شبکه‌بندی و آنالیز انتقال حرارت در صورت غیر دائم برای یک لوله درون خاک با در نظر گرفتن عایق در زیر لوله

محمدرضا نیک‌نژادی
گروه مکانیک دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر

چکیده

بررسی انتقال حرارت حول یک لولهٔ مدفون از نظر کاربردی اهمیت ویژه‌ای داشته و تاکنون به شکل‌های متفاوت مورد توجه محققان بوده است. آنچه که در این مقاله تحقیق شده بررسی انتقال حرارت در شرایط سه بعدی و غیر دائم برای یک لوله درون خاک در صورتی که از بالا با سطح زمین و از پایین با عایق محدود شده است می‌باشد. یکی از ویژگی‌های این تحقیق آن می‌باشد که در طراحی شبکه‌بندی مسئله پیش‌بینی نقاط نامنظم پدیدار شده در سطح زمین و سطح عایق شده است، شرایط بررسی این مسئله در صورتی است که اثرات دمایی سطح زمین بر لوله بررسی می‌شود و از خصوصیات مهم این تحقیق آن است که آنالیز انتقال حرارت نه تنها در اطراف لوله بلکه برای مایع داخل لوله نیز انجام پذیرفته است. جهت حل معادلات حاکم بر مسئله از روش سه مرحله ضمنی با جهت متغیر (ADI) که به صورت نامشروط پایدار است و برای مایع داخل لوله از طرح تفاضل آپ ویند(upwind) استفاده شده است. نتایج مسئله برای مایع داخل لوله همچنین توزیع دما در اطراف لوله از یک طرف تا سطح زمین و از سمت دیگر تا سطح عایق استخراج شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مقدمه

کامل‌ترین نوع بررسی انتقال حرارت برای لوله داخل خاک، در نظر گرفتن صورت مسئله در شکل سه بعدی همچنین شرایط غیر دائم می‌باشد که روند دنبال شده در این مسئله نیز به همین صورت است.

ولی غالب تحقیقات انجام شده پیرامون مسائل متشابه مشتمل بر راه حل‌های تحلیلی و روش‌های عددی است. از مهمترین امتیازات روش‌های عددی آن است که می‌تواند مسئله را با در نظر گرفتن کلیه ابعاد (سه بعد مکان و صورت غیر دائم) حل نماید، هر چند که بعضی از بررسی‌های عددی در بعدهای کمتری به بررسی مسئله می‌پردازد ولی از اهمیت این روش حل کاسته نمی‌شود. روش‌های تحلیلی به خاطر نداشتن خطا همچنین در مواردی تست روش‌های عددی شیوه مناسبی شمرده می‌شوند ولی از جمله نقاط ضعف این روش‌ها آن است که وسعت حل آنها با اضافه شدن بُعد کاهش می‌یابد. از جمله تحقیقات انجام شده پیرامون مسئله انتقال حرارت می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

بررسی انتقال حرارت برای جریان سیال در لوله‌های با جدار ضخیم به روش حل انتگرالی انجام شده است[۱].

روش حل انتگرالی در ارتباط با معادلات گرمای منتقل شده از سیال جاری درون لوله‌هایی با پوشش عایق [۲] که مسئله را در حالت دو بعدی و غیر دائم در نظر گرفته است. از موارد دیگر تحقیق شده در این مرجع عبور سیال از میان دو صفحه نیمه بی‌نهایت در حالی که پوششی از عایق سطح خارجی دو صفحه را پوشانده است می‌باشد.

از سمت دیگر بررسی افت حرارتی از لوله مدفون در یک زمین نفوذناپذیر متخلخل به صورت تلفیقی از حل تحلیلی و عددی در حالت دو بعدی با شرایطی مرزی انتقال حرارت از نوع جابجایی هم در سطح آزاد و هم درون لوله [۳] در دستگاه مختصات Bicylinderical انجام شده است.

بررسی حالتی از مسئله با این شرایط مرزی که دمای سطح زمین ثابت و در سطح لوله شار حرارتی (Heat Flux) ثابت در نظر گرفته شده است [٥-٤].

اشنایدر (Schneider) (1985) با استفاده از روش عددی و در نظر گرفتن شرایط مرزی جابجایی در سطح زمین و درون لوله با دیدگاهی که در آن لوله حامل سیال را وسیله‌ای برای انتقال انرژی گرمایی می‌نگرد [٦] و به همین سبب حرارت دفع شده از لوله که به شکل اتلاف حرارتی است مسئله را بررسی و این اتلاف را تحت شرایط مختلف عدد بایوت لوله و عدد بایوت زمین به دست می‌آورد. از مواردی که به شکل جدید در این تحقیق مطرح شده است محاسبهٔ اتلاف حرارتی برای زمانی است که کسری از سطح لوله با عایق پوشانده شده باشد و به عنوان مثال نموداری از خطوط هم تراز دمایی برای زمانی که ٤٤ درصد سطح لوله با عایق پوشانده شده را ارائه نموده است.

