

((یادداشت مهندسی))

انجماد موضعی خطوط لوله حاوی مایعات به منظور

فراهم کردن امکان تعمیرات

سید ابراهیم موسوی ترشیزی^۱ و علی جهانگیری^۲

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

دانشگاه شهید بهشتی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰)

چکیده

یکی از مشکلات موجود بر سر راه تعمیرات خطوط لوله حاوی سوخت، و یا هر نوع مایع دیگری در واحدهای صنعتی و یا تأسیسات ساختمان‌های عمومی و مسکونی، وجود سیال در داخل آن و عدم امکان جدا نمودن بخش آسیب دیده از کل سیستم، جهت تعمیرات و همچنین جلوگیری از اتلاف سیال می‌باشد. طرح حاضر سعی در معرفی روشی مبتنی بر استفاده از انجماد در تعمیرات خطوط لوله را دارد که ضمن حذف عملیات تخلیه لوله در محل، استفاده از آن را به عنوان تکنیک برتر توصیه می‌کند. در این روش، با تولید سرما در بیرون لوله و در دو طرف منطقه آسیب دیده، سیال در لوله منجمد شده و مانعی در مسیر جریان سیال به وجود می‌آورد. عمل انجماد با بستن یک پوشش مبرد موقت به دور لوله صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، محل آسیب دیده از بقیه خط لوله جدا شده و تعمیر می‌شود و پس از تعمیرات با برداشتن سیستم خنک‌کن، انجماد از بین رفته و خط لوله مجدداً قابل بهره‌برداری می‌شود. در این تحقیق، معادله انجماد با روش حل عددی مبتنی بر انتگرال گیری سیمپسون حل شده و زمان انجماد سیال در لوله با شرایط مرزی مختلف (قطر لوله، نوع و سرعت سیال و...) محاسبه شده است. در انتها، نتایج در روش فوق با نتایج به دست آمده از انجام آزمایش روی دستگاهی که به همین منظور طراحی و ساخته شده، مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: خطوط انتقال مایع، تعمیرات، انجماد، مبرد، ازت مایع

Local Freezing of Liquid Pipelines, in Order to Provide Repairs

S.E. Moussavi-Torshizi A. Jahangiri

Department of Mechanical & Energy Engineering
Shahid Beheshti University, Tehran

(Received: 08/ October/2017 ; Accepted: 10/ January/2018)

ABSTRACT

One of the problems in repairing pipelines containing fuels or any other liquid in industrial units or public and residential buildings is impossibility of separating damaged part of the whole path for repair, avoiding waste of fluid. The present design attempts to introduce a method based on use of freezing in pipeline repairs, which, while removing pipe discharge operations locally, recommends it as a superior technique. In this method, by producing cold condition outside the pipe and on both sides of the damaged part, the fluid is frozen in the tube and creates an obstacle in the fluid flow path. The freezing operation is performed by closing a temporary refrigerant coating around the tube. Thus, the damaged part is separated from the rest of the pipeline and is repaired. In this research, the freezing equation was first calculated by numerical solution based on Simpson's integration, and the duration of freezing of the fluid in a tube with different boundary conditions (pipe diameter, type and fluid velocity, etc.) was calculated. At the end, the results of the numerical methods were compared with the results of the experiment on a device designed for this purpose.

Keywords: Pipelines, Repairs, Freezing, Refrigerant, Liquid Nitrogen

۱- دانشجویار: e_moussavi@sbu.ac.ir

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): a_jahangiri@sbu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

h_i	ضریب جابجایی در مرز مشترک یخ و مایع، $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
k	ضریب هدایت حرارتی، $W/(m \cdot ^\circ C)$
L	طول لوله، m
L_f	گرمای نهان ذوب یخ، J/kg
q	گرمای، W
r_i	شعاع داخلی لوله، m
r_o	شعاع خارجی لوله، m
t	زمان، second
T	دما، $^\circ C$

علائم یونانی

ρ	جرم مخصوص یخ، kg/m^3
δ	ضخامت یخ، m
زیرنویس	
fr	نقطه انجماد
ice	یخ
L	مایع درون لوله
$pipe$	لوله
s	سطح خارجی لوله

