پانزدهمين كنفرانس سالانه (بين المللي) مهندسي مكانيک ISME2007
ايران ، تهران، دانشگاه صنعتي امير كبير ۲۵-۲۷ ارديبهشت ۱۳۸۶
ISME2007-2556

بررسي عددي تاثير تغييرات خواص سيال بر پديده‌هاي دو فازي

اميركريمي
كارشناس ارشد - دانشگاه تبريز، دانشكده فني مهندسي مكانيک
rima_karimi@yahoo.com

محمد حسن جوارشكيان
دانشيار - دانشگاه تبريز، دانشكده فني مهندسي مكانيک
djavaresh@tabrizu.ac.ir

چكيده
در كار حاضر تاثير تغييرات خواص سيال بر پديده دو فازي انجماد در مختصات استوانه‌اي با استفاده از شبيه سازي جريان سيال درون لوله در حال انجماد با بكارگيري روش آنتالپي- چشمه مبنا به صورت عددي بررسي شده است. در اين شبيه سازي معادلات ناوير استوكس با استفاده از روش حجم محدود در يک شبكه متحول شده (staggered) جهت ذخيره متغيرها، حل شده‌اند و فشار به عنوان متغير اصلي مي‌باشد. با توجه به كاربرد روش انجماد در اغلب صنايع، به خصوص در مواردي كه اختلاف دما بسيار زياد است، لذا لزوم بررسي تاثير تغييرات خواص سيال در فرايند انجماد امري ضروري به نظر مي رسد. در همين راستا در اين پژوهش از خواص فيزيكي سيال آب در فازهاي مايع و جامد استفاده شده است. به منظور اعتبار بخشي به نتايج بدست آمده از شبيه سازي عددي، مقايسه‌اي بين داده هاي استخراجي با نتايج تجربي موجود در ادبيات فن انجام شده است، كه در نهايت با متغير گرفتن خواص سيال آب، تطابق مطلوبي بين آنها ديده مي‌شود و مبين صحيح بودن روند عددي توسعه داده شده و تصديق استخراج نتايج مي باشد.
كلمات كليدي: دو فازي- انجماد- آنتالپي - چشمه مبنا- خواص سيال

مقدمه
در ميان پديده هاي دو فازي، فرايند انجماد به دليل اينكه در محدوده وسيعي از فرايندهاي صنعتي همانند فراوري فلزات، سرمايش غذا، فرايندهاي ريخته گري، مهندسي محيط زيست، تجمع يخ در بالهاي هواپيما، ذوب برف و يخبندان زمين، سرمايش زمين، افزايش حجم خاک حاصل از يخبندان، يخ زدگي سازه هاي دريايي و هوايي، خطوط انتقال سيال و سيستم‌هاي ذخيره انرژي كاربرد دارد، از اهميت فراواني برخوردار شده است.
از فرايند انجماد به عنوان مسائل مرز متحرک كه مسائل استفان نيز ناميده مي شوند، عنوان مي شود. با توجه به اينكه در اين مسائل، حد مشترك فاز هاي سيال و جامد از ديواره به سمت مركز لوله حركت مي‌كند و با افزايش حجم فاز جامد شار حرارتي ديواره در نتيجه افزايش مقاومت حرارتي در ماده ذوب نشده كاهش مي‌يابد، انسداد جريان زماني رخ خواهد داد كه طول لوله براي جلوگيري از رسيدن حد مشترك سيال/ جامد به تعادل پايدار بين گرماي آزاد شده از سيال و هدايت فاز جامد، به اندازه كافي بزرگ باشد.
در اوايل روشهاي تحليلي مانند روش نيومن و روش انتگرالي تعادل حرارتي به منظور حل مسائل تغيير فاز بكار برده مي شدند. اما با توجه به اينكه اين روش ها براي مسائل چند بعدي و پيچيده جوابگو نبودند، روش هاي عددي مانند 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 گرداب(Stream function vorticity) ، متغير اوليه(Primitive variable) و روش آنتالپي (Enthalpy) جايگزين شدند[۱]. در كار حاضر به منظور شبيه سازي پديده انجماد در مختصات استوانه‌اي از تلفيق دو روش آنتالپي و چشمه مبنا استفاده شده است. هدف از اين پژوهش مشخص كردن زمان انجماد لازم براي بررسي تاثير خواص سيال آب در پديده انجماد مي‌باشد. از محققيني كه سالهاي اخير پديده انجماد را مورد مطالعه قرار داده اند مي توان به موارد زير اشاره كرد.
Aldousari [۲] پيشرفت فشار درون لوله محدود شده محتوي آب كه يخ در آن رشد مي‌كند را بررسي كرد و چندين روش ممكن براي ثابت نگهداشتن فشار در حين تعميرات، به منظور عدم تركيدگي لوله در حين تعميرات ناشي از افزايش فشار آب محدود شده، ارائه داد. انتقال حرارت دو بعدي و انجماد جريان آرام درون لوله‌هاي با قطر كم، به صورت عددي با نرم افزار فلوئنت (FLUENT) توسط Conde[۳] تحليل شده و با نتايج تجربي مقايسه گرديه است، كه بيانگر تطابق مطلوبي است.
Jeong و همكارانش[۴] به منظور بررسي تاثيرات قطر لوله و طول سرمايش بر روي شكل گيري توپ يخي در فرايندهاي انجماد با استفاده از نيتروژن مايع در تعميرات خطوط لوله را به صورت تجربي و تئوري انجام دادند و به اهميت بالاي اين دو فاكتور در شكل گيري يخ پي بردند. Richardson و همكارانش [۵] از پديده انجماد به عنوان يک پديده با ارزش به منظور انجماد موضعي لوله، كه به طور افزاينده‌اي در صنعت به منظور حل مسائل نگهداري و تعميرات خطوط لوله استفاده مي‌شود، نام برده اند. آنها همچنين ملاحظه كردند كه در استفاده از اين روش به منظور انسداد كامل جريان در اندازه لوله محدوديت بوجود مي آيد. و دليل اين امر را مربوط به اين نكته دانستند كه يخ و ساير سيالات هنگام مواجه شدن با حالت انجماد به هادي‌هاي حرارتي

