سازی، نخست مقایسه ای بین داده های استخراجی با نتایج تجربی موجود در ادبیات فن برای حالت خاص انجام شده است که همخوانی مطلوبی بین آنها دیده می‌شود، روند شبیه سازی را تایید می‌نماید.

۲- معادلات حاکم مبتنی بر روش آنتالپی- تخلخل

در مسائل تغییر فاز، معادلات حاکم مبتنی بر روش آنتالپی- تخلخل شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی هستند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۳]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla U) + \rho g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho g U \quad (3)$$

در این روش، آنتالپی شامل آنتالپی مرجع و تغییرات آنتالپی نسبت به آنتالپی مرجع در نظر گرفته می‌شود، که اگر h_{ref} را به عنوان آنتالپی مرجع و T_{ref} را به عنوان دمای مرجع قرار دهیم، آنتالپی به صورت زیر تعریف خواهد شد [۱۴]:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c dT \quad (4)$$

رابطه بین آنتالپی و دما را می‌توان به صورت جمله ای از گرمای نهان آزاد شده ناشی از تغییر فاز ماده، تعریف کرد. به طور معمول این رابطه برای مسائل تغییر فاز همدما، تابعی پله‌ای و برای مسائل تغییر فاز غیر همدما تابعی خطی فرض می‌شود. شکل ۱ نشان دهنده منحنی‌های آنتالپی- دما برای هر دو مسأله است. پس می‌توان آنتالپی بر حسب دما را به صورت زیر بیان کرد [۱۴]:

$$h = fL + cT \quad (5)$$

در مسائل تغییر فاز به دلیل اینکه مرز مشترک مایع/جامد

ناحیه خمیری به وجود می‌آید، در این تحقیق با استفاده از ایده درصد حجمی مایع، ارتباطی بین خواص مواد در ناحیه خمیری با استفاده از رابطه زیر برقرار شده است:

$$\lambda = \lambda_s + f(\lambda_l - \lambda_s) \quad (15)$$

که، λ را می‌توان چگالی، گرمای ویژه و ضریب رسانش گرمایی در ناحیه خمیری در نظر گرفت. در این تحقیق درحالی که خواص فیزیکی فازهای مایع و جامد آب مستقل از دما در نظر گرفته شده است، از داده های جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی مواد.

فاز جامد	فاز مایع	خواص ثابت فیزیکی آب
۹۱۶	۹۹۸	چگالی $\rho (kg / m^3)$
۲۰۳۷	۴۱۸۲	گرمای ویژه $C_p (j / kg.K^0)$
۲/۲	۰/۶	ضریب رسانش گرمایی $k (W / m.K^0)$
۳۳۵		گرمای نهان $L (kj / kg)$
۲۷۳		نقطه ذوب $T_m (^0K)$
۰/۰۰۱		ویسکوزیته $\mu (kg / m.s)$

۳- الگوریتم حل و شرایط مرزی

به منظور حل عددی پدیده انجماد، جریان آرام تقارن محوری درون لوله استوانه‌ای شبیه‌سازی شده، که مدل فیزیکی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، سطح لوله دارای دمای T_w بوده، که برای فراهم کردن تغییر فاز از نقطه ذوب سیال کمتر است. همچنین دمای اولیه سیال T_0 ، که بالاتر از نقطه انجماد است، به عنوان شرط مرزی و اولیه اعمال می‌شود. توزیع سرعت در ورودی، یکنواخت فرض شده و سرعت ورودی نیز به عنوان شرط اولیه در نظر گرفته شده است. در معادله انرژی، دمای هر سلول تابعی از درصد حجمی مایع آن

در این تحقیق برای بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده بر زمان انجماد و همچنین طول سرمایش مورد نیاز، خواص فیزیکی سیال آب در هر دو فاز مایع و جامد متغیر با دما فرض شده است. در مراجع [۱۷] و [۱۸] تغییرات خواص آب در فازهای مایع و جامد به ازای تعدادی دما بیان شده که در این تحقیق با برازش تابعی بر داده های فوق، معادلات زیر استخراج شده است. تغییرات چگالی فاز مایع آب، زمانی که دما بر حسب سانتیگراد باشد مطابق زیر است:

$$\rho_l = 999.840281 + 0.067326T - 0.008944T^2 + 0.000087T^3 - 0.00000066T^4 \quad (8)$$

