شبیه سازی عددی پدیده انجماد آب در لوله‌ها

محمد حسن جوارشکیان[۱] , امیر کریمي[۲]
گروه مهندسی مکانیک, دانشکده فنی مهندسی ، دانشگاه تبریز

در اين پژوهش، يك فرآيند عددي براي شبيه سازي جريان سيال درون لوله در حال انجماد با بكارگيري روش آنتـالپي- تخلخـل بـراي پيش بيني مرز مشترک مايع/جامد، که توانائي تشخيص محل انجماد در هر لحظه را دارد، توسعه داده شده است. روش بكار رفتـه يـك روش ضمني است که فشار به عنوان متغير اصلي مي باشد. در روال فوق معادلات ناویر استوکس با استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه متحول شده(**staggered**) جهت ذخيره متغيرها، حل شده اند. در اين تحقيق، ضمن بررسي خواص فازهـاي مـايع و جامـد آب و تاثير آنها بر فرايند انجماد، زمان انجماد سيال و طول سرمايش لازم، جهت گرفتگی جريان بر حسب فاكتورهاي موثر مورد مطالعـه قـرار گرفته اند, که پارامترهاي موثر شامل قطر لوله، سرعت متوسط سيال، دماي ديواره و دماي اوليـه سـيال مـي باشـند. بـه دليـل تعـدد پارامترهاي موثر بر فرايند انجماد، علاوه بر استخراج نتايج در حالت بي بعد, رابطه بي‌بعد رياضي براي ارتباط فاكتورهاي مختلف بدسـت آورده شده است. به منظور بررسي اعتبار روند اين شبيه سازي, ابتدا مقايسه اي بين داده هاي استخراجي با نتـايج تجربـي موجـود در ادبیات فن در حالت خاص انجام شده, که همخوانی مطلوبي بين آنها ديده مي‌شود و مبين صحيح بودن روند عددي توسـعه داده شـده و تصديق نتایجی استخراج مي باشد.

واژه‌هاي كليدي : انتقال حرارت- انجماد- آنتالپي تخلخل- زمان انجماد

A Numerical Simulation of Two-Phase Solidification Problem in a pipe

M.H. Djavareshkian, A. Karimi
Mechanical Engineering Department, Tabriz University

ABSTRACT
In this research, a fixed-grid finite volume numerical approach is developed and used to simulate physical details of convection-dominated solidification problems for the pipe flow. This approach is based on the enthalpy-porosity method which is used to track the motion of the liquid-solid front and to obtain the freezing length and time of the solidification. The Navier-Stokes equations are solved on a staggered mesh by pressure-based implicit procedure. Results of the solidification are then validated against experimental data. Findings show a remarkable quality of the simulation of solidification problems.

Keywords: Heat transfer, Solidification, Enthalpy-Porosity, Time of Solidification

---

۱ دانشیار
۲ کارشناس ارشد

۱- مقدمه

فرآيندهاي ذوب و انجماد در بسياري از زمينه‌ها همانند سرمايش غذا، ساخت شيشه و مواد بلوري، فرآوري فلزات، ذوب و ريخته‌گري آلياژها در قالبها و همچنين تغيير فاز مواد در سيستمهاي نگهداري كه از پارافين‌ها، نمكها يا اسيدهاي چرب استفاده مي‌شود، به دليل گرماي نهان آنها از اهميت ويژه‌اي برخوردارند[۱]. در اين فرآيندها، ماده داراي تغيير فاز خواهد بود. بنابراين، در طول فرآيند مرز جدا كننده دو فاز مختلف، پيشرفت كرده و در حال حركت مي باشد. خواص انتقالي در نتيجه اختلاف كلي نرخ‌هايي از انتقال انرژي، جرم و ممنتوم از يک فاز به فاز ديگر بطور چشگيري بين فازها تغيير مي‌كنند. در اين مسائل موقعيت مرز متحرک نمي‌تواند به صورت دقيق تشخيص داده شود، اما بايد به عنوان عامل مهم تشكيل دهنده در حل تعيين شود[۲].

روشهاي مختلفي براي شبيه سازي مسائل ذوب و انجماد وجود دارند كه از جمله مي توان به روش هاي شبكه ثابت شده(Fixed grid) ، شبكه متغير (Variable grid) ، ظرفيت ظاهري(Apparent capacity) ، ظرفيت موثر(Effective capacity) ، چشمه مبنا (Source based)،تابع جريان گردابي(Stream function vorticity) ، متغير اوليه(Primitive variable) و روش آنتالپي (Enthalpy) اشاره نمود[۳].

در اين تحقيق با تلفيق دو روش شبكه ثابت و آنتالپي كه روش آنتالپي – تخلخل ناميده مي‌شود، مسئله انجماد در لوله ها شبيه سازي شده است. نظريه آنتالپي ابتدا توسط اريس(Eyres) و همكاران[۴] به منظور جلوگيري از ايجاد جمله هاي غيرخطي در مسائل رسانش ارائه شد. بسط اين روش توسط الينيک (Oleinik)[۵] و همچنين اتهي(Atthey)[۶] انجام شد و فرمولهاي دقيقي براي حل مسائل ذوب و انجماد ارائه گرديد. به منظور حل مسائل يک بعدي انجماد، وولر(Voller) و همكاران [۷]، دقيق ترين جوابها را از روند فوق بدست آوردند. با توجه به اينكه فرايندهاي تغيير فاز علاوه بر عوامل پخش، متاثر از جمله هاي جابجايي نيز مى‌شوند، كائو(Cao) و همكاران [۸]تاثير جابجايي و تغيير فاز در مسائل ذوب و انجماد را بررسي كردند.