۱- مقدمه

استفاده از روش‌های نوین نگهداری و تعمیرات (نت) به منظور پیشگیری از حوادث غیرمترقبه به طور روز افزون مورد توجه مدیران و کارشناسان صنایع مختلف می‌باشد [۱]. استفاده از انجماد موضعی خطوط لوله حاوی مایعات به منظور فراهم کردن امکان تعمیرات و مانع از اتلاف سیال و توقف طولانی واحد می‌گردد [۲]. محققین مختلفی علاوه بر ایجاد دستگاه عملیاتی برای انجماد موضعی خطوط لوله به بررسی تحلیلی و عددی در این حوزه پرداخته‌اند [۳-۷]. در این مقاله ابتدا اهمیت کاربرد روش انجماد در تعمیر خطوط لوله در واحدهای صنعتی و یا تأسیسات ساختمان‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس انواع روش‌های موجود در این زمینه معرفی شده و به ارائه مشخصات نمونه دستگاه ساخته شده جهت انجماد موضعی لوله پرداخته خواهد شد. در ادامه به منظور بررسی پدیده مذکور در لوله حاوی جریان، حل عددی معادله انجماد مبتنی بر روش انتگرال‌گیری سیمپسون انجام شده و تأثیر پارامترهای مختلف (مانند سرعت جریان، لوله، دما و نوع سیال) بر زمان انجماد ارائه می‌گردد. در انتها نتایج تجربی ناشی

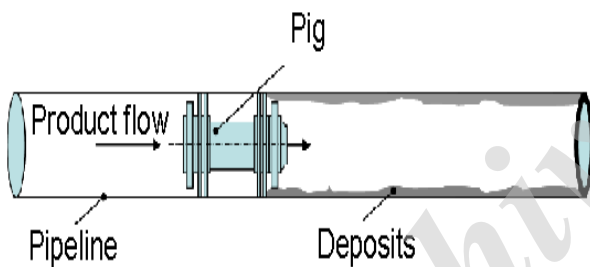
از انجام آزمایش انجماد برای سیالات آب و گازوئیل بر روی لوله‌های با اندازه ۲ و ۳ اینچ ارائه و با نتایج سایر روش‌ها مقایسه خواهد شد.

۲- روش انجماد

روش‌های مختلفی برای تعمیر و نگهداری خطوط حاوی سیالات به شرح زیر استفاده می‌شود:

- در ابتدایی‌ترین روش، لوله در محل تعمیرات بریده می‌شود؛ که به کارگیری چنین روشی به دلیل تخلیه سیال در محل از دیدگاه زیست محیطی و ارزش اقتصادی سیال توصیه نمی‌شود.

- روش پیگ^۱: مطابق شکل ۱، در این روش، پیگ، که دقیقاً هم اندازه لوله است از یک طرف وارد لوله شده و پشت سر آن گاز بی‌اثر وارد می‌گردد تا لوله را از سیال خالی کند [۱]. از معایب این روش می‌توان هزینه‌های شارژ و هواگیری سیستم را ذکر کرد.



شکل (۱): استفاده از روش پیگ برای تخلیه لوله از سیال به منظور انجام تعمیرات.

- روش انجماد: در این روش نخست بخش صدمه دیده با بستن شیر ورودی از کل خط لوله جدا می‌شود. سپس یک نوع پوشش ژاکتی و یا محفظه فلزی اطراف لوله را در منطقه آسیب دیده گرفته و از آن یک ماده شیمیایی غیر مضر به عنوان مبرد (سردکننده) که اغلب نیتروژن مایع و یا دی اکسید کربن است، عبور داده می‌شود. حرارت از سیال داخل لوله به ماده شیمیایی سردکننده منتقل شده و بدین ترتیب مایع داخل لوله منجمد شده و قسمت آسیب دیده را از طرفین آن جدا می‌کند و امکان تعمیر موضعی شامل برشکاری، جوشکاری و یا هر عمل دیگری را فراهم می‌آورد [۲]. محفظه می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد بر این اساس انواع دستگاه‌های انجماد عبارت‌اند از [۸]:

۳) روش اسپری گاز: این روش یک روش قدرتمند و قوی در انجماد خطوط لوله می‌باشد زیرا تنها با استفاده از پاشش گاز دی اکسید کربن به اطراف لوله مورد نظر عمل انجماد صورت می‌گیرد. ویژگی خاص این روش قابل حمل بودن کپسول گاز است. با توجه به قابلیت فوق، کاربرد خاص آن در تأسیسات خانگی و صنعتی می‌باشد.

۴) استفاده از لوله‌های مسی: در این روش با عبور گاز دی اکسیدکربن از لوله‌های مسی که به اطراف لوله مورد نظر پیچانده می‌شود، محل مورد نظر سرد شده تا جایی که با گذشت زمان سیال درون لوله منجمد می‌شود.