تحقیقاتی که بررسی سه بعدی و غیر دائم توزیع دما حول یک لولهٔ مدفون را دنبال می‌کند در مراجع [۸-۷] آورده شده‌اند که در آنها دما در سطح زمین ثابت و تأثیرات دمای سطح زمین بر روی لوله در یک محیط نیمه بی‌نهایت دنبال می‌شود به صورتی که از بالا با سطح زمین و از پائین در محیطی بی‌نهایت قرار گرفته است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

نگرش این تحقیق و فرضیات در نظر گرفته شده

هدف از این بررسی اثر دمای سطح زمین در درون خاک و مایع داخل لوله می‌باشد. در این دیدگاه بر روی سطح زمین انتقال حرارت جابجایی فرض می‌شود و مجموعهٔ مورد نظر نیز با یک دمای اولیه فرض می‌گردد و هیچ شرط مرزی مانند دمای ثابت برای لوله در نظر گرفته نمی‌شود. از جمله مواردی که در این بررسی مورد توجه قرار می‌گیرد مدت زمانی است که مایع تحت تاثیر نفوذ سرما، ناشی از سطح زمین انجمادش آغاز می‌گردد و طبیعی است عواملی نظیر شرایط متفاوت جابجایی در سطح زمین و یا عمق دفن لوله به دنبال آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. از آنجا که در این نگرش در نهایت تأثیر دمای سطح زمین به مایع داخل لوله مورد توجه بوده بنابراین توزیع دمایی برای مایع داخل لوله نیز بررسی شده است و رفتار مایع‌های متفاوت، با اعداد پرانتل همچنین در اعداد رینولدز مختلف نیز مورد توجه قرار گرفته است.

فرضیات در نظر گرفته شده برای مسئله مزبور به شرح زیر می‌باشد.

۱ـ درجه حرارت برای محیط (Tair) در طول یک بررسی ثابت فرض می‌گردد.

۲ـ ضریب انتقال حرارت جابجایی (H) در طول یک بررسی ثابت فرض می‌گردد.

۳ـ جنس زمین همگن و ایزوتروپ (Isotrope) است و جرم مخصوص نیز تابع دما نبوده و ثابت فرض می‌شود.

٤ـ ضریب هدایت حرارتی را برای کلیهٔ نواحی ثابت فرض می‌کنیم.

٥ـ جریان درون لوله را از لحاظ هیدرودینامیکی (Hydrodynamically) توسعه یافته فرض می‌کنیم.

٦ـ از نیروهای حجمی (Body Force) و انرژی پتانسیل (Potential Energy) مایع در حال حرکت صرف‌نظر می‌کنیم.

معادلات و شرایط مرزی مسئله

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده شکل کلی معادله انتقال حرارت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_z \frac{\partial T}{\partial Z} + \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) \qquad (۱)$$

که در این رابطه

$$\alpha_f = \frac{K_f}{\rho C_f} \qquad (۲)$$

ضریب بخش حرارتی مایع می‌باشد.

همانطور که می‌بینید یک جمله مربوط به انتقال حرارت از طریق جابجایی است و برای استفاده از این معادله در دیگر نواحی کافیست V_Z را مساوی صفر قرار دهیم که داریم:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial Z} \qquad (۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

که ضریب نفوذ حرارتی (α) ناحیهٔ مورد بحث برای دیوار درونی لوله ($R_i < r < R_o$) و درون خاک ($R_0<r$) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_p = \frac{k_p}{\rho_p C_p} \qquad \alpha_s = \frac{k_s}{\rho_s C_s} \qquad (۴)$$

شرط اولیه برای کل مجموعه در لحظهٔ $t = 0$

$$T=T0 \qquad (۵)$$

شرایط مرزی در جهت r:

$$r = R_i \quad \Rightarrow \quad T_f = T_p \ , \quad K_f (\frac{\partial T}{\partial r})_f = k_p (\frac{\partial T}{\partial r})_p \qquad (۶)$$

$$r = R_o \quad \Rightarrow \quad T_p = T_s \ , \quad K_p (\frac{\partial T}{\partial r})_p = K_s (\frac{\partial T}{\partial r})_s \qquad (۷)$$

$$r = \frac{YS}{\cos\theta} \quad \Rightarrow \quad -K_s (\frac{\partial T}{\partial r})_s = H(T_s - T_{air}) \qquad \theta < 90° \qquad (۸)$$

$$\boldsymbol{r = XF} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \boldsymbol{T}}{\partial \boldsymbol{r}} = \mathbf{0} \qquad \theta = \mathbf{90}° \qquad (۹)$$

$$r = \frac{-YA}{\cos\theta} \quad \Rightarrow \quad (\frac{\partial T}{\partial r})_{si} = 0 \qquad \theta > 90° \qquad (۱۰)$$

(۱۱) از شرط مرزی تقارن داریم:

$$r = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

شرط مرزی در جهت θ:

$$\theta = 0 \ , \ \theta = 180^{\circ} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \qquad (۱۲)$$

شرایط مرزی در جهت Z:

$$Z = 0 \quad \Rightarrow \quad T = T0 \qquad (۱۳)$$

$$Z = ZN \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial Z} = 0 \qquad (۱۴)$$

باید در نظر داشت که ZN فاصله ایست که اختلاف دما در جهت Z بسیار ناچیز و تقریباً برابر با صفر است.

شبکه‌بندی مسئله

ساختار شبکه‌بندی مسئله در یک سیستم مختصات استوانه‌ای (r,θ,Z) پی‌ریزی شده است. دستگاه مختصات استوانه‌ای معرفی شده طوری است که (θ,r,Z) به ترتیب در راستاهای i و j و K می‌باشند، مبداء شبکه در مرکز قسمت ورودی لوله در Z=0 قرار گرفته و بررسی شبکه در راستای Z تا ZN انجام

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

می‌پذیرد، زیرا از فاصلهٔ ZN به بعد اختلاف دمای در این راستا به سمت صفر میل می‌کند. همچنین به علت تقارن شبکه در جهت θ نیز بررسی فقط از $\theta = 0$ تا $\theta = 180$ درجه خواهد بود زیرا توزیع دمای در تیغهٔ دیگر عیناً مانند نیمه اول می‌باشد. نمو طولی در جهت Z را با ΔZ نشان داده و از رابطهٔ زیر به دست می‌آید.