و سایر خواص فیزیکی فاز مایع آب که شامل گرمای ویژه، ضریب رسانش گرمایی و گرانیوی بر حسب دمای مطلق طبق روابط استخراجی زیر در محاسبات وارد شده اند:

$$c_l = 8.95866 - 0.040534 T + 0.0001123 T^2 - 0.0000001013 T^3 \quad [kJ / kg.K] \quad (9)$$

$$k_l = 0.812 \times \exp(-0.0005 T) - 0.247 \times \exp(-0.0106 T) \quad [W / m.K] \quad (10)$$

$$\mu = 0.00179 \times \exp \left[6.18 \times 10^7 \left(\frac{1}{T^3} - \frac{1}{(273.15)^3} \right) \right] \quad [N.s / m^2] \quad (11)$$

تغییرات دمایی خواص فیزیکی فاز جامد(یخ) بر حسب دمای مطلق، با استفاده از روش نمایی، برای محدوده دمایی حاکم بر فیزیک مسأله به شکل زیر به دست آمده است:

$$\rho_s = 949.948 \times \exp(-0.000125 T) - 1.86 \times 10^{-13} \times \exp(0.109 T) \quad (12)$$

$$c_s = 7.07 \times T^{1.016} - 0.122 \quad [kJ / kg.^0K] \quad (13)$$

$$k_s = 6.99949.948 \times \exp(-0.00408 \times T) \quad [W / m.^0K] \quad (14)$$

با توجه به اینکه در مواد با تغییر فازهای غیر همدمای

سیال متناسب است، ضریب تناسب آب $\gamma_{water} = 0.696$ است. ضمناً:

$$W_l = \frac{\Gamma}{L} = \frac{L + \gamma c_l (T_0 - T_f)}{L}, \quad (17)$$

که در آن، W_s عدد ژاکوب بوده و رابطه بین گرمای نهان با گرمای انتقالی از فاز جامد را در نظر می‌گیرد که تابعی از دمای دیوار به صورت زیر می‌باشد:

$$W_s = L / c_s (T_f - T_w). \quad (18)$$

همچنین، عدد رینولدز با توجه بر سرعت متوسط جریان محاسبه می‌شود:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}. \quad (19)$$

بنابراین، روابط در فرمول (۱۶) به صورت زیر آورده می‌شود:

$$t^* = C Z^{*a} W_l^b Re^n W_s^m. \quad (20)$$

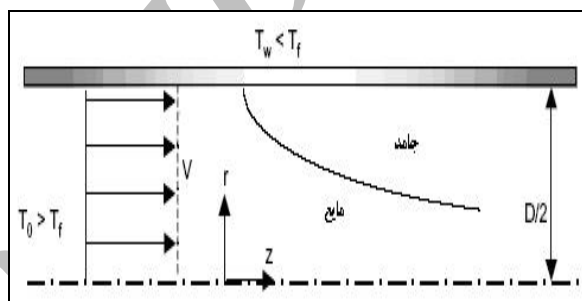
نخست داده های استخراجی از روند عددی مطابق روابط بالا بی بعد شده، سپس با استفاده از روش حداقل مربعات، تابعی بر داده ها مطابق معادله (۲۱) برازش گردیده است.

$$t^* = 0.094595 Z^{*1.371606} W_l^{-3.254362} Re^{0.354471} W_s^{-0.783680} \quad (21)$$

۵- نتایج

شکل ۳ نمایشی از هندسه و شبکه را نشان می‌دهد. شبکه مستقل از حل که در این تحقیق استفاده شده، دارای 150×50 سلول است. در این شبیه سازی تاثیر سرعت متوسط، دمای اولیه سیال، دمای دیواره و تغییر خواص سیال آب بر حسب طول های سرمایهش لازم، برای گرفتگی جریان بر زمان انجماد کامل سیال درون لوله بررسی شده است. در این آنالیز سعی شده است زمان انجماد به ازای تغییرات یکی از پارامترها و ثابت فرض نمودن بقیه مورد ارزیابی قرار گیرد.