در ادامه بررسي فرآيندهاي ذوب و انجماد تحقيقات زيادى با استفاده از روشهاي عددي و تجربي صورت گرفته كه به تعدادي از آنها اشاره مي شود. تاثير جابجايي آزاد بر انجماد سيال آرام درون لوله توسط هانگ (Hwang) و همكاران (۹) و همچنين توسط كري(Keary) و همكاران[۱۰] بصورت تجربي و تحليلي مورد بررسي قرار گرفته است كه محققين مذكور محدوده دماي ورودي كه امكان انجماد كامل سيال وجود دارد را بررسی نمودند. تشريح مفاهيم انجماد در سال ۲۰۰۲ توسط آكيورت (Akyurt) و همكاران [۱۱] با تاكيد ويژه بر ناحيه تغيير فاز خميري (Mushy Zone) صورت گرفت. كند(Conda) و همكاران [۱۲] در سال ۲۰۰۴ با استفاده از يک نرم افزار تجاري مسائل انجماد در لوله‌هاي با قطر ميليمتري را مورد بررسي قرار دادند. در اكثر تحقيقات انجام شده براي حل مسئله انجماد، اولا تنها فاكتور خاصي مورد مطالعه قرار گرفته است و به زمان لازم براي انجماد كامل سيال كمتر پرداخته شده است، ثانيا در خيلي از پژوهشهاي انجام شده خواص فازهاي مايع و جامد سيال در فرآيند انجماد ثابت فرض شده است. ثالثا در اكثر مطالعات صورت گرفته، نتايج بصورت نمودارى ارائه شده است.

هدف از اين تحقيق توسعه يک نرم افزار جهت شبيه سازي جريان سيال در حال انجماد درون لوله با استفاده از روش روش آنتالپي – تخلخل و بررسى و مطالعه مواردى است كه تاكنون كمتر به آنها اشاره شده است. ۱- با توجه به اينكه افزايش زمان انجماد باعث مصرف بيشتر ماده سرماساز، و به تبع آن بالا رفتن هزينه را بهمراه دارد, پس محاسبه زمان انجماد و طول سرمايش لازم جهت گرفتگى بر حسب پارامترهاى موثر مورد بررسى قرار گرفته است. ۲- از طرفى با توجه به اينكه، تغييرات خواص فيزيكى فاز هاى مايع و جامد سيال با دما مي‌تواند تاثير چشمگيري را بر روي پارامترهاي بررسي شده به همراه داشته باشد ، تاثير ثابت و متغير بودن خواص فيزيكي فازهاي مايع و جامد سيال دما نيز بررسي شده است. ۳- همچنين بمنظور فشرده سازى نتايج، داده هاى استخراجى بصورت بدون بعد تنظيم، و با استفاده از روش برازش حداقل مربعات رابطه رياضى بر حسب اعداد بى بعد ارائه شده است. پس از تكميل روند عددى توسعه داده شده، به منظور بررسي اعتبار نتايج اين

شبيه سازي، نخست مقايسه اي بين داده هاي استخراجي با نتايج تجربي موجود در ادبيات فن براي حالت خاص انجام شده است كه همخوانی مطلوبي بين آنها ديده مي‌شود كه روند شبيه سازی را تاييد می نمايد.

۲- معادلات حاكم مبتني بر روش آنتالپي- تخلخل

در مسائل تغيير فاز، معادلات حاكم مبتني بر روش آنتالپي- تخلخل شامل معادلات پيوستگي, ممنتوم و انرژي مي باشند كه به صورت زير بيان مي‌شوند[۱۳]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla.(\rho U)=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t}+\nabla.(\rho UU)=-\nabla p+\nabla.(\mu\nabla U)+\rho g \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\nabla.(\rho Uh)=\nabla.(k\nabla T)+\rho gU \qquad (۳)$$

در اين روش، آنتالپي شامل آنتالپي مرجع و تغييرات آنتالپي نسبت به آنتالپي مرجع در نظر گرفته مي‌شود، كه اگر h_{ref} را به عنوان آنتالپي مرجع و T_{ref} را به عنوان دماي مرجع قرار دهيم، آنتالپي به صورت زير تعريف خواهد شد[۱۴]:

$$h=h_{ref}+\int_{T_{ref}}^{T} c\,dT \qquad (۴)$$

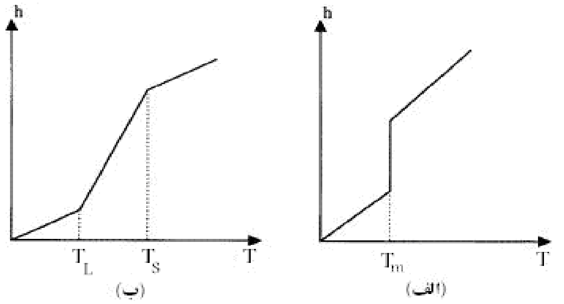
رابطه بين آنتالپي و دما را مي‌توان به صورت جمله اي از گرماي نهان آزاد شده ناشي از تغيير فاز ماده، تعريف كرد. معمولا اين رابطه براي مسائل تغيير فاز همدما، تابعي پله‌اي و براي مسائل تغيير فاز غير همدما تابعي خطي فرض مي‌شود. شكل (۱) نشان دهنده منحني‌هاي آنتالپي- دما براي هر دو مسئله است. پس مي‌توان آنتالپي بر حسب دما را به صورت زير بيان كرد[۱۴]:

$$h= fL+cT \qquad (۵)$$

در مسائل تغيير فاز به دليل اينكه مرز مشترك مايع/جامد به طور واضحي از هم جدا نيستند، درهر سلول از درصد حجمي مايع , f ، كه مبين نسبت حجم مايع به كل حجم سلول محاسباتي مي باشد، استفاده مي‌شود. ناحيه‌اي كه مقدار درصد مايع بين صفر و يك بوده و دماي آن محدوده‌اي بين يكي از فازهاي مايع يا جامد را دارد، ناحيه خميري(Mushy Zone) گفته مي شود و مقادير مربوط به درصد حجمي مايع براي هر سلول را مي‌توان از رابطه زير بدست آورد[۱۴]:

$$f=\begin{cases} 1 & T>T_l \\ (T-T_s)/\Delta T & T_s\le T\le T_l \\ 0 & T<T_s \end{cases} \qquad (۶)$$