ضعيفي تبديل شده و باعث عايق شدن مايع باقي مانده در مركز لوله مي‌شوند. همچنين مسيلر و همكارانش[۶] مشاهده كردند كه در نيروگاه‌ها، صنايع پتروشيمي و صنايع مربوط به انتقال سيال، در طول عمليات تعمير و نگهداري، گاهي اوقات جدا كردن موقت بخشي از لوله اجتناب ناپذير مي باشد. آنها به اين نتيجه رسيدند كه زمانيكه وسائل مكانيكي ديگري مانند دريچه‌ها و شيرها وجود ندارند، روش انجماد لوله مي‌تواند به عنوان روش نويني جايگزين شود. در اين روش با قرار دادن مبدل حرارتي اطراف قسمتي از لوله و پر كردن مبدل از نيتروژن مايع، آب داخل لوله در نتيجه تشكيل توپ يخي در لوله منجمد خواهد شد و امكان انجام هرگونه تعميرات بدون تخليه و شارژ دوباره سيتم وجود خواهد داشت. همچنين آنها به دليل اختلاف دماي بسيار زياد ايجاد شده در سيستم، بررسي مقاومت ساختار لوله وخواص سيال را توصيه كردند

Akyurt و همكارانش [۷] مطالعات زيادي را در مورد انجماد آب انجام دادند. آنها بيان كردند كه چگالي بسياري از مواد، زماني كه سرد مي‌شوند بيشتر مي شود. همچنين Zaretsky و همكارانش [۸] معادله‌اي براي تخمين پيشرفت كرنش خزشي موقت يخ بر حسب خصوصيات ساختاري، تنش و دماي آن ارائه دادند. Braga و همكاران [۹] تاثير تغييرات چگالي بر انجماد آب در ديواره عمودي يک حفره مستطيلي را به صورت تجربي مطالعه كردند.

در اكثر تحقيقات انجام شده براي حل مسئله انجماد، تنها فاكتور خاصي مورد مطالعه قرار گرفته است و در بررسي زمان انجماد سيال در كاربردهاي صنعتي روش انجماد خواص سيال حتي با وجود اختلاف دماي زياد بين سيال و ديواره، ثابت و مستقل از دما در نظر گرفته شده است و از تغييرات خواص بر حسب دما چشمپوشي شده است. در اين تحقيق به منظور بررسي تاثير تغييرات خواص فيزيكي سيال بر حسب دما در فرايند انجماد در مختصات استوانه اي، تمام خواص فيزيكي سيال (آب) بر فرايند انجماد در دو حالت ثابت و متغير با دما مورد بررسي قرار گرفته و با نتايج تجربي مقايسه گرديده است.