سلول است، بنابراین در هر فاز معادلات مربوطه حل می‌شوند. با توجه به فرضیات بالا، کلیه معادلات ذکر شده با استفاده از روش حجم محدود گسسته و توسط الگوریتم سیمپل^۱ و یک روند عددی ضمنی حل شده اند. در روند فوق از روش تفاضل بالادست مرتبه دو^۲ برای محاسبه جمله جابجایی استفاده شده است. معادلات جبری به دست آمده توسط روش TDM^۳ حل شده‌اند. همچنین گام زمانی طوری انتخاب شده که شرط پایداری برآورده شود و زمان توقف برنامه بر مبنای رشد لایه های فاز جامد تا مرکز لوله در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: شماتیکی از مدل فیزیکی.

۴- روابط عددی زمان گرفتگی

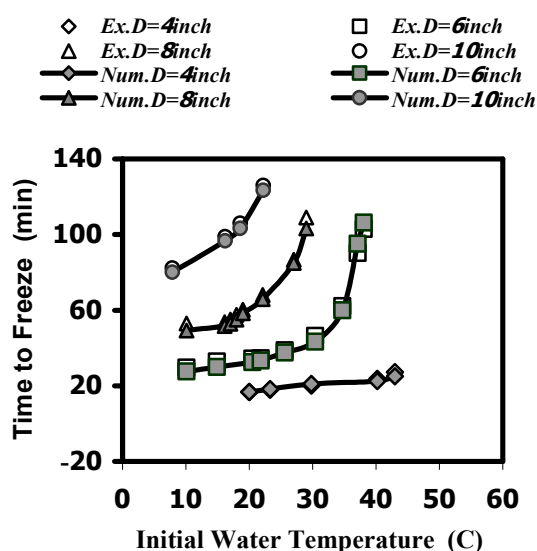
با توجه به اهمیت زمان انجماد کامل سیال درون لوله و همچنین طول سرمایهش لازم برای انجماد جریان، علاوه بر استخراج نتایج در حالت بی بعد، معادله ریاضی برای ارتباط فاکتورهای مختلف با یکدیگر مطابق روند زیر استخراج شده است، که زمان گرفتگی در شکل بی بعد خود (t^*) تابعی از پارامترهای زیر است:

$$t^* = \frac{4(T_s - T_w)k_s}{\rho L D^2} t = f(Z^*, W_l, Re, W_s), \quad (16)$$

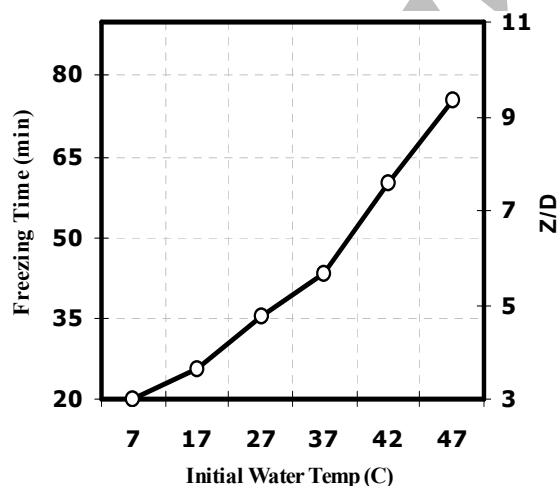
که در آن، $Z^* = \frac{Z}{D}$ طول سرمایهش بی بعد، W_l درصد بین گرمای مؤثر (Γ) و گرمای نهان (L) است، که گرمای مؤثر (Γ)، درصد خطی بین گرمای نهان و گرمای محسوس مایع بوده و با ضریب تناسب (γ) و دمای اولیه

1- SIMPLE
2- Second Order Upwind
3-Three Diagonal Matrix

شکل ۶ زمان لازم برای انجماد سیال ساکن در لوله حاوی آب بر حسب قطرهای مختلف لوله، در طول سرمایش مشخص را نشان می دهد.



شکل ۴: مقایسه نتایج عددی و داده های تجربی [۱۲].



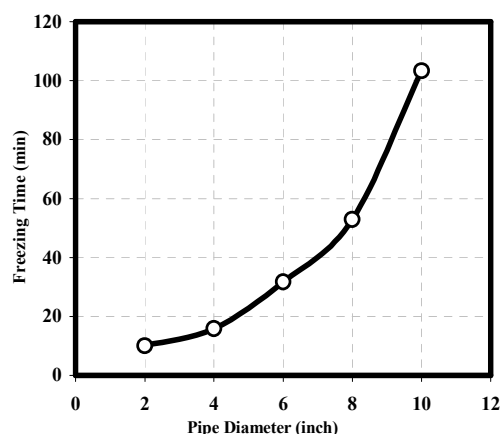
شکل ۵: تغییرات زمان انجماد، طول بی بعد و دمای اولیه.