براي مواد غير همدما $\Delta T=T_l-T_s$ بوده كه T_l و T_s مبين دماي مايع و يخي مي باشند كه تغيير فاز در آن اتفاق مي‌افتد، اما در مواد همدما به دليل متساوي بودن دماهاي T_s و T_l با دماي نقطه ذوب، مقدار ΔT برابر صفر مي‌شود و ناحيه خميري شكل نخواهد گرفت (شكل ۱).



شكل ۱- آنتالپي بر حسب تابعي از دما براي (الف) تغيير فاز همدما (ب) تغيير فاز غير همدما [۱۴]

در نهايت معادله بقاي انرژي براي مسائل انجماد را مي‌توان به صورت زير بيان كرد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cT+\rho fL)+\nabla.(\rho cTU)=\nabla.(k\nabla T)+\rho gU \qquad (۷)$$

در معادله (۷) علاوه بر دما, سرعت و درصد حجمي مايع نيز مجهول می باشند. درصد حجمي مايع با توجه به روابط موجود در معادله (۶) بر حسب تابعي از دما محاسبه مي‌شود و با توجه به در نظر گرفتن سرعت از قدم زماني قبل, حل عددي براي بدست آوردن توزيع دما امكان پذير مي‌شود.

در اين تحقيق به منظور بررسي تاثير پارامترهاي ذكر شده بر زمان انجماد و همچنين طول سرمايش مورد نياز، خواص فيزيكي سيال آب در هر دو فاز مايع و جامد متغير با دما فرض شده است. در مراجع [۱۷] و [۱۸] تغييرات خواص آب در فازهای مايع و جامد به ازاي تعدادي دما بيان گرديده كه در اين تحقيق با برازش تابعي بر داده هاي فوق, معادلات زير استخراج شده است. تغييرات چگالي فاز مايع آب, زماني كه دما بر حسب سانتيگراد باشد مطابق زير است:

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

و ساير خواص فيزيكي فاز مايع آب كه شامل گرماي ويژه، ضریب رسانش گرمایی و گرانروی بر حسب دماي مطلق طبق روابط استخراجي زير در محاسبات وارد شده اند:

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

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

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

تغييرات دمايي خواص فيزيكي فاز جامد(يخ) بر حسب دماي مطلق، با استفاده از روش نمايي، براي محدوده دمايي حاكم بر فیزیک مسئله به شكل زير بدست آمده‌اند:

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

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

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

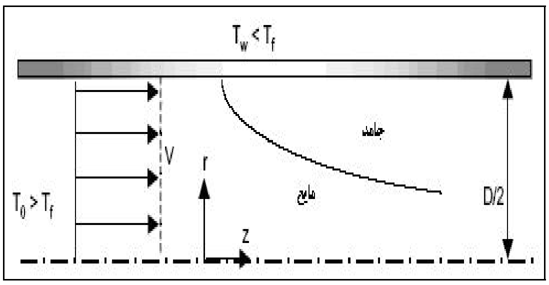
با توجه به اينكه در مواد با تغيير فازهاي غير همدما ناحیه خمیري (Mushy Zone) بوجود مي‌آيد، در اين تحقيق با استفاده از ايده درصد حجمي مايع ارتباطی بین خواص مواد در ناحیه خمیری با استفاده از رابطه زیر برقرار شده است:

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

كه λ را مي‌توان چگالي، گرمای ویژه و ضریب رسانش گرمایی در ناحیه خمیری در نظر گرفت. در این تحقیق درحالتی که خواص فیزیکی فازهای مایع و جامد آب مستقل از دما در نظر گرفته شده است از داده های جدول (۱) استفاده گردیده است.

۳- الگوريتم حل و شرايط مرزي

به منظور حل عددي پديده انجماد، جريان آرام تقارن محوري درون لوله استوانه‌اي شبيه‌سازي گرديده، كه مدل فيزيكي آن در شكل (۲) نشان داده شده است. همانطور كه در شكل مشاهده مي‌شود، سطح لوله داراي دماي T_W بوده، كه به منظور فراهم كردن تغيير فاز از نقطه ذوب سيال كمتر مي‌باشد. همچنين دماي اوليه سيال T_0، كه بالاتر از نقطه انجماد مي‌باشد، به عنوان شرط مرزي و اوليه اعمال مي‌شود. توزيع سرعت در ورودي يكنواخت فرض شده و سرعت ورودي نيز بعنوان شرط اوليه در نظر گرفته شده است. در معادله انرژي، دماي هر سلول تابعي از در صد حجمي مايع آن سلول مي باشد, پس در هر فاز معادلات مربوطه حل مي‌شوند. با توجه به فرضيات بالا كليه معادلات ذكر شده با استفاده از روش حجم محدود گسسته و توسط الگوريتم سيمپل (SIMPLE) و یک روند عددي ضمني حل شده اند. در روند فوق از روش تفاضل بالادست مرتبه دو (Second Order Upwind) براي محاسبه جمله جابجايي استفاده گرديده و معادلات جبري بدست آمده توسط روش TDM (Three Diagonal Matrix) حل شده‌اند. همچنين گام زماني طوري انتخاب شده كه شرط پايداري برآورده شود و زمان توقف برنامه بر مبناي رشد لايه های فاز جامد تا مركز لوله در نظر گرفته شده است.