معادلات اساسي و روابط حاكم

معادلات اساسي حاكم بر جريان سيال تراكم ناپذير ناپايدار غير لزج در مختصات استوانه‌اي با تقارن محوري $(v_\theta = 0)$ شامل معادله پيوستگي، معادله اندازه حركت و معادله انرژي مي شود، كه صورت زير ارائه مي شوند[۱۰]:

معادله پيوستگي:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_r)+\frac{\partial}{\partial z}(v_z)=0 \qquad (۱)$$

معادله اندازه حركت در جهت شعاع:

$$\rho\left(\frac{\partial v_r}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=\rho g_r-\frac{\partial p}{\partial r} \qquad (۲)$$

معادله اندازه حركت در جهت محور:

$$\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z} \qquad (۳)$$

معادله انرژي:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h)+div(\rho hU)=-p\,divU+div(k\,grad\,T) \qquad (۴)$$

آنتالپي بر حسب دما، براي تغيير فاز غيرهمدما، به صورت زير بيان مي‌شود[۱۱]:

$$h=\begin{cases}C_sT & T<T_s \quad solid\ \ phase\\ C_{in}T+L(F_R) & T_s\le T\le T_l \quad solid/liquid\\ C_lT & T>T_l \quad liquid\ \ phase\end{cases} \qquad (۵)$$

در روش چشمه مبنا، گرماي اضافي از منبع حرارتي مانند گرماي نهان در طول انجماد به شكل ترم اضافي منبع در فرم عمومي معادله انرژي وارد مي‌شود و با استفاده از روش آنتالپي، گرماي محسوس و گرماي نهان به ترم‌هاي گذرايي از انرژي تقسيم مي‌شوند و معادله انرژي به فرم زير در مي‌آيد[۱۲]:

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}+div(\rho CTU)=-p\,divU+div(k\,grad\,T)+S \qquad (۶)$$

كه عبارت چشمه بر حسب گرماي نهان به شكل زير تعريف مي‌شود:

$$S=-\rho L\frac{\partial(F_R)}{\partial t} \qquad (۷)$$

در مسائل تغيير فاز به دليل اينكه حد مشترك ذوب/يخ به طور واضحي از هم جدا نيستند از F_R ، نسبت حجم مايع به كل حجم سلول محاسباتي، براي هر سلول در نواحي محاسباتي استفاده مي‌شود. ناحيه‌اي كه مقدار درصد مايع بين صفرو يك بوده و دماي آن محدوده‌اي بين يكي از فازهاي مايع يا جامد 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[۱۱]:

$$F_R=\begin{cases}1 & T>T_l\\ (T-T_s)/(T_l-T_s) & T_s\le T\le T_l\\ 0 & T<T_s\end{cases} \qquad (۸)$$

البته با توجه به اينكه در بكارگيري روش انجماد با استفاده از مبردهاي صنعتي مانند نيتروژن مايع و همچنين فرايندهاي ، ذوب و ريخته گري مواد، فراوري فلزات و مواد تغيير فاز دهنده (PMC) اختلاف دما بسيار زياد است، لذا متغير در نظر گرفتن خواص ماده و بررسي تاثيرات آن و مقايسه با خواص ثابت ماده از اهميت زيادي برخوردار مي باشد. در همين راستا در اين پژوهش خواص فيزيكي ثابت سيال آب در فازهاي مايع و جامد مطابق جدول (۱) و خواص واسته به دما مطابق روابط ارائه شده در نظر گرفته شده است.

جدول۱- خواص فيزيكي ثابت سيال آب.

خاصيت فيزيكي	فاز مايع	فازجامد
چگالي $\rho(kg/m^3)$	۹۹۸	۹۱۶
گرماي ويژه $C_p(j/kg.K)$	٤۱۸۲	۲۰۳۷
ضريب هدايت حرارتي $k(W/m.K)$	۰/٦	۲/۲
گرماي نهان $L(kj/kg)$	۳۳٥	
نقطه ذوب $T_m(K)$	۲۷۳	
ويسكوزيته $\mu(kg/m.s)$	۰/۰۰۱	

در مراجع [۱۱] و [۱۳] تغييرات خواص آب در فازهاي 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 خواص فيزيكي فاز مايع بر حسب دما:

$$\rho_l = 999.8 + 0.067T - 89\times10^{-4}T^2 + 8\times10^{-5}T^3 - 6\times10^{-7}T^4 \quad (۹)$$