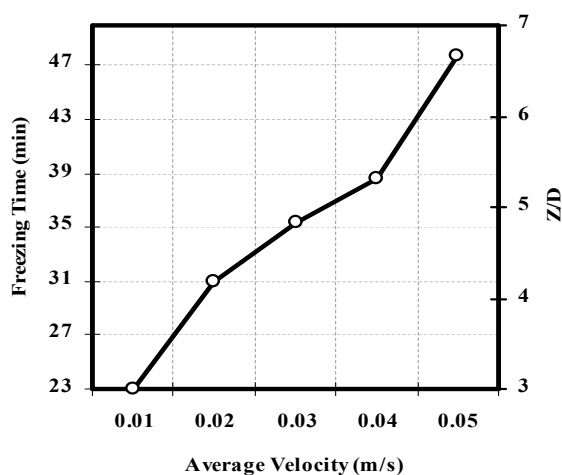
شکل ۳: نمایشی از هندسه و شبکه استفاده شده.

ابتدا برای اعتبار بخشیدن به روند شبیه سازی و مدل های استفاده شده، زمان انجماد سیال آب ساکن به ازای قطرهای مختلف لوله در دماهای مختلف ورودی سیال با نتایج تجربی [۱۲] موجود در ادبیات فن در شکل ۴ مقایسه شده است، که این مقایسه مبین همخوانی مطلوبی بین داده های تجربی و عددی است. در صورتی که طول سرمایش ثابت باشد، با افزایش دمای سیال مقدار بیشتری گرما باید دفع شود تا سیال منجمد شود که به تبع آن افزایش زمان انجماد آب را نیز به همراه خواهد داشت. همچنین از شکل ۴ می توان نتیجه گرفت که در یک طول سرمایش ثابت، محدوده دمایی وجود خواهد داشت که در آن محدوده سیال منجمد خواهد شد و بالاتر از آن دما، گرفتگی جریان رخ نخواهد داد، این محدوده با افزایش قطر لوله کاهش می یابد، به عبارت دیگر برای افزایش این محدوده دمایی، لازم است طول سرمایش افزایش یابد تا جذب گرمای نهان سیال بیشتر و تغییر فاز سیال صورت گیرد.

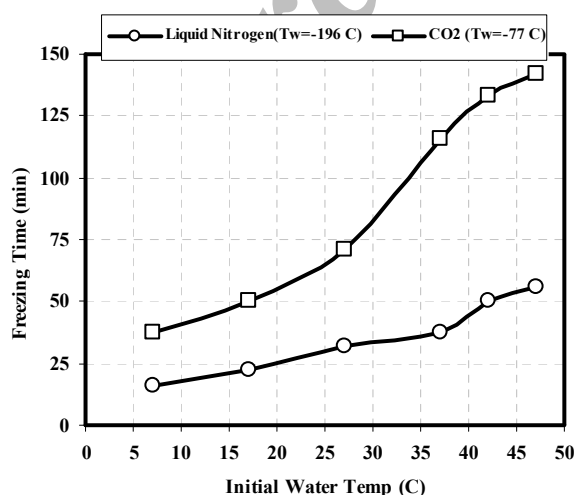
شکل ۵ تغییرات زمان انجماد و طول بی بعد سرمایش برحسب دمای اولیه سیال آب در عدد رینولدز ۳۰۰۰ را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، حتی با ثابت ماندن عدد رینولدز، که تابعی از قطر لوله و دبی جریان می باشد، زمان انجماد آب داخل لوله با افزایش دمای ورودی سیال افزایش می یابد. این افزایش زمان، در دماهای بالاتر ورودی به دلیل وابستگی گرمای ویژه، ضریب رسانش گرمایی و گرانروی به دما، بیشتر به چشم می خورد. به عبارت دیگر برای انجماد کامل سیال جاری درون لوله، با افزایش دمای ورودی نیاز به جذب گرمای بیشتر از سیال جاری است، که به تبع آن با یک طول سرمایش مشخص، زمان انجماد افزایش می یابد. همچنین می توان با افزایش طول سرمایش میزان جذب گرما را نیز افزایش و زمان انجماد را کاهش داد.