شكل ۲ - شماتيكي از مدل فيزيكي.

۴- روابط عددي زمان گرفتگی

با توجه به اهميت زمان انجماد كامل سيال درون لوله و همچنين طول سرمايش لازم جهت انجماد جريان، علاوه بر استخراج نتايج در حالت بي بعد, معادله رياضي براي ارتباط فاكتورهاي مختلف با يكديگر مطابق روند زير استخراج

گرديده است، که زمان گرفتگی در شکل بي بعد خود (t^*) تابعي از پارامترهاي زير مي‌باشد:

$$t^* = \frac{4(T_s - T_w)k_s}{\rho L D^2} t = f(Z^* ,W_l ,Re ,W_s) \quad (۱۶)$$

$Z^* = \frac{Z}{D}$ طول سرمايش بي بعد، W_l درصد بين گرماي موثر(Γ) و گرماي نهان (L) است، که گرماي موثر(Γ)، درصد خطي بين گرماي نهان و گرماي محسوس مايع بوده و با ضريب تناسب (γ) و دماي اوليه سيال متناسب مي‌باشد، ضريب تناسب آب $\gamma_{water} = 0.696$ مي باشد.

$$W_l = \frac{\Gamma}{L} = \frac{L + \gamma c_l (T_0 - T_f)}{L} \quad (۱۷)$$

W_S عدد ژاکوب بوده و رابطه بين گرماي نهان با گرماي انتقالي از فاز جامد را در نظر مي‌گيرد که تابعي از دماي ديوار مي‌باشد.

$$W_S = L / c_S (T_f - T_W) \quad (۱۸)$$

همچنين عدد رينولدز با توجه بر سرعت متوسط جريان محاسبه مي شود.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (۱۹)$$

بنابراين روابط در فرمول (۱۶) به صورت زيرآورده مي‌شوند:

$$t^* = C\, Z^{*a}\, W_l^{\,b}\, \mathrm{Re}^n\, W_s^m \quad (۲۰)$$

ابتدا" داده هاي استخراجي از روند عددي مطابق روابط بالا بي بعد شده سپس با استفاده از روش حداقل مربعات، تابعي بر داده ها مطابق معادله (۲۱) برازش گرديده است.

$$t^* = 0.094595\, Z^{*1.371606}\, W_l^{-3.254362}\, \mathrm{Re}^{0.354471}\, W_s^{-0.783680} \quad (۲۱)$$

۵- نتايج

شکل (۳) نمايشي از هندسه و شبکه را نشان مي‌دهد. شبکه مستقل از حل که در اين تحقيق استفاده شده داراي ۵۰*۱۵۰ سلول می باشد. در اين شبيه سازي تاثير سرعت متوسط، دماي اوليه سيال، دماي ديواره و تغيير خواص سيال آب برحسب طولهاي سرمايش لازم، جهت گرفتگی جريان بر زمان انجماد کامل سيال درون لوله بررسي گرديده است. در اين آناليز سعي شده است زمان انجماد به ازاي تغييرات يکي از پارامترها و ثابت فرض نمودن بقيه مورد ارزيابي قرار گيرد.

ابتدا" به منظور اعتبار بخشيدن به روند شبيه سازي و مدلهاي استفاده شده، زمان انجماد سيال آب ساکن به ازاي قطرهاي مختلف لوله در دماهاي مختلف ورودي سيال با نتايج تجربي [۱۲] موجود در ادبيات فن در شکل (۴) مقايسه شده است، که اين مقايسه مبين همخوانی مطلوبي بين داده هاي تجربي و عددي مي باشد. در صورتيکه طول سرمايش ثابت باشد، با افزايش دمای سيال مقدار بيشتری گرما بايد دفع شود تا سيال منجمد گردد که به تبع آن افزايش زمان انجماد آب را نيز بهمراه خواهد داشت. همچنين مي‌توان از شکل(۴) دريافت که در يک طول سرمايش ثابت، محدوده دمايي وجود خواهد داشت که در آن محدوده سيال منجمد خواهد شد و بالاتر از آن دما، گرفتگی جريان رخ نخواهد داد که اين محدوده با افزايش قطر لوله کاهش مي‌يابد، به عبارت ديگر براي افزايش اين محدوده دمائي، لازم است طول سرمايش افزايش يابد تا جذب گرماي نهان سيال بيشتر و تغيير فاز سيال صورت گيرد.

شکل (۵) تغييرات زمان انجماد و طول بي بعد سرمايش بر حسب دماي اوليه سيال آب در عدد رينولدز ۳۰۰۰ را نشان مي‌دهد. همانطور که مشاهده مي شود، حتي با ثابت ماندن عدد رينولدز، که تابعي از قطر لوله و دبي جريان مي‌باشد، زمان انجماد آب داخل لوله با افزايش دماي ورودي سيال افزايش مي‌يابد و اين افزايش زمان، در دماهاي بالاتر ورودي به دليل وابستگی گرماي ويژه، ضريب رسانش گرمايی و گرانروی به دما، بيشتر به چشم مي‌خورد. بعبارت ديگر براي انجماد کامل سيال جاري درون لوله، با افزايش دماي ورودي نياز به جذب گرمای بيشتر از سيال جاری مـی باشد، که به تبع آن با يک طول سرماساز مشخص، زمان انجماد افزايش می يابد. همچنين مي توان با افزايش طول سرمايش ميزان جذب گرما را نيز افزايش و زمان انجماد را کاهش داد.