$$\Delta Z = \frac{ZN}{(NZ-1)} \qquad (۱۵)$$

نمو زاویه‌ای در جهت θ را با $\Delta\theta$ نشان می‌دهیم و اگر K=1 معرف $\theta = 0$ درجه و K_a معرف $\theta = 90°$ و $K = N_\theta$ معرف $\theta = 180$ باشد، داریم: (تذکر: N_θ باید عددی فرد می‌باشد).

$$\theta = (K-1)\Delta\theta \qquad (۱۶)$$

و برای تقسیم‌بندی در جهت r چنانچه تقسیمات تا جدارهٔ داخلی لوله برابر N_i و تا جدارهٔ خارجی لوله برابر N_0 باشد خواهیم داشت:

$$r = (j-1)\Delta r_f \qquad j = 1,...,N_i \qquad (۱۷)$$

$$r = R_i + (j-N_i)\Delta r_p \qquad j = N_i,...N_0 \qquad (۱۸)$$

و برای درون خاک

$$r = R_0 + (i-N_0)\Delta r_s \qquad j = N_0,...,NR_k \qquad (۱۹)$$

که مقدار NR_k یعنی بیشترین تعداد تقسیمات در امتداد r تحت زاویه‌ای که اندیس آن k می‌باشد. از نکاتی که شبکه‌بندی مزبور را از دیگر شبکه‌بندی‌هایی که در مختصات استوانه‌ای بررسی می‌شوند، متمایز می‌سازد، آن است که حاصل تقاطع هر خط شعاعی که سطح زمین را در بالا و یا سطح عایق در پائین قطع می‌کند نقطه‌ای است به احتمال بسیار زیاد، مابین دو تقسیم متوالی که در جهت شعاعی قرار می‌گیرد که در این صورت نقاط نامنظمی در شبکه‌بندی مزبور پیش‌بینی شده است.

در مرجع شماره[۷] نیز در مورد شبکه‌بندی نقاط بی‌قاعده در سطح زمین پیش‌بینی‌های لازم شده و اصول سیستم مختصات (r,θ,Z)استفاده شده در این تحقیق از آن الگو استفاده نموده ولی علاوه بر آن از نکات برجسته این تحقیق آن است که برای $\theta > 90°$ دیگر از الگوی مذکور پیروی نشده و شبکه‌بندی ارائه شده پیچیده‌تر از مرجع مزبور بوده، بدین صورت که علاوه بر در نظر گرفتن نقاط نامنظم در سطح زمین، نقاط نامنظم حاصل از برخورد یک سری از شعاع‌های شبکه با سطح عایق نیز پیش‌بینی شده است.

برای $\theta < 90°$ از مرجع [۷] استفاده شده ولی شکل جدید شبکه‌بندی برای $\theta > 90°$ و با در نظر گرفتن شکل شماره (۱) به صورت زیر قابل ارائه است.

$$NR_k = N_\theta + \frac{1}{\Delta r_s}\left\{\frac{-YA}{\cos[(k-1)]\Delta\theta} - R_0\right\} \qquad K = K_a+1,...,N_\theta \qquad (۲۰)$$

که مقدار سمت راست به عدد صحیح کوچکتر گرد می‌شود.

همچنین کسر شعاعی δr_k عددیست کوچکتر از یک که در واقع ضریب Δr_s می‌گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

$$\delta\, r_k = \frac{1}{\Delta r_s}\left\{\frac{-YA}{\cos[(k-1)\Delta\theta\,]} - \left[R_0 + (NR_k - N_0)\Delta r_s\right]\right\} \qquad (۲۱)$$

در سطح پایینی ابتدا فاصلهٔ افقی بین محل تقاطع از دایرهٔ به شعاع r که سطح عایق را قطع می‌کند تا خط عمودی $K = N_\theta$ به صورت

$$X2_{jk} = \left\{[R_0 + (j - N_0)\Delta r_s\,]^2 - Y_A^2\right\}^{1/2} \quad , \quad j = NR_{(N\theta)} + 1,...NR(K_a + 1) \qquad (۲۲)$$

و

$$Y2_{jk} = Arc\sin\left[\frac{X2_{jk}}{(j - N_0)\Delta r_s + R_0}\right] \quad , \quad K = N_\theta ,..., K_a + 1 \qquad (۲۳)$$

در نهایت کسر زوایه‌ای به صورت زیر معرفی می‌گردد.

$$\delta\theta_{jk-1} = \frac{(2k_a - k)\Delta\theta - Y2_{jk}}{\Delta\theta} \quad , \quad K = N_\theta ,..., K_a + 1 \qquad (۲۴)$$

بدیهی است برای $\theta < 90°$ نیز فرمول‌ها بدست آمده، که دیگر در اینجا ذکر نشده است.

معادلات اختلاف محدود

برای حل معادلات از یک روش سه مرحله‌ای ضمنی که توسط داگلاس ـ راچفورد ابداع شده استفاده گردیده است [۹] که از خصوصیات مهم این روش پایداری بدون قید و شرط آن می‌باشد.

این روش شامل سه مرحله در روییدن معادلات ابتدا در جهت Z، سپس در جهت r و در نهایت در جهت θ می‌باشد.