شکل ۶: تغییرات زمان انجماد بر حسب قطر لوله.



شکل ۷: تغییرات زمان انجماد، بر حسب سرعت متوسط.

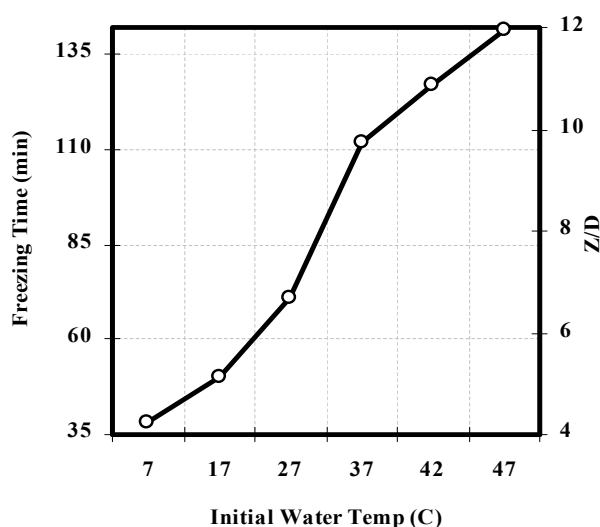


شکل ۸: تغییرات زمان انجماد، دمای اولیه، دماهای سطح.

همانطور که مشاهده می شود، هر چه قطر لوله افزایش می یابد، زمان انجماد زیاد شده، و شیب منحنی با افزایش قطر مقدار بیشتری را نشان می دهد. با توجه به اینکه انجماد سیال درون لوله با نرخ ثابتی، رشد می کند، پس با افزایش قطر لوله در دمای ثابت اولیه سیال، زمان بیشتری برای رسیدن فاز جامد، به مرکز لوله مورد نیاز است. به عبارت دیگر با افزایش قطر مقدار سیال در داخل لوله افزایش یافته و گرمای بیشتری باید توسط سرماساز جذب شود تا گرفتگی صورت گیرد.

شکل ۷ تغییرات زمان انجماد و طول بی بعد سرمایش بر حسب سرعت متوسط ورودی سیال آب، زمانی که دمای ورودی ۳۰۰ درجه کلوین باشد را نشان می دهد. ملاحظه می شود که افزایش سرعت باعث بالا رفتن زمان انجماد می شود. همانطور که اشاره شد افزایش سرعت، باعث افزایش جابجایی اجباری شده و در نتیجه از رشد لایه های یخ جلوگیری و باعث شسته شدن آنها در جریان می شود. پس باید توجه داشت که در صورت افزایش سرعت جریان به منظور ایجاد گرفتگی کامل جریان، باید طول سرمایش را افزایش داد تا میزان جذب گرما توسط سیال سرماساز بیشتر شده و گرفتگی ایجاد شود.

به منظور بررسی تاثیر نوع ماده سرماسازی که برای ثابت نگه داشتن دمای سطح لوله مورد استفاده قرار می گیرد، شبیه سازی با دو نوع سرماساز رایج در صنعت یعنی نیتروژن مایع با دمای جوش ۱۹۶/۵- درجه سانتیگراد و دی اکسید کربن با دمای جوش ۷۷- درجه سانتیگراد انجام شده است. نتایج تاثیرات این دو نوع سرماساز بر زمان انجماد بر حسب تغییرات دمای ورودی سیال آب با عدد رینولدز ۲۰۰۰ در شکل ۸ آورده شده است.

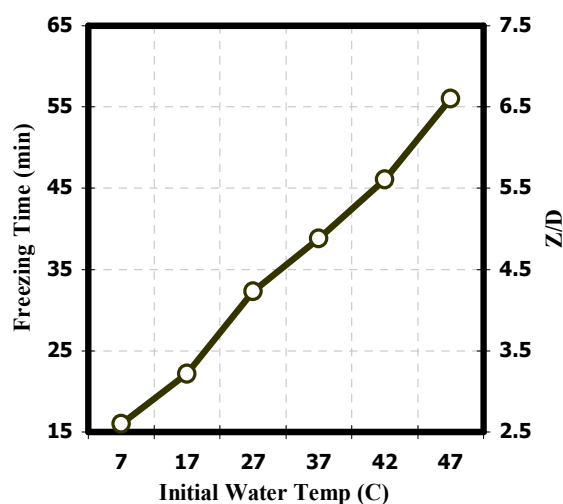


شکل ۱۰: تغییرات زمان انجماد برای دی اکسید کربن.