كه در اين رابطه دما بر حسب درجه سانتي گراد مي باشد. ساير خواص فيزيكي فاز مايع آب شامل گرماي ويژه، ضريب رسانش گرمايي و گرانروي بر حسب دماي مطلق طبق روابط استخراجي زير در شبيه سازي اعمال شده اند:

$$C_l\,(kJ/kg.\,K) = 8.95 - 0.04\,T + 10^{-4}.T^2 - 10^{-7}.T^3 \quad (۱۰)$$

$$k_l\,(W/m.K) = 0.812\times\exp(-0.0005\,T) - 0.247\times\exp(-0.0106\,T) \quad (۱۱)$$

$$\mu(N.s/m^2) = 0.00179\times\exp\left[6.18\times10^7\left(\frac{1}{T^3}-\frac{1}{(273.15)^3}\right)\right] \quad (۱۲)$$

تغييرات دمايي خواص فيزيكي فاز جامد بر حسب دماي مطلق:

$$\rho_s = 949.948\times\exp(-0.000125\,T) - 1.86\times10^{-13}\times\exp(0.109\,T) \quad (۱۳)$$

$$C_s\left(kJ/kg.^0K\right) = 7.07\times T^{1.016} - 0.122 \quad (۱۴)$$

$$k_s\left(W/m.^0K\right) = 6.99949.948\times\exp(-0.00408\times T) \quad (۱۵)$$

خواص سيال در فازهاي مايع و جامد طبق روابط و مقادير مشخص در محاسبات اعمال شده و براي ناحيه خميري(Mushy Zone)، خواص طبق رابطه زير به صورت تركيبي از خواص فاز مايع و جامد در نظر گرفته شده است.

$$\lambda_{in} = \lambda_s + F_R(\lambda_l - \lambda_s) \quad (۱۶)$$

كه λ_{in} را مي‌توان چگالي، گرماي ويژه و ضريب رسانش گرمايي در ناحيه دو فازي در نظر گرفت.

شرايط مرزي

در شرط مرزي ورودي پروفيل يكنواخت سرعت براي جريان غير قابل تراكم و توسعه يافته در نظر گرفته شده است. همچني با توجه به اينكه از شرط مرزي متقارن در شبيه سازي سيال در مختصات استوانه اي استفاده شده است، لذا تغييرات گراديان فشار، دما و سرعت در جهت عمودي برابر صفر قرار همانطور كه گفته شده در بكارگيري روش انجماد به عنوان شيوه اي نوين در تعميرات خطوط لوله از مبرد نيتروژن مايع استفاده مي شود، در اين مطالعه از شرط مرزي دما ثابت براي ديواره لوله استفاده گرديده است. با توجه به اين نكته كه در روش آنتالپي، در مرز تغيير فاز نيازي به اعمال هيچگونه شرط مرزي نيست، در اين شبيه سازي نيز در مرز متحرك شرط مرزي اعمال نشده است.

حل عددي

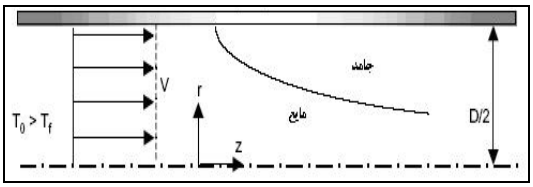
در اين شبيه سازي كليه معادلات ذكر شده به هم وابسته بوده و به طور همزمان براي هر سلول محاسباتي حل مي شوند. گسسته سازي معادلات با استفاده از روش حجم محدود (FVM) انجام شده است.

براي حل عددي معادلات حاكم از الگوريتم سيمپل (SIMPLE) استفاده شده است. رد تبديل معادلات ديفرانسيل به معادلات جبري، نيز از روش كاملا ضمني نسبت به زمان استفاده شده است. همچنين براي محاسبه جمله جابجايي از روش تفاضل بالادست مرتبه دو (Second Order Upwind) استفاده گرديده و معادلات جبري بدست آمده بوسيله روش تكراري خط به خط حل شده اند. لذا براي رسيدن به جوابهاي همگرا انتخاب گام زماني (وقتي خطا به ۰/۱% برسد) لازم است. در اين شبيه سازي گام زماني طوري انتخاب شده كه شرط پايداري برآورده شود و زمان توقف برنامه بر مبناي رشد لايه هاي فاز جامد تا مركز لوله در نظر گرفته شده است.