مزیت عمده روش‌های انجماد خطوط لوله، از نقطه نظر زیست محیطی می‌باشد. زیرا از تخلیه سیال لوله در محیط جلوگیری می‌شود. این مطلب برای سیالات سمی و انواع سوخت‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. علاوه بر ویژگی مذکور، روش فوق از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد. آنجا که به دلیل اهمیت واحد صنعتی امکان توقف و تخلیه کامل خطوط انتقال نمی‌باشد، روش انجماد صرف نظر از نوع سیال، قابلیت تعمیر خطوط انتقال را بدون تخلیه لوله و یا توقف کامل واحد صنعتی میسر می‌سازد.

۳- حل عددی انجماد

به منظور بررسی شرایط مختلف کاری و تخمین زمان انجماد سیال داخل لوله، حل عددی انجماد انجام شده است. در این حالت همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده فرض بر این است که دمای سطح خارجی لوله مساوی دمای مبرد می‌باشد و در نتیجه از ضریب انتقال حرارت جابجایی در جداره خارجی لوله صرف نظر شده است. در شکل ۵ نیز کلیه مقاومت‌های مربوط به انتقال حرارت در یک لوله در حال انجماد نشان داده شده است. در معادله انرژی برای انتقال حرارت در فازهای مختلف، مقادیر حرارت منتقل شده به صورت زیر بیان می‌شود [۹]:

q_1 : مقدار گرمای لازم جهت تغییر دمای مایع تا صفر درجه سانتی‌گراد،

q_2 : مقدار گرمایی که صرف انجماد لایه‌ای از مایع به ضخامت

δ می‌شود (گرمای لازم جهت تغییر فاز) و

۱) پوشش ژاکتی: در این روش مطابق شکل ۲ به منظور پوشش محفظه اطراف لوله از نوعی نایلون حرارت داده شده استفاده می‌شود. کاربرد عمده روش مذکور برای لوله‌های با قطر کم و با استفاده از گاز دی اکسید کربن به عنوان مبرد می‌باشد،

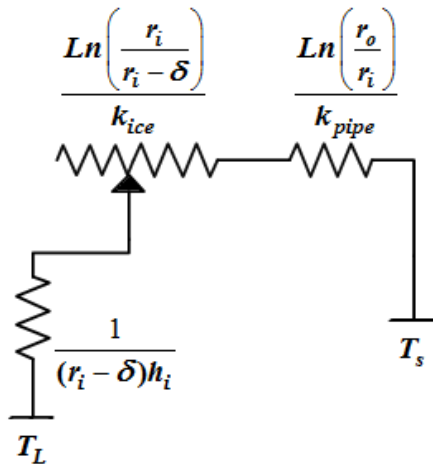
۲) محفظه فلزی: از این نوع دستگاه مطابق شکل ۳ برای انجماد لوله با سایزهای مختلف به خصوص لوله‌های با قطر زیاد استفاده می‌شود. به دلیل استفاده از نیتروژن مایع به عنوان مبرد در این دستگاه، زمان انجماد بسیار پایین‌تر از سایر دستگاه‌های انجماد می‌باشد. لذا به دلیل اهمیت کوتاه شدن زمان انجماد و مقدار نیتروژن مصرفی، استفاده از این دستگاه رایج‌تر می‌باشد،



شکل (۲): انجماد سیال به وسیله دستگاه انجماد نوع پوشش ژاکتی



شکل (۳): انجماد سیال به وسیله دستگاه انجماد نوع پوشش محفظه فلزی



شکل (۵): مقاومت‌های حرارتی مربوط به انتقال حرارت در یک لوله در حال انجماد

با استفاده از قانون بقای انرژی و موازنه حرارتی بین مقادیر حرارت منتقله می‌توان نوشت:

$$q_1 + q_2 = q_3,$$

$$\Rightarrow \frac{T_L - T_{fr}}{1} + \rho L_f [2\pi(r_i - \delta)L] \frac{d\delta}{dt} = \frac{T_{fr} - T_s}{\frac{Ln\left(\frac{r_i}{(r_i - \delta)}\right)}{2\pi k_{ice} L} + \frac{Ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k_{pipe} L}} \quad (1)$$

با استفاده از معادله (۱) که رابطه بین ضخامت و زمان انجماد یخ را نشان می‌دهد و با تعریف پارامترهای بی‌بعد زیر، زمان انجماد محاسبه می‌شود.