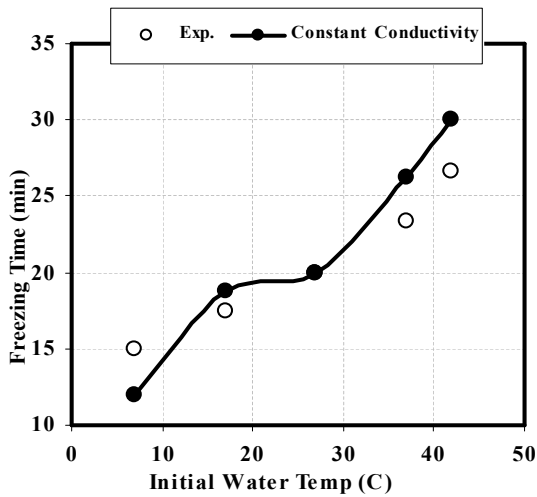
در اکثر مطالعات عددی انجام گرفته در خصوص پدیده انجماد، خواص فازهای مایع و جامد سیال آب را ثابت در نظر گرفته‌اند، در این قسمت با ثابت گرفتن بعضی از خواص و متغیر گرفتن خواص دیگر، تأثیر این متغیر در زمان انجماد مورد بررسی و نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه شده است. برای بررسی پارامترهای فوق شبیه‌سازی‌هایی در یک لوله ۴ اینچی صورت گرفته که نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۱(a) نتایج تحلیل عددی با فرض اینکه همه خواص ثابت نگه داشته شده اند را نشان می‌دهد، مقایسه نتایج، اختلاف چشمگیری بین داده‌های تجربی و عددی را آشکار می‌نماید. در شکل ۱۱(b) ظرفیت گرمایی ویژه، ثابت و بقیه خواص متغیر فرض شده است، همانطور که ملاحظه می‌شود اختلاف داده نسبت به شکل قبل کمتر شده است. این مسأله مبین این است، که ثابت در نظر گرفتن این متغیر در زمان انجماد خطا ایجاد می‌نماید. در شکل‌های ۱۱(c)، ۱۱(d) و ۱۱(e) ضریب رسانش گرمایی، گرانیوی و چگالی بترتیب ثابت و بقیه خواص متغیر فرض شده است. مقایسه آنها نشان می‌دهد که اگرچه در نظر گرفتن خواص ثابت مذکور تأثیر کمتری نسبت به تغییر ظرفیت گرمایی ویژه دارد، اما اختلاف نتایج چشمگیر

از نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که دمای سطح لوله تأثیر بسزایی در زمان انجماد دارد که با توجه به اهمیت پایین بودن زمان انجماد در فرآیندهای صنعتی، بخصوص در مباحث تعمیرات خطوط لوله، استفاده از نیتروژن مایع به عنوان ماده سرماساز، سرد کننده اقتصادی تر خواهد بود. همانطور که از شکل دیده می‌شود اختلاف زمان انجماد، در دو دمای مختلف سطح لوله، به ازای دماهای پایین تر کمتر است. اما با افزایش دمای ورودی سیال این اختلاف بیشتر به چشم می‌خورد که ناشی از وابستگی گرمایی ویژه، ضریب رسانش گرمایی و گرانیوی به دما است که در نتیجه افزایش بیشتر زمان گرفتگی کامل جریان را به همراه دارد.