نتايج

در اين شبيه سازي به منظور بدست آوردن نتايج مستقل از شبكه، از شبكه با ۱۵۰*۵۰ سلول استفاده شده است.همانطور كه اشاره شد، در اكثر مطالعات قبلي بررسي فرايند انجماد در مختصات استوانه اي به منظور استفاده در صنايع مختلف با در نظر گرفتن خواص ثابت سيال صورت گرفته است. لذا به منظور بررسي تغييرات خواص و تاثير آنها بر زمان انجماد، در اين پژوهش نتايج حل عددي با خواص فيزيكي ثابت و متغير سيال آب با داده‌هاي تجربي موجود در ادبيات فن [۱۴]مقايسه شده است.

در اين تحقيق شبيه سازي فرايند انجماد در يک لوله ۴ اينچي با دماي سطح ثابت ۷۷ درجه كلوين (از نيتروژن مايع به عنوان مبرد استفاده شده است) و شرايط وودي دمايي مختلف، كه بالاتر از نقطه انجماد سيال مي باشد، براي سيال انجام شده است(شكل ۱).



شكل ۱ - شماتيكي از مدل فيزيكي

كليه خواص سيال آب به صورت مستقل از دما و ثابت مطابق جدول (۱) در محاسبات اعمال شده است و با نتايج تجربي موجود در مرجع[۱۴] مقايسه گرديده است. همانطور كه در شكل ۲ مشاهده مي شود زمان انجماد بدست آمده ناشي از حل عددي با داده هاي تجربي تفاوت بسيار زيادي دارد كه به صرفنظر كردن از تغييرات خواص سيال در فرايند انجماد برمي گردد. لذا با توجه به اختلاف بوجود آمده به اين نكته پي مي‌بريم كه در نظر گرفتن خواص فيزيكي مستقل از دما براي سيال در هر فاز باعث ايجاد خطاي زيادي در روند شبيه سازي مي‌شود. بنابراين به منظور بررسي تاثير تک تک خواص موثر بر پديده انجماد، يكي از خواص را متغير و بقيه را ثابت در نظر مي‌گيريم.

با توجه به اهميت چگالي و تغييرات آن در دماهاي مختلف ابتدا به بررسي چگالي و تاثير آن بر زمان انجماد مي پردازيم. نتايج حاصل از حل عددي با متغير در نظر گرفتن چگالي به صورت تابعي از دما در فازهاي مايع و جامد مطابق روابط ذكر شده و ثابت در نظر گرفتن بقيه خواص سيال در شكل ۳ آورده شده است. همچنين اين نتايج با داده هاي تجربي مقايسه شده است. همانطور كه ملاحظه مي شود اختلاف نتايج تا حدودي نسبت به ثابت در نظر گرفتن كليه خواص كمتر شده است. اين امر نشان دهنده اهميت تاثير تغييرات چگالي در فرايند انجماد مي باشد. دليل اين اثر را مي توان در تغييرات چگالي در هر دو فاز مايع و جامد نسبت به دما دانست. هر چند كه اين تغييرات در فاز جامد بدليل تغيير خصوصيات يخ بيشتر مي باشد.

در شبيه سازي بعدي به بررسي تاثير ضريب هدايت حرارتي بر پديده انجماد پرداخته شده است. در اين شبيه‌سازي ضريب هدايت حرارتي وابسته به دما در هر يک از فازهاي مايع و جامد با توجه به روابط بدست آمده در برنامه اعمال شده است و بقيه خواص حتي چگالي نيز ثابت در نظر گرفته شده اند. نتايج بدست آمده از اين شبيه سازي با مقايسه با نتايج تجربي در شكل ۴ نشان داده شده است. همانطور كه در شكل ملاحظه مي‌شود اختلاف بين نتايج عددي و تجربي نسبت به شكل ۲ كمتر شده است كه خود بيانگر تغييرات قابل ملاحظه ضريب هدايت حرارتي نسبت به زمان مي باشد. لذا با توجه به اهميت جمله هدايت در معادلات حاكم، تغييرات ضريب هدايت حرارتي نقش مهمي را در حل معادلات و روند حل صحيح تر خواهد داشت.

در شكل ۵ به بررسي تاثير طرفيت گرمائي ويژه در زمان انجماد پرداخته شده است. با ثابت گرفتن در نظر گرفتن كليه خواص بجز ظرفيت گرمائي ويژه براي هر فاز، شبيه‌سازي مربوطه صورت گرفته و با نتايج تجربي مقايسه شده است. همانطور كه ملاحظه مي شود، اختلاف بين نتايج عددي و داده‌هاي تجربي نسبت به حالتي كه كليه خواص ثابت در نظر گرفته شد، بسيار كمتر شده كه مبين كاهش تقريبي اختلاف بين نتايج است. دليل اين امر را مي‌توان در تاثير ظرفيت گرمايي ويژه بر آنتالپي در معادله انرژي و همچنين تغييرات زياد ظرفيت گرمايي ويژه نسبت به دما در هر دو فاز جامد و مايع دانست.