$$\delta^* = Ln\left(\frac{r_i}{r_i - \delta}\right) \Rightarrow ds = (r_i - \delta) ds^* \quad (2)$$

$$t^* = \frac{(T_{fr} - T_s) k_{ice} t}{r_i^2 \rho L_f},$$

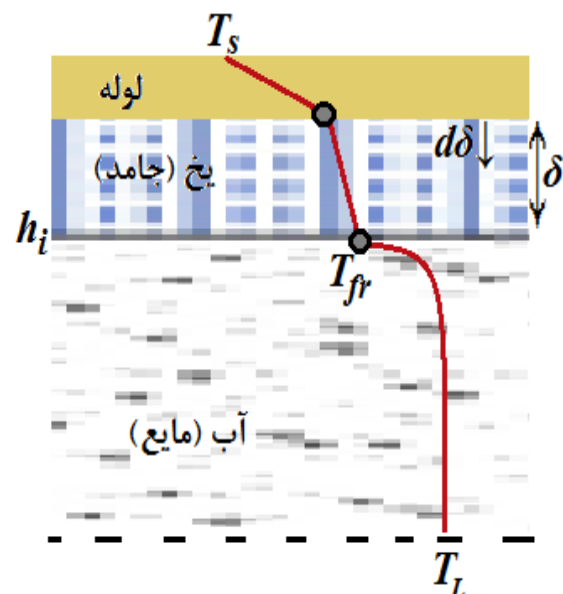
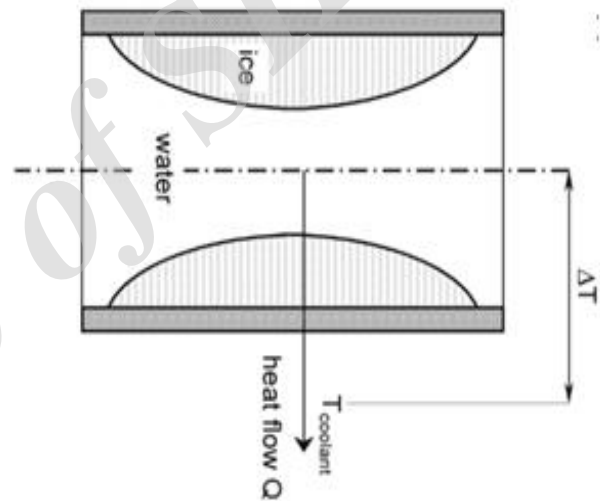
$$\Rightarrow dt = \frac{r_i^2 \rho L_f}{(T_{fr} - T_s) k_{ice}} dt^* \quad (3)$$

$$k^* = \frac{k_{ice}}{k_{pipe}} Ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (4)$$

$$T^* = \frac{T_L - T_{fr}}{T_{fr} - T_s} \quad (5)$$

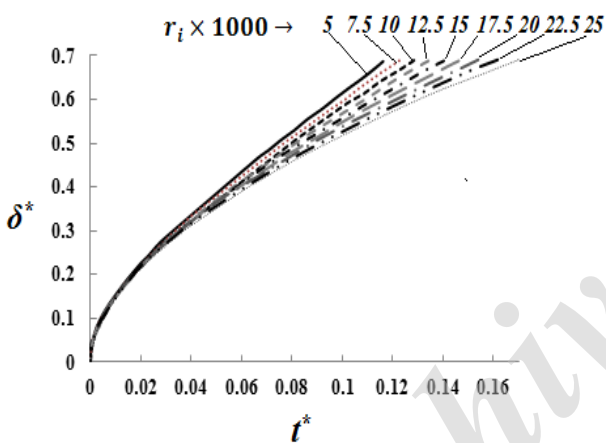
q_3 : انتقال حرارت هدایتی ناشی از گرمای منتقل شده از مقاومت هدایتی جداره منجمد یخ و جداره لوله.

در این تحقیق به دلیل وجود رابط تقارن و تاثیر ناچیز هدایت در راستای محوری، مطابق شکل ۴، بخش اصلی انتقال حرارت در راستای شعاعی و به سمت داخل لوله رخ داده است و بنابراین فرضیات توزیع دمایی یکنواخت و عدم وجود رسانش محوری در فاز جامد در نظر گرفته شده است. بنابراین فرض می‌شود که توده یخ به صورت استوانه توخالی باشد که به سمت داخل ضخامت آن افزایش می‌یابد. (یعنی انجماد از بدنه لوله شروع شده و به سمت مرکز لوله گسترش می‌یابد).