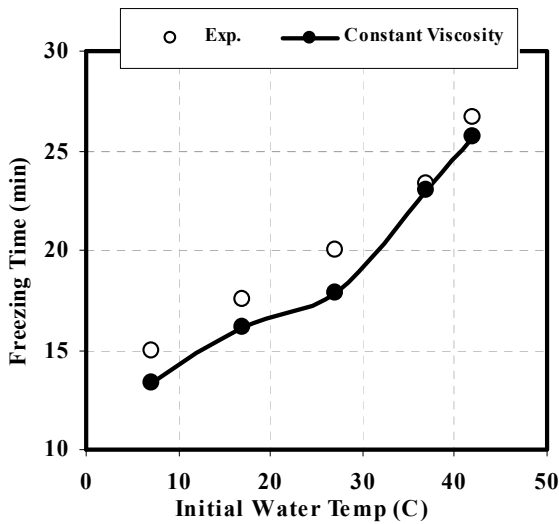
شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات زمان انجماد و طول سرمایش مورد نیاز برحسب دماهای ورودی سیال در $Re = 2000$ برای نیتروژن مایع و دی اکسید کربن به عنوان سیال سرماساز را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود برای انجماد کامل سیال با افزایش دمای ورودی، طول سرمایش باید افزایش یابد. زمان انجماد و افزایش طول سرمایش برای نیتروژن مایع کمتر از دی اکسید کربن است.



شکل ۹: تغییرات زمان انجماد برای نیتروژن مایع.



(c)



(d)

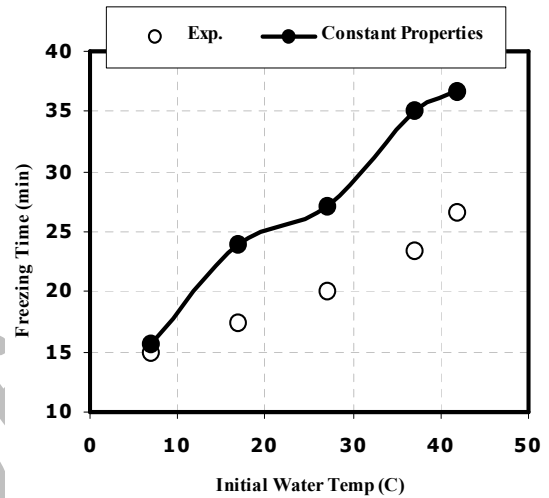
شکل ۱۱: ادامه.

۶- نتیجه گیری

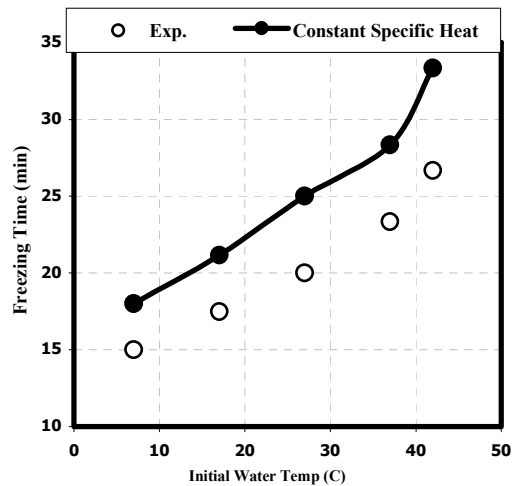
در این تحقیق، یک روند عددی مبتنی بر روش آنتالپی-تخلخل به منظور بررسی و شبیه سازی عددی پدیده انجماد در یک لوله حاوی جریان آب، توسعه داده شده است. در روند توسعه داده شده، پارامترهای مختلف بر فرآیند انجماد که شامل سرعت جریان، دمای ورودی سیال، قطر لوله، دمای سطح لوله و تغییر خواص فیزیکی فازهای جامد و مایع آب بر زمان انجماد و طول سرمایش می باشد، بررسی شده است.

مهم ترین نکات این تحقیق عبارتند از ۱- مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی همخوانی چشمگیری را نشان می دهد که مبین تایید روند عددی توسعه داده شده است، ۲-

می باشد. در شکل ۱۱(f) همه خواص متغیر فرض شده است، همانطور که مشاهده می شود همخوانی خوبی بین داده های عددی و تجربی [۱۲] وجود دارد و مبین این است که ثابت گرفتن یک یا همه خواص در پیش بینی زمان انجماد خطای زیادی ایجاد می نماید.



(a)



(b)

شکل ۱۱: تغییرات زمان انجماد، دماهای ورودی سیال با ثابت و متغیر فرض نمودن خواص سیال.