تاثيرات وابستگي گرانروي به دما با متغير گرفتن بقيه خواص در شكل۶ نشان داده شده است. با توجه به شكل مي‌توان نتيجه گرفت كه حتي با وجود متغير در نظر گرفتن گرانروي، همچنان اختلاف قابل تجهي بين نتايج عددي و داده هاي تجربي وجود دارد كه به دليل ثابت بودن گرانروي در فاز جامد و تغييرات ناچيز آن در فاز مايع دانست. همچنين با توجه به اينكه در اين شبيه سازي، فرايند انجماد در محدوده وسيعي از دماهاي مربوط به فاز جامد صورت مي گيرد، لذا اين امر منطقي به نظر مي رسد.

همانطور كه در اشكال ۲ تا ۶ مشاهده شد، با متغير در نظر گرفتن نك نك خواص اختلاف بين نتايج شبيه سازي و داده هاي تجربي حتي در مورد خواص بسيار موثر نيز وجود داشت، لذا در شكل ۷ كليه خواص ذكر شده مطابق روابط ارائه شده و به صورت متغير با دما در شبيه سازي اعمال شده اند. همانطور كه در شكل مشاهده مي شود تطابق بسيار مطلوبي بين نتايج حاصل از حل عددي و داده هاي تجربي وجود دارد. اين امر بيانگر اهميت تاثير متغير در نظر گرفتن خواص مواد در فرايندهاي دو فازي، بخصوص پديده هايي كه اختلاف دما در آنها زياد است، مي باشد. هر چند كه تغيير خواص در اختلاف دماهاي بالا امري طبيعي است اما در اغلب تحقيقات انجام شده قبلي از اين مهم صرفنظر شده است، كه در اين پژوهش اهميت اين موضوع با استفاده از شبيه سازي فرايند انجماد به روشني نشان داده شده است.

نتيجه گيري

در اين تحقيق به منظور بررسي و شبيه سازي عددي فرايند دو فازي انجماد در يک لوله افقي حاوي سيال آب، روند عددي مبتني بر روش آنتالپي- چشمه مبنا توسعه داده شده است. با توجه به اهميت پديده انجماد در اغلب فرايندهاي فيزيكي در صنايع، تاثيرتغييرات خواص فيزيكي سيال آب بر فرايند انجماد در اين پژوهش بررسي شده است. با توجه به نتايج حاصله از شبيه سازيهاي انجام شده مي‌توان دريافت كه ثابت در نظر گرفتن خواص فيزيكي سيال در فرايند انجماد باعث ايجاد خطاي زيادي در نتايج مي شود. لذا با متغير گرفتن خواص و وابستگي آنها به دما در هر فاز، مي توان به نتايج مطلوب تري رسيد كه مقايسه نتايج شبيعه سازي ناشي از اين فرض با نتايج تجربي و تطابق مناسب آنها در شكل ۷ اين امر را تصديق مي كند.

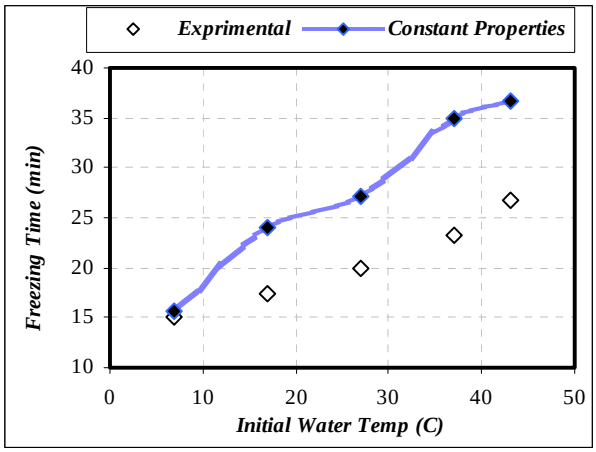
بررسي نتايج نشان مي دهد كه كليه خواص فيزيكي سيال در هر فاز با توجه به تغييرات دما در هر سلول در پديده انجماد، به دماي آن سلول بستگي داشته و در طول فرايند انجماد تغيير مي‌كند. همچنين از نتايج شكل۶ نيز مي‌توان براي اعتبار بخشي به روند عددي استفاده كرد. به طوري كه نتايج بدست آمده از شبيه‌سازي‌هاي اوليه و تطابق بسيار مطلوب نتايج در اين شكل روند عددي برنامه توسعه داده شده را تائيد مي‌كند.