معادلات به شکل تفاضل متناهی بسط داده شده و به عنوان نمونه برای نقاط داخل لوله در جهت θ در آخرین مرحله به شکل زیر می‌باشد.

$$\frac{T^{***}_{(i,j,k,n+1)} - T_{(i,j,k,n)}}{\Delta t} = -V_z\frac{\Delta T^{*}_{(i,j,k,n+1)}}{\Delta Z} + \alpha_f\{\frac{1}{(j-1)\Delta r_f}\times\frac{\Delta T^{**}_{(i,j,k,n+1)}}{\Delta r} \qquad (۲۵)$$
$$+\frac{\Delta^2 T^{**}_{(i,j,k,n+1)}}{\Delta r^2} + \frac{1}{[j-1)\Delta r_f\,]^2}\times\frac{\Delta^2 T^{***}_{(i,j,k,n+1)}}{\Delta\theta^{\,2}} + \frac{\Delta^2 T^{*}_{(i,j,k,n+1)}}{\Delta Z^2}\ \}$$

همچنین برای روابط تفاضل متناهی در نزدیکی مرز عایق می‌توان از روابط زیر سود برد

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\Delta r_s}\left[\frac{T_{i,j+1,k}}{\delta\, r_k(\delta\, r_k + 1)} - \frac{(1-\delta\, r_k)T_{i,j,k}}{\delta\, r_k} - \frac{\delta\, r_k T_{i,j-1,k}}{1+\delta\, r_k}\right] \qquad (۲۶)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{2}{\Delta r^2{}_s}\left[\frac{T_{i,j+1,k}}{\delta\, r_k(\delta\, r_k + 1)} - \frac{T_{i,j,k}}{\delta\, r_k} + \frac{T_{i,j-1,k}}{(1+\delta\, r_k)}\right] \qquad (۲۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{1}{\Delta\theta}\left[\frac{T_{i,j,k+1}}{\delta\theta_{jk}(\delta\theta_{jk}+1)} - \frac{(1-\delta\theta_{jk})T_{i,j,k}}{\delta\theta_{jk}} + \frac{\delta\theta_{jk}T_{i,j,k+1}}{(1+\delta\theta_{jk})}\right] \quad (۲۸)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = \frac{2}{\Delta\theta^2}\left[\frac{T_{i,j,k+1}}{\delta\theta_{jk}(\delta\theta_{jk}+1)} - \frac{T_{i,j,k}}{\delta\theta_{jk}} + \frac{T_{i,j,k-1}}{(1+\delta\theta_{jk})}\right] \quad (۲۹)$$

که در معادلات (۲۶) و (۲۷) گره‌های $T_{i,j+1,k}$ و در معادلات (۲۸) و (۲۹) گره‌های $T_{i,j,k+1}$ بر سطح عایق می‌افتد.

روند برنامه رایانه‌ای

برنامه مزبور به زبان فرترن تهیه و آماده شده است و تعداد متغیرهای قابل اختیار برای این برنامه گستردگی حل برای مسائل گوناگون را شامل می‌شود.

در ابتدای معرفی کلی بردارها و ماتریس‌های مورد نظر انجام می‌شود و سپس پیش‌بینی برای ورودی‌های برنامه که همگی به صورت پارامتری بوده صورت می‌پذیرد که این متغیرها یک دسته مرتبط با شبکه‌بندی همچنین نمو زمانی و شرایط اولیه و طراحی زیر پایه‌ای صورت مسئله است، تعدادی از دیگر متغیرها به جنس مواد به کار رفته شده در مسئله مرتبط می‌باشند و سری دیگر شامل شکل فیزیکی مسئله مانند عمق و دفن یا قطر لولهٔ مدفون می‌باشد.

پس از آن شبکه‌بندی طرح‌ریزی شده و یک سری از ارکان مانند شعاع مرکزی در زاویه ۹۰ درجه (K_a) و صورت کلی شبکه معرفی و پیش‌بینی نقاط نامنظم در سطوح بالائی و پائینی آن می‌گردد.

سپس برای کلیه نقاط شبکه دمای اولیه معرفی شده همچنین دمای گام به گام که در هر مرحلهٔ زمانی پیدا می‌شود به عنوان دمای اولیه‌ای برای گام بعدی محاسبه دما منظور می‌گردد.

روبیدن در جهت Z به شکلی نوشته شده که خود به سه قسمت تقسیم شده بدین صورت که حلقه تکرار برای تغییر اندیس‌های K جهت θ , j برای امتداد r تشکیل می‌گردد. حلقه تکرار K در قسمت اول K_a-1 و K=1 و درقسمت دوم $K=K_a$ و در قسمت سوم N_θ و K=Ka+1 تشکیل شده و حلقهٔ تکرار r برای هر یک از مراحل فوق NR(K) , J=2 تشکیل می‌گردد. برای دسته دوم در انتهای شعاع K_a از شرط مرزی آدیاباتیک سود می‌بریم. باید دقت داشته باشیم برای دسته اول و سوم با نقاط مرزی و شکل نقاط نامنظم رو به رو می‌شویم که در دسته اول برخورد با سطح زمین و در دسته سوم برخورد با سطح عایق پیش‌بینی می‌شود ولی در دسته دوم با نقاط نامنظم رو به رو نمی‌شویم.

در هر یک از سه قسمت فوق به مجموعه معادلاتی با ماتریس ضرایب سه قطری می‌رسیم که با فراخوانی زیر برنامه معروف به TDMA نه تنها در این مرحله بلکه در هر کجا که معادلات با ماتریس ضرایب سه قطری تشکیل می‌شود به حل آنها می‌پردازیم.