شکل (۶) زمان لازمه برای انجماد سيال ساکن در لوله حاوی آب بر حسب قطرهاي مختلف لوله، در طول سرمايش مشخص را نشان می دهد همانطور که مشاهده مي شود، هر

چه قطر لوله افزايش مي يابد، زمـان انجمـاد زيـاد شـده و شيب منحني با افزايش قطر مقدار بيشـتري را نشـان مـي دهد. با توجه به اينكـه انجمـاد سـيال درون لولـه بـا نـرخ ثابتي، رشد مي‌كند پس با افزايش قطر لوله در دماي ثابت اوليه سيال، زمان بيشتري براي رسيدن فاز جامد، به مركز لوله مورد نياز مي‌باشد. بعبارت ديگر با افزايش قطر مقـدار سيال در داخل لوله افزايش يافته و گرماي بيشـتري بايـد توسط سرماساز جذب شود تا گرفتگی صورت گيرد.

شكل (۷) تغييرات زمان انجماد و طول بي بعد سرمايش بر حسب سرعت متوسط ورودي سيال آب، زماني كـه دمـاي ورودي ۳۰۰ درجه كلوين باشد را نشان مي دهد. ملاحظه مي شود كه افزايش سرعت باعث بالا رفـتن زمـان انجمـاد مي شود. همانطور كه اشـاره شـد افـزايش سـرعت باعـث افزايش جابجايي اجباري شده و در نتيجه از رشد لايه‌هاي يخ جلوگيري و باعث شسته شدن آنها در جريان مي‌شـود. پس بايد توجه داشت كه در صورت افزايش سرعت جريان به منظور ايجاد گرفتگی كامل جريان، بايد طول سـرمايش را افزايش داد تا ميزان جذب گرما توسط سـيال سرماسـاز بيشتر شده و گرفتگی ايجاد شود.

به منظور بررسي تاثير نوع ماده سرماسازي كه براي ثابـت نگهداشتن دماي سطح لوله مورد استفاده قـرار مـي‌گيـرد، شبيه‌سـازي بـا دو نـوع سرماسـاز رايـج در صـنعت يعنـي نيتروژن مايع با دماي جوش ۱۹۶/۵- درجـه سـانتيگراد و دي‌اكسيد كربن با دماي جوش ۷۷- درجه سانتيگراد انجام شده است. نتايج تاثيرات ايـن دو نـوع سرماسـاز بـر زمـان انجماد بر حسب تغييرات دماي ورودي سيال آب بـا عـدد رينولدز ۲۰۰۰ در شـكل (۸) آورده شـده اسـت. از نتـايج بدست آمده مي‌توان دريافت كه دمـاي سـطح لولـه تـاثير بسزايي در زمان انجماد دارد كه با توجه به اهميـت پـايين بودن زمان انجمـاد در فراينـدهاي صـنعتي، بخصـوص در مباحث تعميرات خطوط لوله، استفاده از نيتروژن مايع بـه عنوان ماده سرماساز، سرد كننده اقتصادي تر خواهد بـود. همانطور كه از شكل ديده مي‌شود اختلاف زمـان انجمـاد، در دو دمای مختلف سطح لوله، بـه ازاي دماهـاي پـائينتر كمتر بوده اما با افزايش دماي ورودي سـيال ايـن اخـتلاف بيشتر به چشم مي‌خورد كه ناشي از وابستگی گرماي ويژه، ضريب رسانش گرمایی و گرانروی به دما و در نتيجه افزايش بيشتر زمان گرفتگی كامل جريان را بهمراه دارد.

شكلهاي ۹ و۱۰ تغييرات زمان انجماد و طول سرمايش مورد نياز بر حسب دماهاي ورودي سيال در $Re = 2000$ براي نيتروژن مايع و دي اكسيد كربن بعنوان سيال سرماساز را نشان مي دهد. همانطور كه مشاهده مي شود براي انجماد كامل سيال با افزايش دماي ورودي، طول سرمايش بايد افزايش يابد. زمان انجماد و افزايش طول سرمايش براي نيتروژن مايع كمتر از دي اكسيد كربن مي باشد.

در اكثر مطالعات عددي انجام گرفته در خصوص پديده انجماد، خواص فازهاي مايع و جامد سيال آب را ثابت در نظرگرفته‌اند، در اين قسمت با ثابت گرفتن بعضي از خواص و متغير گرفتن خواص ديگر، تاثير اين متغير در زمان انجماد مورد بررسي و نتايج عددي با داده هاي تجربي مقايسه شده است. به منظور بررسي پارامترهای فوق شبيه‌سازيهايي در يک لوله ۴ اينچی صورت گرفته كه نتايج آن در شكل ۱۱ نشان داده شده است. شكل (a)۱۱ نتايج تحليل عددی با فرض اينكه همه خواص ثابت نگه داشته شده اند را نشان می دهد مقايسه نتايج اختلاف چشمگيري بين داده هاي تجربي و عددي را آشكار می نمايد. در شكل (b)۱۱ ظرفيت گرمائی ويژه ثابت و بقيه خواص متغير فرض شده است، همانطور كه ملاحظه مي شود اختلاف داده نسبت به شكل قبل كمتر شده و مبين اين است، كه ثابت در نظر گرفتن اين متغير در زمان انجماد خطا ايجاد مي نمايد. در شكلهاي (c)۱۱، (d)۱۱ و (e)۱۱ ضريب رسانش گرمایی، گرانروی و چگالي بترتيب ثابت و بقيه خواص متغير فرض شده است. مقايسه آنها نشان مي دهد كه اگرچه در نظر گرفتن خواص ثابت مذكور تاثير كمتري نسبت به تغيير ظرفيت گرمائي ويژه دارد، اما اختلاف نتايج چشمگير مي باشد. در شكل (f) همه خواص متغير فرض شده است، همانطور كه مشاهده مي‌شود همخوانی خوبي بين داده هاي عددي و تجربي[۱۲] وجود دارد و مبين اين است كه ثابت گرفتن يک يا همه خواص در پيشبيني زمان انجماد خطای زيادی ايجاد مي نمايد.