- Structures, Using the Enthalpy Transforming Model”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, No. 7, pp. 1289-1298, 1989.
9. Hwang, G.J. and Tsai, C.W., “Effect of Natural Convection on Laminar Pipe Flow Solidification”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol 38, No. 15, pp. 2733-2742, 1995.
 10. Keary, A.C. and Bowen, R.J. “Analytical Study of the Effect of Natural Convection on Cryogenic Pipe Freezing”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 10, pp. 1129-1138, 1998.
 11. Akyurt, M., Zaki, G., and Habeebullah, B. “Freezing Phenomena in Ice-water Systems”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 14, pp. 1773-1789, 2002.
 12. Conde, R., Parra, M.T., Castro, F.J., Villafruela, M., Rodríguez, M.A., and Méndez, C. “Numerical Model for Two-phase Solidification Problem in a Pipe” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No’s. 17-18, pp. 2501-2509, 2004.
 13. Ozlem, O., “Visualization of Temperature and Velocity Fields During Phase Change of Water under High Hydrostatic Pressure”, *Landnutzung und Umwelt am.*, 2005.
 14. Scanlon, T.J. and Stickland, M.T. “Numerical Analysis of Buoyancy-driven Melting and Freezing”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 14, pp. 429-436, 2004.
 15. Tomasz, A.K., “Freezing of Water in the Differentially Heated Cubic Cavity”, *Int. J. Computational Fluid Dynamics*, Vol. 11, pp. 193-210, 1999.
 16. Darius, M. and Volker, R. “Latent Heat Effects in Subsurface Heat Transport Modelling and Their Impact on Palaeotemperature Reconstructions”, *Geophys. Int. J.*, Vol. 164, No. 1, pp. 236-245, 2006.
 17. Scanlon, T.J., and Stickland, M.T. “A Numerical Analysis of Buoyancy-driven Melting and Freezing”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 3, pp.429-436, 2004.
- متغیر گرفتن گرمای ویژه، ضریب رسانش گرمایی، چگالی و گرانیروی تأثیر بسزایی در فرآیند انجماد دارد، ۳- توابع بدست آمده برای وابستگی گرمای ویژه، ضریب رسانش گرمایی، چگالی و گرانیروی به دما، از دقت مطلوبی برخوردار هستند، ۴- استفاده از سیال سرماساز با درجه حرارت پایین تر می تواند زمان انجماد را کاهش دهد و ۵- به دلیل کثرت تعداد پارامترهای موثر بر فرآیند انجماد، علاوه بر استخراج نتایج در حالت بی بعد، رابطه بی بعد ریاضی برای ارتباط فاکتورهای مؤثر در فرآیند انجماد داخل لوله افقی متفاوت به دست آورده شده، که می توان به راحتی زمان انجماد را با آن تخمین زد.
- ### مراجع
- 1 Huan, Z. and Jordaan, G.D. “Galerkin Finite Element Analysis of Spin Casting Cooling Process”, *Applied Thermal Engineering.*, Vol. 24, pp. 95-110, 2004.
 2. Lamberg, P. “Approximate Analytical Model for Two-phase Solidification Problem in a Finned Phase-change Material Storage”, *Applied Energy*, Vol. 77, No.2, pp. 131-152, 2004.
 3. Henry, H. and Argyropoulos., S.A. “Mathematical Modelling of Solidification and Melting”, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol 4, No.4, pp. 371-396, 1996.
 4. Eyres, N.R, Hartree, D.R, Ingham J., Jackson, R., Sarjant R.J., and Wagstaff, J.B. “The Calculation of Variable Heat Flow in Solid Phil”, *Trans. Soc. A. Vol. 240, No. 813*, pp. 1-57, 1946.
 5. Oleinik, O.A., *Soviet Math. Doki*, Vol. 1, No. 2, pp.1350-1354, 1960.
 6. Atthey, D.R. “A Finite Difference Scheme for Melting Problems Based on the Method of Weak Solutions in Moving Boudary Problems in Heat Flow and Diffusion”, *Oxford Univ. Press, Oxford*, 1975.
 7. Voller V. and Cross, M. “Accurate Solution of Moving Boundary Problems, Using the Entalpy Method”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, No. 3, pp. 545-556, 1981.
 8. Cao, Y., Faghri, A., and Chang, W.S. “A Numerical Analysis of Stefan Problems for Generalized Multi-dimensional Phase Change