پس روبیدن در جهت r انجام می‌پذیرد بدین صورت که در این مرحله حلقه تکرار برای اندیس i در امتداد Z و K در جهت θ تشکیل می‌گردد. حلقه تکرار برای اندیس i به صورت N z و i =2 است و در جهت θ شعاع‌ها با اندیس‌های k به صورت K =1, K_a در نیم صفحه بالایی شروع و جهت ادامه روبیدن در نیم صفحه پائینی بر شعاع‌ها با اندیس‌های K1=2Ka - K ادامه داده می‌شود. تنها شعاعی که در این

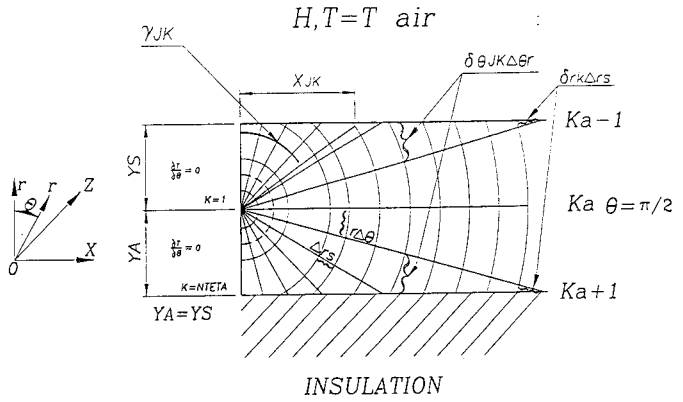
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

میان نه تنها نقاط مرزی سطح زمین و سطح عایق را قطع نمی‌کند بلکه فقط روبیدن در مسیر خود را منحصراً دنبال می‌کند شعاع با اندیس K_a می‌باشد.

پس از آن روبیدن در جهت θ انجام می‌شود که با ایجاد حلقه‌های تکرار برای اندیس‌های i در امتداد Y,Z در امتداد r تشکیل می‌گردد. حلقه در امتداد Z برای NZ و i=2 و برای r به صورت $J=2,NR(K_a-1)$ تشکیل می‌گردد.

در این مرحله نیز مانند روبیدن در جهت Z و r ماتریس ضرایب سه قطری پدیدار شده که پس از فراخوانی زیر برنامه در اینجا مقادیر دمای در پایان زمان n+1 به دست می‌آید.

در نهایت محاسبه دمای نقاط مختلف شبکه انجام شده که تدابیری برای نقاط مورد توجه بیشتر اندیشیده شده است . باید دقت نمود که در هر مرحله با توجه به موقعیت نقطه داخل لوله یا روی لوله یا قسمت‌های دیگر و همچنین با در نظر گرفتن نقاط نامنظم از معادلات مربوطه استفاده می‌شود.



شکل ۱ـ ساختار نقاط تشکیل‌دهنده شبکه در صفحه r -θ

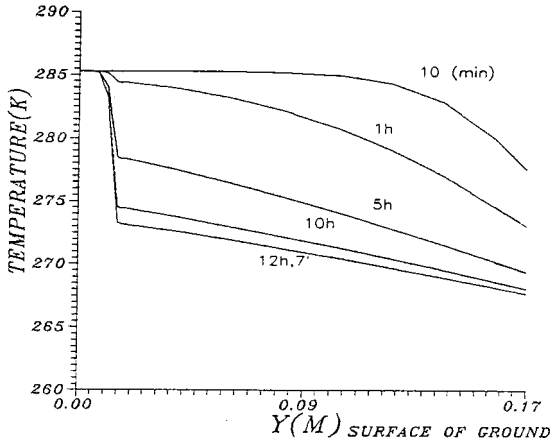
استخراج و بررسی نتایج

پس از اختیار نمودن تعدادی از ورودی‌های مذکور شرایط فیزیکی مسئله را در یک حالت به صورتی که قطر درونی لوله ۳ سانتیمتر و ضخامت آن ۳ میلیمتر و عمق دفن آن ۱۷ سانتیمتر از سطح زمین و فاصلهٔ عایق نیز به همین اندازه در زیر لوله باشد و دمای اولیه مجموعه $285.3°(k)$و دمای هوای مجاور در سطح زمین $265.3(k)$ و ضریب جابجایی $20(\frac{w}{m^2.k})$ در نظر گرفته می‌شود و در حالی که برای مایع جاری درون لوله RE=1200 (جریان آرام) باشد به بررسی می‌پردازیم.

شکل شماره (۲) نفوذ سرما را پس از گذشت زمان‌های متفاوت در روی محوری که شامل مجموعه نقاطی از شبکه که در انتهای امتداد محور شبکه حدفاصل خط عمودی از مرکز لوله تا سطح زمین واقع بر پرتو شعاعی $(\theta = 0)\quad k = 1$ قرار دارند نشان می‌دهد. به عنوان نمونه مشاهده می‌کنیم در حالی که پس از گذشت ۱۰ دقیقه سرمای چندانی در عمق زمین نفوذ ننموده است، پائین آمدن دما در داخل خاک

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

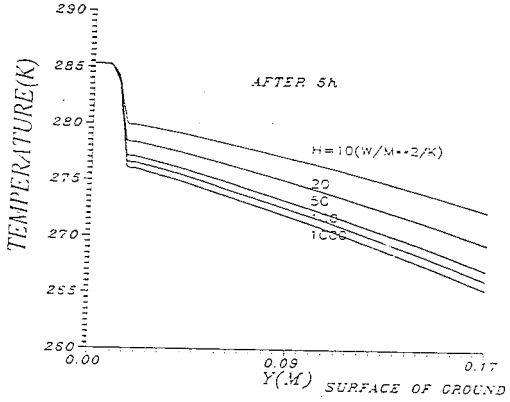
حاکی از نفوذ سرما به مرور زمان در زمین می‌باشد تا آنجا که پس از گذشت ۱۲ ساعت و ۷ دقیقه شاهد آغاز انجماد درون مایع می‌باشیم.