٦- نتيجه گيري

در این تحقیق، یک روند عددي مبتني بـر روش آنتـالپي-تخلخل به منظور بررسـي و شـبيه سـازي عـددي پديـده انجماد در یک لوله حاوي جريان، توسعه داده شـده اسـت. در روند توسعه داده شده، پارامترهـاي مختلـف بـر فراينـد انجماد که شامل سرعت جريان، دماي ورودي سيال، قطـر لوله، دماي سطح لولـه و تغييـر خـواص فيزیکـی فازهـای جامد و مايع آب بر زمـان انجمـاد و طـول سـرمايش مـي باشد، بررسي شده است.

مهم ترین نکات ایـن تحقیـق عبارتنـد ۱- مقایسـه نتـایج عددی با داده های تجربی همخوانی چشـمگیری را نشـان می دهد که مبین تایید روند عددی توسعه داده شده است ۲- متغیر گرفتن گرماي ویـژه، ضـریب رسـانش گرمـایی، چگالی و گرانروی تاثیر بسزایی در فرآیند انجمـاد دارد ۳- تابع های بدست آمده برای وابستگی گرماي ویژه، ضـریب رسانش گرمایی، چگالی و گرانروی به دما، از دقت مطلوبی برخوردار هستند ۴- استفاده از سیال سرماسـاز بـا درجـه حرارت پایین ترمی تواند زمان انجماد را کـاهش دهـد. ۵- به دلیل کثرت تعدد پارامترهاي مـوثر بـر فراينـد انجمـاد، علاوه بر استخراج نتايج در حالت بي بعـد, رابطـه بـي‌بعـد رياضي براي ارتبـاط فاکتورهـاي مـوثر در فرآینـد انجمـاد داخل لوله افقی مختلف بدست آورده شده، کـه مـی تـوان براحتی زمان انجماد را تخمین زد.

۷- 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, pp. 131–152, 2004.

3. Henry, Huy., and Stavros, A Argyropoulos., “Mathematical modelling of solidification and melting”, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. Vol 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. R. Soc. A Vol.240. pp. 1–57, 1946.

5. Oleinik, O.A. Soviet Math Doki, Vol.1 ,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 iv. Press, Oxford, 1975.

7. Voller V. and Cross, M. “Accurate Solution of Moving Boundary Problems Using the Entalpy Method”, Int. J. Heat Mass Transfer,Vol.24, 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 Structures Using the Enthalpy Transforming Model”, Int. J. Heat Mass Transfer,Vol 32, PP.1289-1298, 1989.

9. Hwang, G.J. and Tsai, C.W, “Effect of natural convection on laminar pipe flow solidification”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 38, Issue 15, October, pp 2733-2742, 1995.

10. Keary, A. C. and Bowen, R. J. “Analytical study of the effect of natural convection on cryogenic pipe freezing ”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, Issue 10, May, pp 1129-1138, 1998

11. Akyurt, M., zaki, G. and Habeebullah, B. “Freezing Phenomena in ice-water systems”. Energy Conversion and Management. Vol. 43. pp. 1773-1789, 2002

12. Conde, R., Parra, M. T., Castro, FJ., Villafruela, M., . Rodríguez, M. A and Méndez, C. “ Numerical model for two-phase solidification problem in a pipe” Applied Thermal Engineering, Vol. 24, Issues 17-18, pp. 2501-2509, December 2004.

13. Ozlem, Ozmutlu, “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", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47. pp, 429–436, 2004.

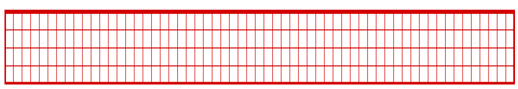
15. Tomasz, A.K., "Freezing of Water in the differentially heated cubic cavity", International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 11, pp.193-210, 1999.

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, pp236–245, 2006.

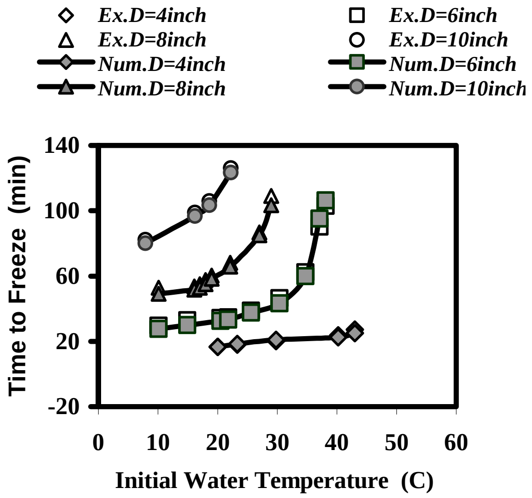
17. Scanlon,T.J., and Stickland, M.T. "A numerical analysis of buoyancy-driven melting and freezing" International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47 , pp.429–436, 2004.