شکل (۴): شماتیکی از لوله در حال انجماد.

در نمودار شکل ۶ ضخامت شکل گیری یخ به صورت بی بعد بر حسب زمان انجماد بی بعد t^* برای شعاع‌های مختلف لوله برای سیال آب با سرعت ورودی ۱ m/s و دمای ۱۵ °C و مبرد نیتروژن مایع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده اولیه می‌شود با افزایش شعاع لوله، زمان انجماد به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد که این افزایش با زیاد شدن ضخامت یخ شکل گرفته داخل لوله بیشتر نیز می‌شود. دلیل این افزایش را می‌توان در افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش جابجایی اجباری دانست. لازم به ذکر است که برای داشتن انسدادی کامل باید مقاومت هدایتی فاز جامد (یخ) بر مقاومت جابجایی فاز مایع غلبه کند در غیر این صورت انسداد رخ نخواهد داد.



شکل (۶): زمان انجماد بی بعد بر حسب افزایش ضخامت بی بعد به ازای دماهای مختلف ورودی آب بر حسب شعاع‌های مختلف لوله.

در نمودار شکل ۷ زمان انجماد بی بعد سیال آب داخل لوله با قطر ۲ اینچ و با سرعت‌های ورودی مختلف ورودی آب بر حسب افزایش ضخامت بی بعد به دست آمده است. مطابق نمودار شکل ۷ با افزایش دمای ورودی سیال، زمان انجماد به‌خصوص برای انسداد کامل جریان (در ضخامت‌های بیشتر یخ) به‌صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. چراکه افزایش دمای ورودی سیال باعث افزایش جابجایی طبیعی و در نتیجه افزایش مقاومت جابجایی فاز مایع می‌شود و همان‌طور که ذکر شد زمان بیشتری برای غلبه مقاومت هدایتی فاز جامد نیاز می‌باشد.

با جایگذاری این پارامترهای بی بعد در رابطه (۱) معادله بی بعد (۶) نوشته می‌شود.

$$\frac{\left(\frac{r_i - \delta}{r_i}\right)^2 (\delta^* + k^*)}{1 - T^* \frac{h_i}{k_{ice}} (r_i - \delta)(\delta^* + k^*)} d\delta^* = dt^* \quad (6)$$

با توجه به اینکه برای حل معادله باید تمامی پارامترهای متغیر بی بعد باشند لذا با استفاده از تعریف δ^* به صورت معادله (۷)، معادله (۶) نیز به صورت بی بعد مطابق رابطه (۸) زیر بازنویسی می‌شود.

$$\delta^* = Ln\left(\frac{r_i}{r_i - \delta}\right) \Rightarrow \left(\frac{r_i - \delta}{r_i}\right)^2 = \exp(-2\delta^*), \quad (7)$$

$$\frac{\exp(-2\delta^*)(\delta^* + k^*)}{1 - T^* \frac{h_i}{k_{ice}} r_i \exp(-\delta)(\delta^* + k^*)} d\delta = dt^* \quad (8)$$

به منظور حل معادله فوق از روش‌های انتگرال گیری عددی (قاعده سیمپسون) به صورت معادله (۹) استفاده شده است.

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x) dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] \quad (9)$$

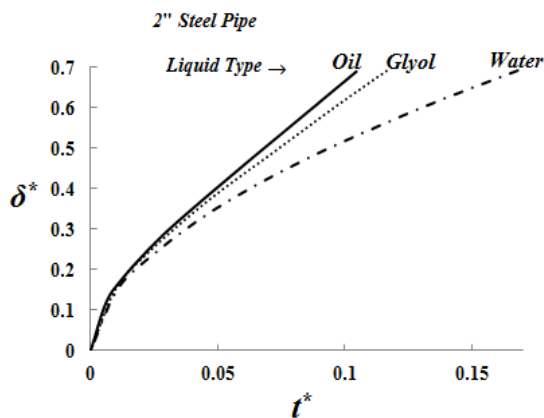
در رأس رابطه:

$$h = \frac{(x_2 - x_0)}{2} = \frac{\delta^*}{2}, \quad (10)$$

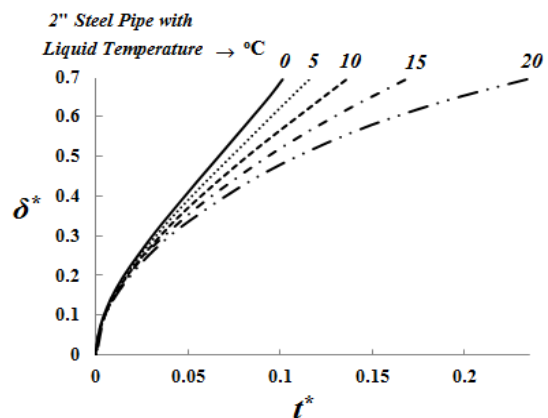
$$f(x) = -\frac{\exp(-2\delta^*)(\delta^* + k^*)}{1 - T^* \frac{h_i}{k_{ice}} r_i \exp(-\delta)(\delta^* + k^*)} \quad (11)$$

هدف از حل معادلات، به دست آوردن زمان انجماد سیال درون لوله بر حسب پارامترهای مختلف است. بدین منظور معادلات به صورت عددی حل و نتایج به شرح زیر استخراج گردیده‌اند.

با توجه به اهمیت زمان انجماد در امر تعمیرات خطوط لوله و همچنین اطلاع از انسداد کامل جریان و یا به عبارت دیگر منجمد شدن کل سیال داخل لوله و نیز تأثیرپذیری فرآیند انجماد از پارامترهای مختلف، نتایج حاصله بر اساس زمان انجماد بی بعد بر حسب ضخامت یخ شکل گرفته بی بعد بیان شده‌اند.



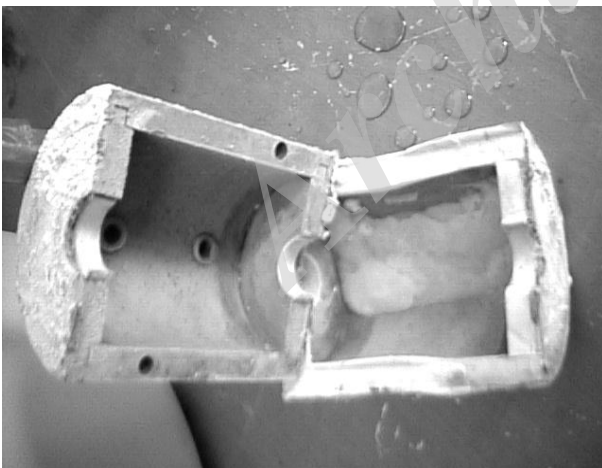
شکل (۹): زمان انجماد بی بعد در سیالات مختلف بر حسب افزایش ضخامت بی بعد.



شکل (۷): زمان انجماد بی بعد به ازای دماهای مختلف آب ورودی بر حسب افزایش ضخامت بی بعد.

۴- معرفی سیستم آزمایشگاهی ساخته شده

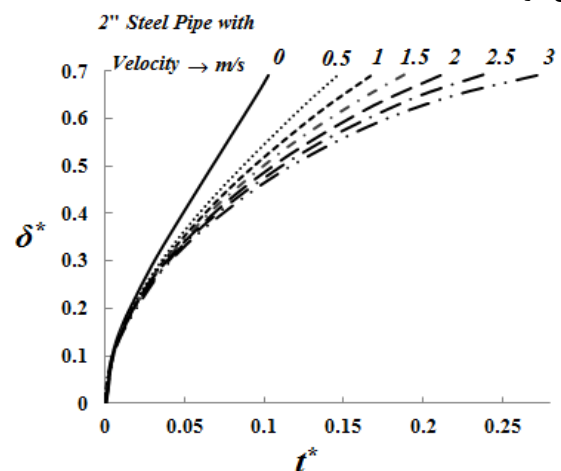
با توجه به کاربردهای روش‌های انجماد در پتروشیمی‌ها، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، تصفیه‌خانه‌ها و تأسیسات منازل مسکونی؛ سبک، قابل حمل و ارزان بودن و همچنین استفاده آسان آن پارامترهایی است که در طراحی مدنظر قرار گرفته است. طرح پیشنهادی دستگاه شامل یک محفظه فلزی است که با احاطه کردن اطراف لوله، سرمایش آن را میسر می‌سازد. این قسمت از آلیاژ آلومینیوم و به روش ریخته‌گری و ماشین‌کاری مطابق شکل ۱۰ ساخته شده است.



شکل (۱۰): بدنه اصلی دستگاه انجماد پس از انجام آزمایش.