شکل ۲ـ توزیع دما بر روی محور I از شبکه در مقاطع زمانی مختلف تا لحظه شروع انجماد

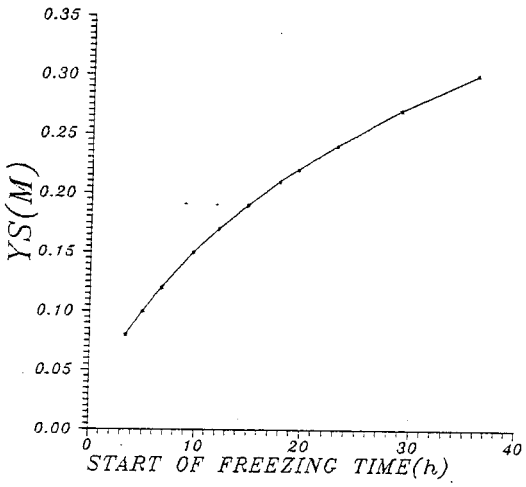
بزرگتر شدن ضریب جابجایی در سطح زمین نفوذ سرما را سریع‌تر کرده به طوری که در شکل شماره (۳) این مطلب پس از گذشت ۵ ساعت برای شرایط متفاوت جابجایی در مجاورت سطح زمین به روشنی مشخص است، با کمی تعمق در شکل فوق ملاحظه می‌کنیم با تغییر ضریب جابجایی از $100(\frac{w}{m^2})$ به $1000(\frac{w}{m^2})$ تغییرات نسبتاً کمی در توزیع دما نسبت به تغییرات ضرایب جابجایی در اعداد کوچکتر می‌باشیم و این امر دلالت بر این مطلب دارد که با بزرگتر شدن ضریب جابجایی و گذشتن از یک حد معین تقریباً به حداکثر تغییرات توزیع دما خواهیم رسید. شاید بتوان این مطلب را مترادف این معنا دانست که در ضریب‌های جابجایی بسیار بالا دمای سطح زمین به مقدار ثابت میل می‌کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۳ـ توزیع دما بر روی محور I از شبکه برای شرایط متفاوت جابجایی برروی سطح زمین پس از گذشت ۵ ساعت

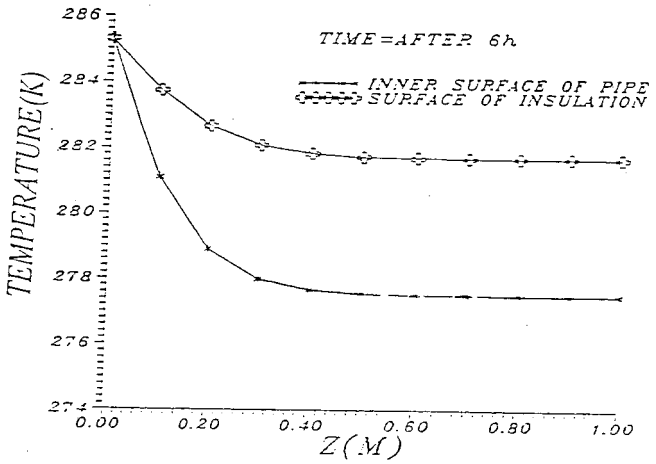
از مطالب مهم قابل توجه در این نگرش، آغاز انجماد مایع درون لوله می‌باشد. شکل شماره (٤) شروع انجماد را در عمق‌های متفاوت دفن لوله به وضوح مشخص می‌سازد. با توجه به شکل فوق در می‌یابیم که ممکن است فقط برای چند سانتیمتر افزایش عمق دفن لوله، ساعت‌ها انجماد مایع به تأخیر بیفتد.



شکل ۴ـ ارتباط مابین عمق دفن لوله و مدت زمان آغاز انجماد وقتی که دمای هوای سطح زمین ۲۶۵/۳ و ضریب جابجایی $(\frac{w}{m^2.k})$ ۲۰ باشد

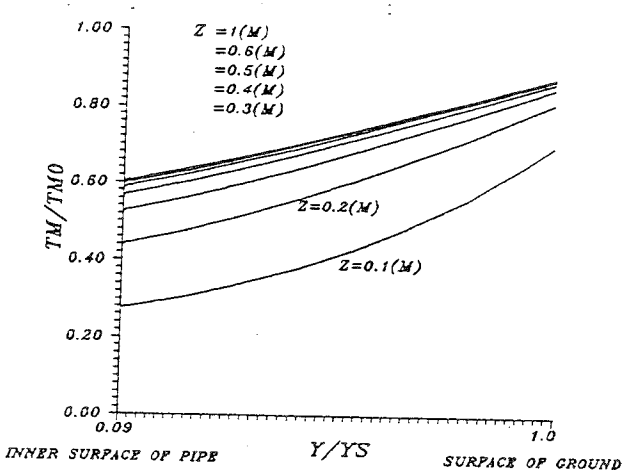
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

در شکل شماره (۵) مقایسه‌ای مابین توزیع دما از ابتدای محور شبکه تا انتهای آن برای سطح داخلی لوله واقع بر پرتو شعاعی $\theta = 0$ درجه و سطح عایق واقع بر پرتو شعاعی $\theta = 180$ درجه پس از گذشت ۸ ساعت در راستای محورZها می‌باشد. در این مقایسه دیده می‌شود سطح داخلی لوله دمای پائین‌تر از سطح عایق پیدا نموده است که این مسئله کاملاً معقول بوده زیرا در فاصلهٔ دورتری تا سطح زمین نسبت به سطح داخلی لوله قرار دارد. نسبت $\frac{TM}{TM0} = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_{air}}$ جهت نمودارهای بی‌بعد می‌باشد که T دمای نقطه مورد بررسی و T_{air} دمای هوای مجاور سطح زمین و T_0 دمای اولیه مجموعه است چنانچه محور ذکر شده در شکل شماره (۲) به شکلی در نظر گرفته شود که دیگر در انتهای امتداد محور شبکه نباشد و در Z های متفاوت مورد بحث و بررسی قرار گیرد می‌توان توزیع دمایی در نظر گرفت که نتیجه آن در شکل شماره (٦) و (۷) نشان داده شده، به خاطر بهتر نشان دادن این توزیع دمایی، برای مایع درون لوله شکل شماره (۷) آورده شده و از سطح داخلی لوله تا سطح زمین در شکل شماره (٦) نشان داده شده است.