جدول ۱. خواص فیزیک مواد

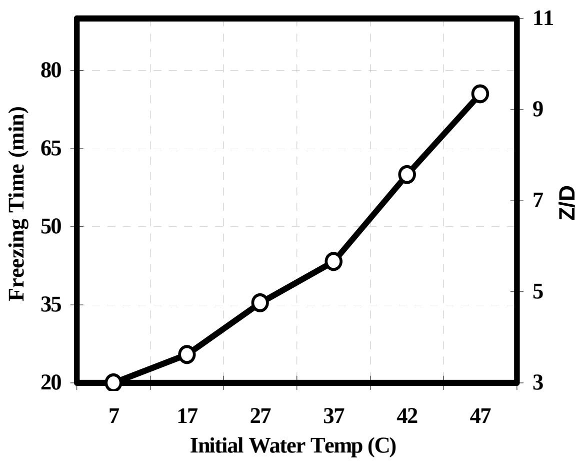
خواص ثابت فيزيكي آب	فاز مايع	فاز جامد
چگالي $\rho(kg/m^3)$	۹۹۸	۹۱٦
گرماي ويژه $C_p\,(j/kg.K^o)$	٤۱۸۲	۲۰۳۷
ضريب رسانش گرمایی $k(W/m.K^o)$	۰/٦	۲/۲
گرماي نهان $L(kj/kg)$	۳۳۵	
نقطه ذوب $T_m(^oK)$	۲۷۳	
ويسكوزيته $\mu(kg/m.s)$	۰/۰۰۱	



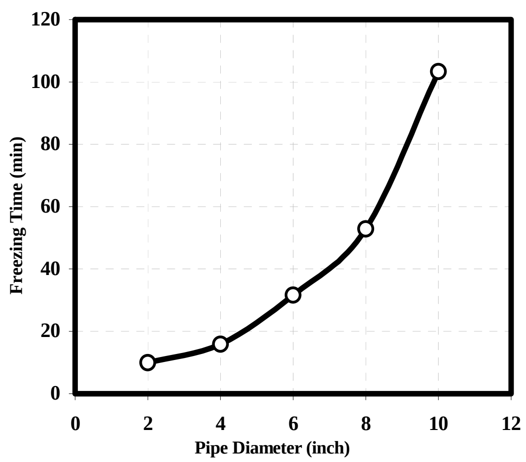
شکل ۳- نمايشي از هندسه و شبكه استفاده شده.



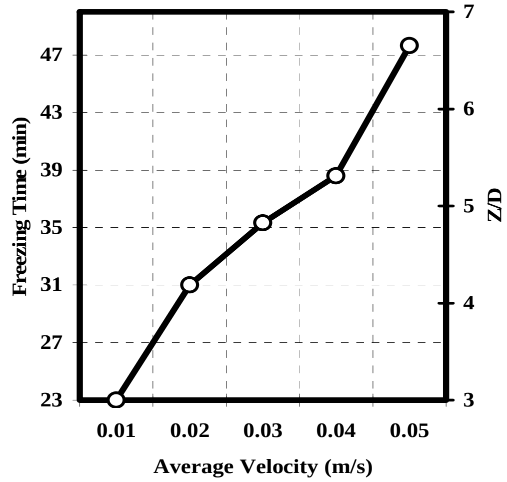
شکل ۴- مقایسه نتایج عددی و داده های تجربی [۱۲].



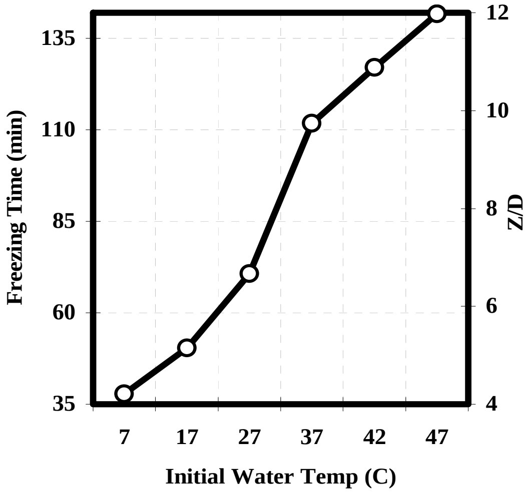
شکل ۵- تغییرات زمان انجماد، طول بی بعد و دمای اولیه.



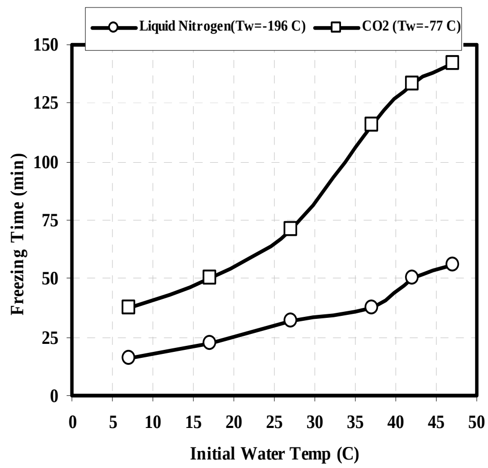
شکل ۶- تغییرات زمان انجماد بر حسب قطر لوله



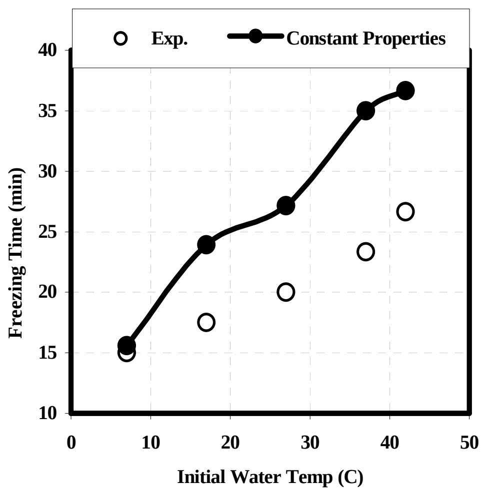
شکل۷- تغییرات زمان انجماد، طول بی‌بعد، سرعت