فهرست علائم

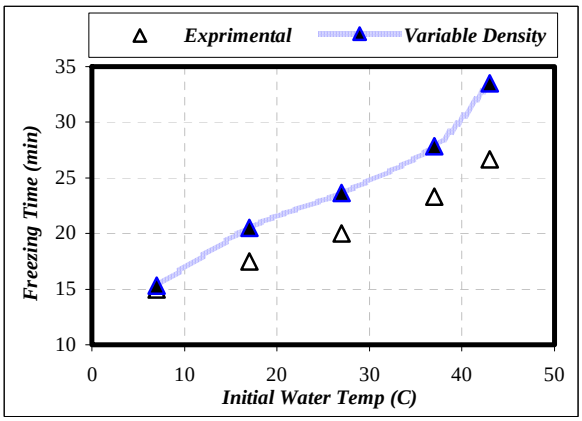
Z	راستاي محوري
r	راستاي شعاعي
v	سرعت
t	زمان
ρ	چگالي
p	فشار
T	دما
h	آنتالپي
U	مولفه سرعت
L	ظرفيت گرماي نهان
k	ضريب هدايت حرارتي
C	ظرفيت گرمايي ويژه
S	جمله چشمه
F_R	درصد حجمي مايع به كل حجم سلول محاسباتي
μ	گرانروي
λ	خاصيت سيال

زيرنويسها

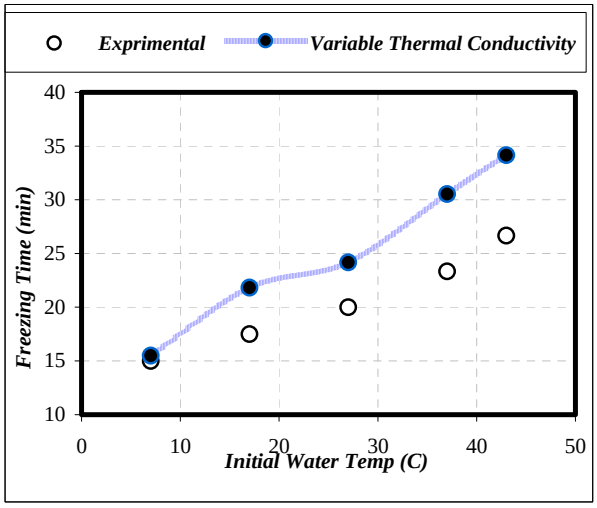
Z	مولفه محوري
r	مولفه شعاعي
s	جامد
l	مايع
in	حد فاصل فازهاي مايع و جامد
f	نقطه انجماد



شكل ٢- تغييرات زمان انجماد سيال با خواص فيزيكي ثابت بر حسب دماهاي مختلف ورودي



شكل ٣- تغييرات زمان انجماد بر حسب دماهاي متفاوت ورودي سيال با چگالي متغير با دما



شكل ٤- تغييرات زمان انجماد سيال با ضريب هدايت حرارتي متغير با دما بر حسب دماهاي مختلف ورودي

مراجع

1- Henry, Huy., and Stavros, A Argyropoulos.1996, “Mathematical modelling of solidification and melting”, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. Vol 4, pp. 371–396,.

2- Aldousari, S, 2007, "Utilization of Phase Change for Sealing and Pressurization of Tubular Elements", J KAAU: Engineering Sciences, v 15 n 2, p 89-107.

3- Conde, R., Parra, M. T., Castro, FJ., Villafruela, M., Rodríguez, M. A and Méndez, C. 2004. Numerical model for two-phase solidification problem in a pipe. Applied Thermal Engineering,Volume24, Issues17-18, December, Pages2501-2509.

4- Jeong, Seong, Young Sik;.2002."Numerical analysis of phase change and natural convection phenomena during pipe freezing process", American Society of Mechanical Engineers, v 448, n 2, p 145-149.

5- Richardson, R. N. , R. J. Bowen, A. Sharman,2003," Accelerated Pipe Freezing in Non-circular ections",Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A; Vol. 81 Issue 4, p467, 7p.

6- Messelier-Gouze, Clarisse; Brezillon, Christian; Tubiana, Andre; Rousseau, Gilles, 2002 "Justification of the use of liquid nitrogen to make ice-plugs in carbon-manganese steel pipes for maintenance purposes in nuclear power plants", ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, v 443, n 2, p 45-50.