به منظور استفاده از یک بدنه اصلی برای اندازه‌های مختلف لوله، تعدادی فک قابل تعویض متناسب با قطر خارجی لوله‌ها برای آن تعبیه شده است. اتصال این فک‌ها به بدنه دستگاه با قرار دادن نوعی آب‌بند (مثل لاستیک) در سطح تماس و با اعمال اندکی فشار دو قطعه بر هم صورت می‌گیرد. بدین

به منظور بررسی تأثیر سرعت سیال بر زمان انجماد، زمان انجماد بی بعد آب داخل لوله با قطر ۲ اینچ و دمای اولیه 15°C و مبرد نیتروژن مایع به ازای سرعت‌های مختلف آب ورودی بر حسب افزایش ضخامت بی بعد در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق این نمودار افزایش سرعت که افزایش جابجایی را به همراه دارد باعث افزایش زمان انجماد می‌شود. با توجه به اهمیت گرمای نهان ذوب سیالات و همچنین نقطه ذوب آنها در فرآیند انجماد، در نمودار شکل ۹ زمان انجماد بی بعد سیالات مختلف در یک لوله فولادی با قطر ۲ اینچ، دمای اولیه 15°C ، سرعت ورودی 1 m/s و مبرد نیتروژن مایع بر حسب افزایش ضخامت بی بعد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود آب به دلیل اینکه گرمای نهان بیشتری نسبت به روغن و گلیکول دارد، دیرتر منجمد می‌شود.



شکل (۸): زمان انجماد بی بعد بر حسب افزایش ضخامت بی بعد به ازای سرعت‌های مختلف ورودی.

به منظور اتصال لوله‌های گاز به بدنه اصلی و ارتباط آن با مخزن ذخیره نیتروژن مایع، از لوله‌های دو جداره با لایه خارجی از جنس فولاد ضدزنگ استفاده می‌گردد. اتصالات مذکور به روش پیچ و مهره به صورت نیمه دائمی به طرفین متصل می‌گردد.

از آنجایی که این دستگاه گاهی توسط افراد غیر متخصص ممکن است مورد استفاده قرار می‌گیرد (تأسیسات خانگی، بیمارستان‌ها و ...)، سهولت بهره‌برداری از آن حائز اهمیت می‌باشد. این امر شامل عایق‌کاری صحیح دستگاه، استفاده از مخازن نگهداری ازت و اتصالات صحیح مخزن با دستگاه می‌باشد.

۵- نتایج و بحث

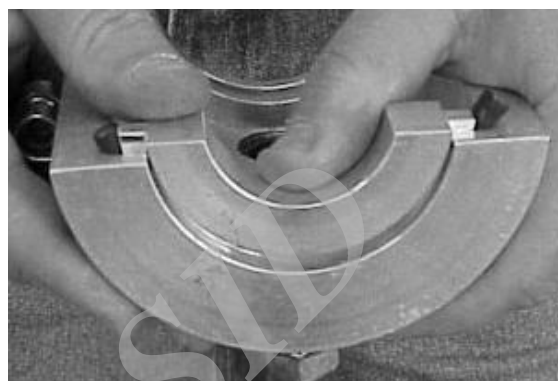
با توجه به شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ یک دستگاه آزمایشگاهی جهت بررسی کاملتر فرآیند و زمان انجماد تهیه شده است و پس از ثبت زمان انجماد مقطع آزمون لوله حاوی سیال آب و لوله حاوی سیال گازوئیل در جدول ۱ مشاهده می‌گردد که زمان انجماد کامل جریان گازوئیل در لوله با سایز ۳/۴ اینچ برابر هفت دقیقه و برای جریان آب در لوله ۲ اینچ برابر سیزده و نیم دقیقه بوده است. نتایج حاصل از انجام آزمایش مطابق جدول ۱ مؤید فرضیات و منطبق بر روند حل روش عددی می‌باشد.

جدول (۱): مقایسه مقادیر به دست آمده از آزمایش انجماد با حل عددی.

نوع سیال	سایز لوله (اینچ)	زمان انجماد	
		نتایج عددی	نتایج آزمایش
آب	۲	۱۰	۱۳/۵
گازوئیل	۳/۴	۵	۷

شکل ۱۳ بیانگر شارهای حرارتی برحسب نسبت شعاع‌های یخ و لوله است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقاومت‌های هدایتی و جابجایی تأثیر بسزایی در انسداد جریان دارند. بنابراین انسداد جریان زمانی رخ خواهد داد که مقاومت هدایت حرارتی فاز جامد بر مقاومت جابجایی فاز مایع غلبه کند.