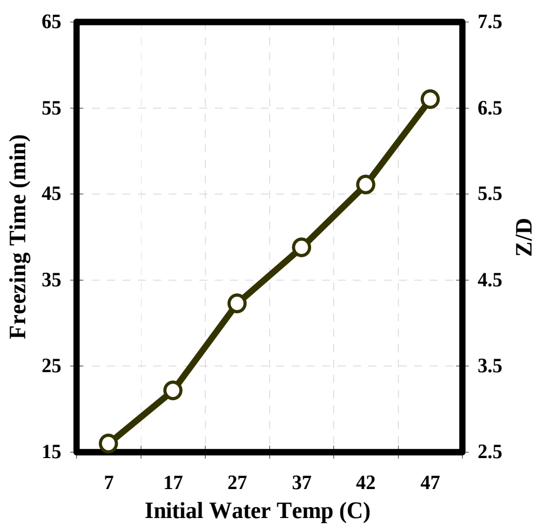
شکل۱۰- تغییرات زمان انجماد براي دي اکسید کربن



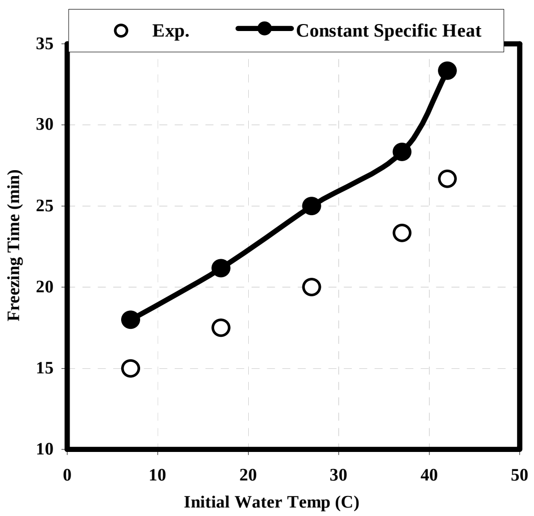
شکل۸- تغییرات زمان انجماد، دماي اولیه، دماهاي سطح



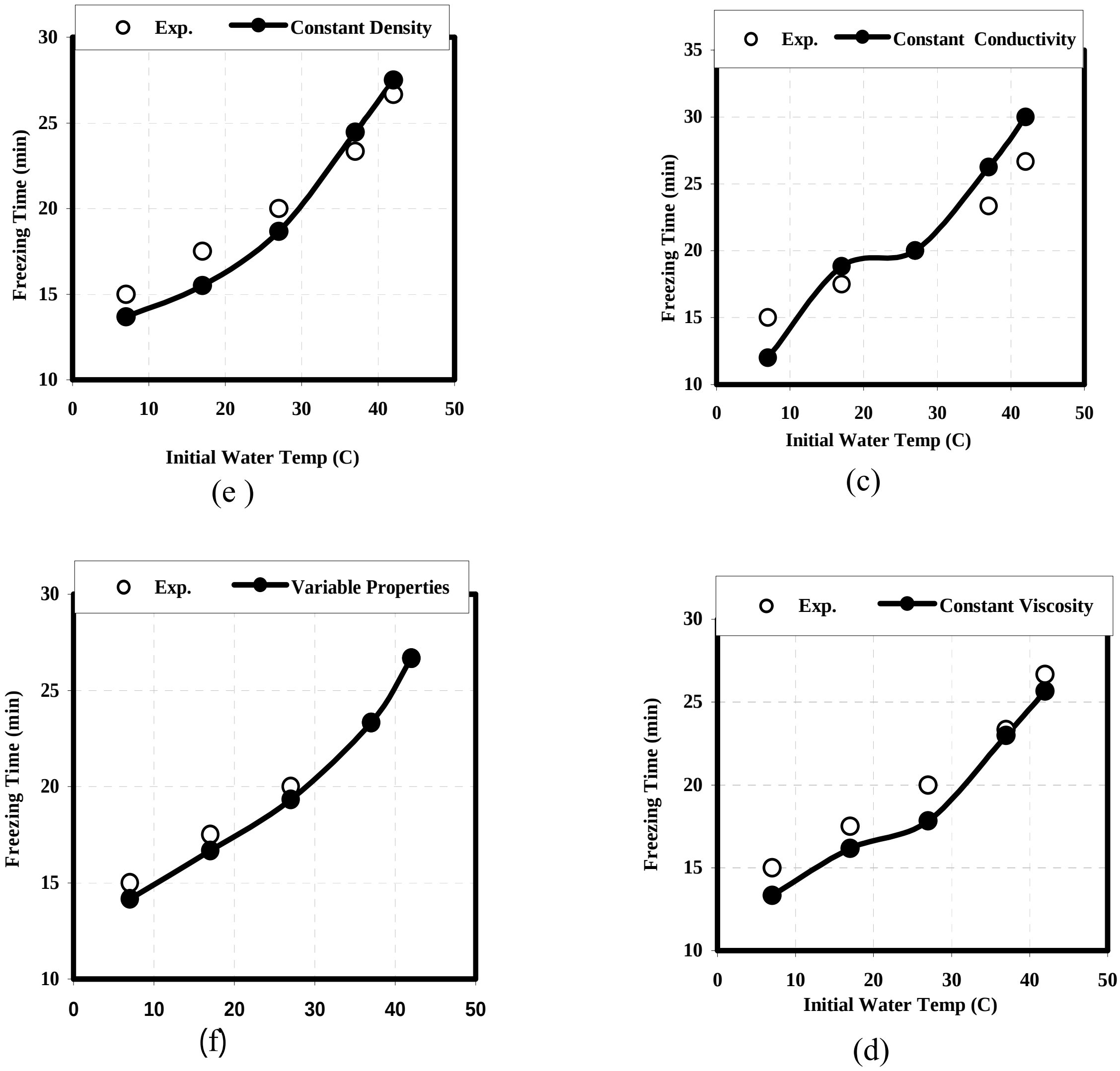
(a)



شکل۹- تغییرات زمان انجماد براي نیتروژن مایع



(b)



شکل ۱۱- تغییرات زمان انجماد، دماهاي ورودي سيال با ثابت و متغير فرض نمودن خواص سيال.