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

8- Zaretsky, Chumichev 1996. "Ice behaviour under load" ,International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 23, Issue 5 , September-October, Pages 679-685.

9- Braga, S. L. and R. Viskanta, 1992, "Effect of density extremum on the solidification of water on a vertical wall of a rectangular cavity", Experimental Thermal and Fluid Science Volume 5, Issue 6, November, Pages 703-713.

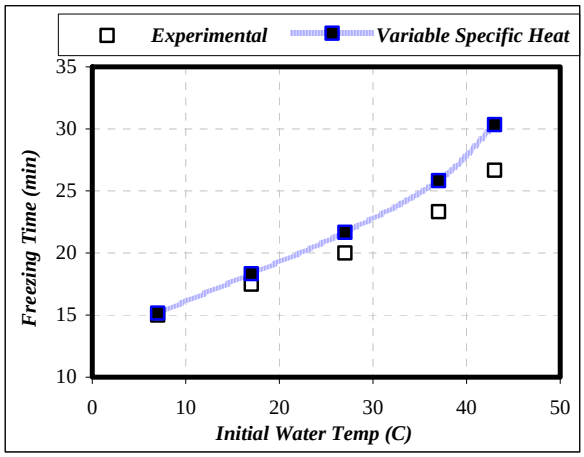
10- Özmutlu Ö., Hartmann, C., Delgado, A. 2004,“Visualization of Temperature and Velocity Fields during Phase Change of Water under High Hydrostatic Pressure”*Fachausschusssitzung"Lebensmittelverfahrenstechnik"*, 22-24 March 2004, Germany Baden.

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

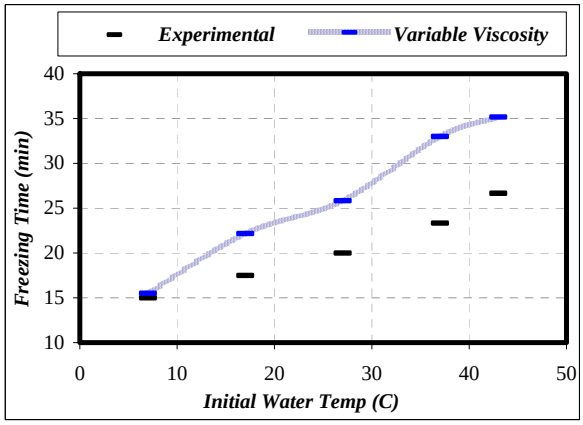
12- Voller V R and Swaminathan C R 1991, "General source-based method for solidification phase change", Numerical Heat Transfer 19 175–89

13-.Darius, Mottaghy and Volker, Rath., 2006. "Latent heat effects in subsurface heat transport modelling and their impact on palaeotemperature reconstructions,". Geophys. J. Int 164, pp236–245.

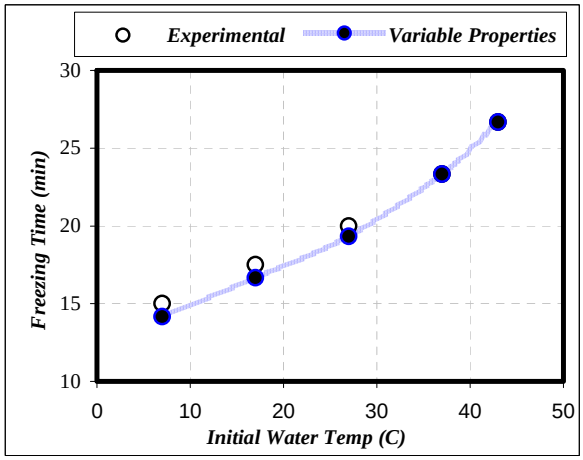
14-Keary, A. C. and Bowen, R. J. 1998, "Analytical study of the effect of natural convection on cryogenic pipe freezing". International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume41, Issue10, May, pp1129-1138.



شكل ٥- تغييرات زمان انجماد در دماهاي متفاوت ورودي سيال با در نظر گرفتن ظرفيت حرارتي ويژه متغير با دما



شكل ٦- تغييرات زمان انجماد سيال با اعمال گرانروي وابسته به دما در دماهاي مختلف ورودي



شكل ٧- تغييرات زمان انجماد با در نظر گرفتن متغير بودن كليه خواص نسبت به دما در دماهاي ورودي متفاوت