ترتیب همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود اتصال این دو بخش دائمی نبوده و با اعمال نیرو به محل اتصال، قابل جدا شدن می‌باشد. جهت جلوگیری از خروج نیتروژن مایع از اطراف محفظه نیز می‌توان از نوعی فوم به عنوان آب‌بند استفاده نمود.



شکل (۱۱): جانمایی پولکی در بدنه اصلی دستگاه.

از محل اتصال بدنه دستگاه به لوله عموماً نشت نیتروژن مایع اتفاق می‌افتد. لذا این نقاط نیز مطابق شکل ۱۲ بایستی آب‌بندی گردد.

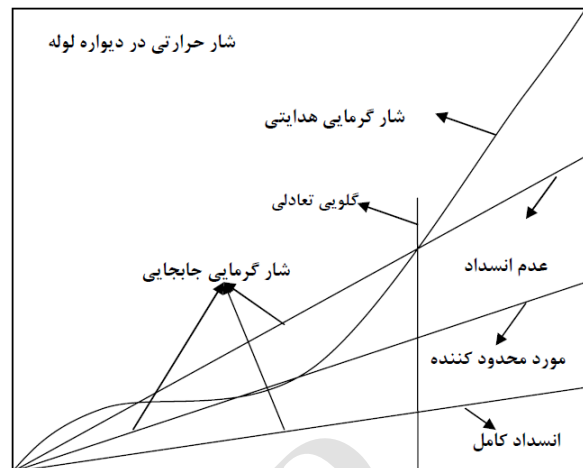


شکل (۱۲): نصب آب‌بندها در محل اتصال لوله با محفظه.

مخازن ازت مایع بایستی به صورت خود تحت فشار^۱ باشد. در این حالت با توجه به نقطه جوش نیتروژن مایع، با اعمال اندکی فشار از مجرای ورودی تانک؛ ازت می‌جوشد و فشار مخزن بالا می‌رود. این افزایش فشار سبب بالا رفتن نیتروژن از لوله خروجی تانک می‌گردد.

۷- مراجع

1. Bequette, B.W. "Process Control: Modeling, Design, and Simulation", Prentice Hall Professional, New Jersey, United States, 2003.
2. Najafi, M. "Trenchless Technology Piping: Installation and Inspection: Installation and Inspection", McGraw Hill, Ohio, United States, 2010.
3. Bowen, R.J., Stone, H., Martin, C.I., and Richardson, R.N. "Modelling of Accelerated Pipe Freezing", Chemical Engineering Research and Design. Vol. 82, pp.1353-1359, 2004.
4. Saad, A. "Utilisation of Phase Change for Sealing and Pressurisation of Tubular Elements", JKAU: Eng. Sci, Vol. 15, No. 2, pp.89-107, 2004.
5. Richardson, R.N., Bowen, R.J., and Sharman, A. "Accelerated Pipe Freezing in Non-circular Sections", Trans. IChemE, Part A, Chem. Eng. Res. Des., Vol. 81, pp.467-473, 2003.
6. Martin, C.I., Richardson, R.N., and Bowen, R.J. "The Cryogenic Freezing of Non-metallic Pipelines", Proc. Inst. Refrig, Vol. 7, pp.1-12, 2003.
7. Martin-Nown, C. "Freeze Isolation of Polymer Pipeline Using Cryogenic Liquids", Ph.D Dissertation, School of Engineering Sciences, University of Southampton, 2008.
8. Shah, R.K., and Sekulic, D.P. "Fundamentals of Heat Exchanger Design", John Wiley & Sons, New York, United States, 2003.
9. Özişik, M.N. "Heat Conduction", John Wiley & Sons, New York, United States, 2012.



شکل (۱۳): شارهای حرارتی هدایتی و جابجایی بر حسب نسبت شعاع گلویی یخ به لوله.

۶- نتیجه گیری

از مقایسه نتایج آزمایش با مقادیر به دست آمده از طریق حل عددی مشاهده می شود زمان انجماد سیال در آزمایش از سایر مقادیر بیشتر بوده و اختلاف آن عمدتاً به دلیل عدم اعمال شرایط آزمایش از جمله عایق سازی کامل و ... می باشد. با توجه به اینکه زمان انجماد با افزایش شعاع لوله، دما و سرعت سیال ورودی بیشتر می شود، می توان نتیجه گرفت که انسداد جریان زمانی رخ خواهد داد که مقاومت هدایت حرارتی فاز جامد بر مقاومت جابجایی فاز مایع غلبه کند.