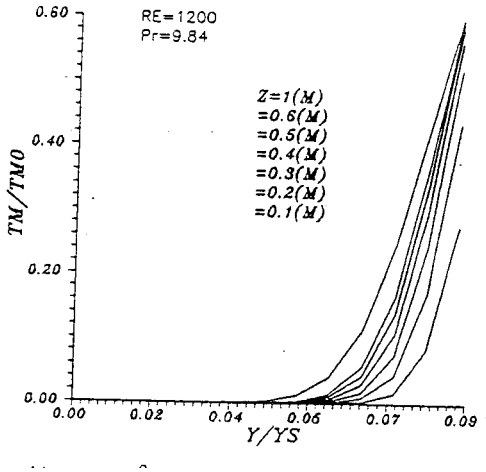


شکل ۵ ـ مقایسه مابین توزیع دمایی از ابتدای امتداد محور شبکه تا انتهای آن برای سطح داخلی لوله واقع بر پرتو شعاعی θ=0 درجه و سطح عایق واقع بر پرتو شعاعی ۱۸۰= θ درجه پس از گذشت ۶ ساعت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



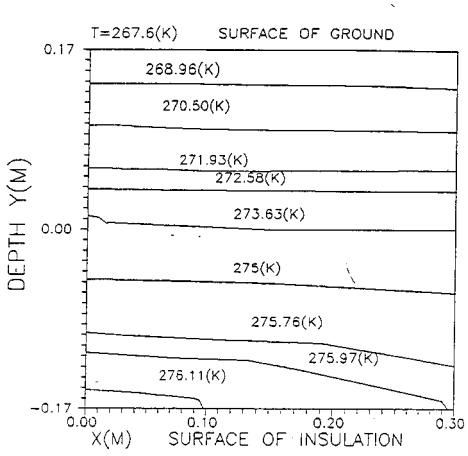
شکل ۶ ـ توزیع دما از سطح لوله تا سطح زمین واقع بر پرتوشعاعی $\theta = 0$ درجه در مقاطع مختلف پس از گذشت ۱۲ ساعت و ۷ دقیقه



شکل ۷ ـ توزیع دما از مرکز لوله تا سطح لوله واقع بر پرتو شعاعی $\theta = 0$ درجه در مقاطع مختلف امتداد محور شبکه پس از گذشت ۱۲ ساعت و ۷ دقیقه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

خطوط همدمای اطراف لوله در مقطع انتهای امتداد محور شبکه پس از گذشت ۱۲ ساعت و ۷ دقیقه در شکل شماره (۸) رسم شده و در حقیقت در این شکل چگونگی نفوذ سرما در لایه‌های متفاوت عمق زمین به خوبی نمایان است. برای بررسی دقیق‌تر توزیع دما درون لوله شکل‌های شماره (۹) و (۱۰) آورده شده است.

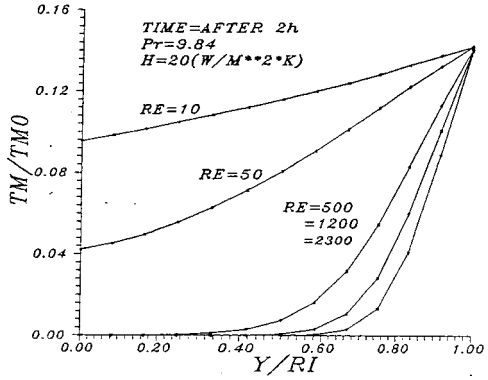


شکل ۸ ـ خطوط همدما در اطراف لوله در مقطع انتهای امتداد محور شبکه بعد از گذشت ۱۲ ساعت و ۷ دقیقه

در هر دو نمودار دمای هوای مجاور سطح زمین $251.3°(k)$و دمای اولیه مجموعه $281.3°(k)$ است.

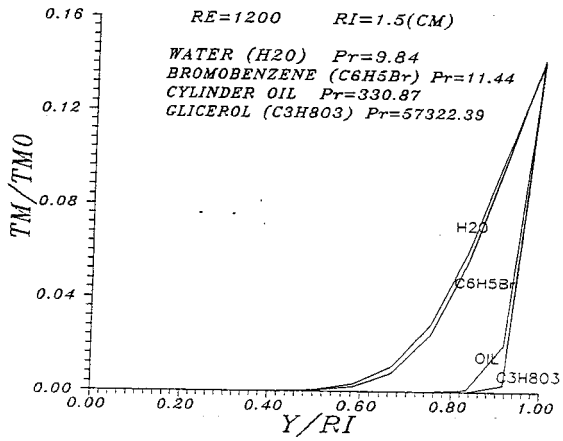
در شکل شماره (۹) نیم پروفیل دمای مایع جاری درون لوله در انتهای امتداد محور شبکه بر روی پرتو شعاعی $\theta = 0$ درجه داخل مایع در اعداد رنیولدز متفاوت آورد شده و نشان‌دهندهٔ آن است که در یک عدد رینولدز کوچک مثلاً RE=10 تغییرات پروفیل دما درون مایع تقریباً به صورت خطی است ولی با افزایش عدد رینولدز، پروفیل دما پهن‌تر خواهد شد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۹ـ نیم پروفیل دمای سیال جاری درون لوله در انتهای امتداد محور شبکه از مرکز لوله تا سطح داخلی لوله واقع بر پرتو شعاعی $\theta = 0$ درجه برای اعداد رینولدز متفاوت پس از گذشت ۲ ساعت

در شکل شماره (۱۰) در عدد رینولدز ۱۲۰۰، مایعاتی با اعداد پرانتل متفاوت بررسی شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش عدد پرانتل سیال جاری درون لوله، پروفیل دما پهن‌تر گشته و سرعت نفوذ حرارت کاهش می‌یابد.



۱۰ـ نیم پروفیل دمای سیال جاری درون لوله در انتهای امتداد محور شبکه از مرکز لوله تا سطح داخلی لوله واقع بر پرتو شعاعی $\theta = 0$ درجه برای اعداد پرانتل متفاوت پس از گذشت ۲ ساعت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

در اختیار داشتن روشی عددی جهت توزیع دما در نواحی مختلف برای یک لولهٔ مدفون تحت شرایط بررسی شده و علی‌الخصوص تکمیل نمودن این بحث با بررسی توزیع دمایی برای مایع درون لوله از ویژگی‌های عمدهٔ این تحقیق است.

داشتن عمق مطلوب برای دفن لوله در شرایط متفاوت با در نظر گرفتن عایق زیر لوله و همچنین در اختیار داشتن منحنی خطوط دما از دیگر ویژگی‌های این تحقیق می‌باشد.

فهرست علائم

C : گرمای ویژه

H : ضریب انتقال حرارت جابجایی، $\frac{w}{m^2.k}$

K_a: عدد صحیح نمایندهٔ اندیس K در جهت θ وقتی که $\theta = 90$ درجه است.

K : ضریب هدایت حرارتی $\frac{\mathbf{w}}{\mathbf{m}.\mathbf{k}}$

I,j,K : شمارشگرهای صحیح (اندیس) مشخص‌کننده موقعیت مکانی به ترتیب در جهات R, Z ,

NR(k) : تعداد نقاط شبکه در امتداد شعاعی r به عنوان تابعی از جهت θ

N_z : تعداد نقاط شبکه در امتداد محور Z

Ri : شعاع درونی لوله, m

Ro : شعاع خارجی لوله، m

RE : عدد رینولدز

R : فاصله شعاعی، m r,θ,Z مختصات استوانه‌ای

T: دما

t : زمان، S

V: سرعت سیال، m/s

X2 : فاصلهٔ نقاط روی سطح عایق تا پرتو شعاعی عمود بر محور لوله در ۱۸۰= θ درجه

YA: فاصله سطح عایق تا مرکز لوله، m

ZN : طول لوله در امتداد محور Z , m

: ضریب پخش حرارتی، $\frac{\square^2}{\square}$:

δr_k : مقدار فاصلهٔ کسر شعاعی برای نقاط نامنظم در مجاور سطح زمین یا سطح عایق

$\delta\theta_{jk}$: مقدار فاصله کسر زاویه‌ای برای نقاط نامنظم در مجاورت سطح زمین یا سطح عایق

: مؤلفه زاویهٔ مختصات، rad

Δ : اپراتور دیفرانسیلی، علامت نمو

air: مربوط به درجه حرارت هوای خشک، جریان آزاد

f : مایع

i : سطح داخلی لوله

O : سطح خارجی لوله

*: قدار درجه حرارت در روبیدن گره‌های شبکه در امتداد Z

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

**: مقدار درجه حرارت در روبیدن گره‌های شبکه در امتداد r

***: مقدار درجه حرارت در روبیدن گره‌های شبکه در امتداد θ

منابع

1- Myers, G. E., Mitchell, J. W., and Noramns, R. F., "The Transient Response of cross flow Heat Exchangers, Evaporators, and Condenser', Journal of Heat Transfer, Trans ASME, series C, Vol. 89, No.1, Feb. 1967. PP.75-80.

2- Zargary, A. and Brock, J. E "An Integral Equation Describing Conjugate Transient Heat Transfer In Fluid Flow Through Insulated Pipes". Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 16. June 1973, PP. 1325 - 1328.

3- Hinasekhar.K. and Bau, H. H., "Thermal Convection Associated with Hot / Cold Buried in a semi - Infinite, Saturated Porous Medium", J. Heat and Mass Transfer, Vol. 30. No.2. PP. 263 - 273 (1987).

4- Lebedev, N. N, Skalskaya, I. P. And Uflyand, Ya, S., "Problems in Mathematical physics" (translated from Russian), Prentice-Hall, 1965.

5- Thiyagarajan, R., and Yavanovich. M. M., "Thermal Resistance of a Buried Cylinder with Constant Flux Boundary Condition", ASME Journal of Heatظ Transfer, Vol. 46. No.2, May. 1974, PP. 249-250.

6- Schneider, G. E., "An Investigation into the Heat Loss Characteristics of Buried pipes", Technical Notes. Journal of Heat Transfer, Vol. 107, Aug 1985, PP. 696-699.

7- Negiz. A., "Three- Dimensional Transient Heat Transfer From A Buried Pipe - I. Laminar Flow", Chemical Engineering science. Vol. 48. No.20. PP. 3507-3517, 1993.

8- Heidemann, R. A., "Three- Dimensional Transient Heat Transfer From A Buried Pipe: Solidification of a Stationary Fluid", Numerical Heat Transfer, Part A. 28:175-193, 1995.

9- Brian. P. L. "A Finite - Difference Method of High - order Accuracy for the Solution of Three - Dimensional Transient Heat Conduction problems" T Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts J. AIchE. Vol. 7, No.3. PP. 367-370. (1982).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]