اویل ایندستری
Oilindustry.ir
CLICK HERE

عایق کاری خطوط لوله انتقال فرآورده های نفتی و بدست آوردن ضخامت بهینه عایق در دو محیط سرد و گرم

علیرضا پورپروانه [*۱]، حسن زارع علی آبادی [۲]، الهام بهرامیان [۳]، فرید قنبرپور [۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندس شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان ؛ alireza_porparvaneh@yahoo.com
[۲] استادیار دانشگاه، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان ؛ hzare@qiet.ac.ir
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندس شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه ؛ elham_bahramian92@yahoo.com
[۴] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندس شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان ؛ faridghanbarpour3@yahoo.com

چکیده

یکی از مهمترین پارامترها در انتخا نوع عایق برای خطوط انتقال فرآورده های نفتی، محدوده دمای کارکردی عایق است. برای هر عایق، بسته به جنس آن، محدوده دمای کاری مشخصی تعریف می شود، بدین معنی که عایق در آن محدوده دمایی، بهترین عملکرد را خواهد داشت. بنابراین، قبل از عایق کاری باید شرایط و دمای محیط و سیستمی که قرار است عایق شود مشخص گردد و با توجه به محدوده دمای کاری، عایق مناسب انتخا شود. به وسیله عایق کاری می توان مقداری حرارت ذخیره کرد که از این حرارت تولید شده می توان برای پیش گرم کن فرآورده های نفتی و انتقال آنها در مسافت های طولانی در نقاط سرد استفاده نمود. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از معادله جریان غیر هم دما در لوله و حل معادلات جریان و معادلات انرژی به توصیف چگونگی انتقال نفت خام در بخشی از خط لوله می پردازیم. سپس مقدار اتلاف حرارتی را برای مقادیر مختلف ضخامت عایق محاسبه کرده و مورد بررسی قرار می دهیم. در نهایت با بکارگیری روابط بهینه سازی و با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics، ضخامت بهینه عایق را در دو محیط سرد و گرم برای دستیابی به کمترین تبادل دمایی سیال داخل لوله با محیط اطراف را بدست می آوریم.

کلمات کلیدی

لوله انتقال، عایق کاری، محدوده دمایی، ضخامت بهینه، COMSOL Multiphysics.

Insulation of oil pipelines and obtaining the optimum thickness for insulation layer in the hot and cold environments

A. Pourparvaneh, H. Zareh Ali Abadi, E. bahramian, F. Ghanbarpour

ABSTRACT

One of the most important parameters in selection the type of insulation that must be used in manufacturing the pipelines for petroleum products is the operating- temperature range. For each insulation depending on what materials were used in its composition, is defined a specific operating temperature range. This means that the insulation has best performance in this range. Therefore, before insulation, we must characterize the situation and specify the temperature of ambient and system, then according to these, select the suitable type of insulation. By insulating, we can save the energy and use it in the pre-heating and transferring the materials to distant areas. In this study, by employing the non-isothermal flow equation in tubes and solving the momentum and energy equations simultaneously, tried to determine how crude-oil is transferred along the tube. Then the amount of heat loss for various values of insulation layer thickness is calculated and Results were analyzed. Finally by using the COMSOL Multiphysics Software, determined the optimum thickness of insulating layer to achieve the lowest Heat exchange between the fluid inside the pipe and environment in both hot and cold situations.

KEYWORDS

pipeline, insulation, temperature range, optimum thickness, COMSOL Multiphysics.

۱- مقدمه

þ-þ© þê @û•þ–@þ‹ìþ•þé þ©þŽþŽ @ýþã–þ-þ•þ®þ£ þÖ ìþ
þê @þ‘ þ@þ©@þŽ@þãþç ûý @þã û•þäû• þŽþãþ®û” þåþŽ
þÒ @þàþ˜þ¨þã þ•þ-þ•þ® @þ£ þê @þŸþ-þ© þŽþ‘ þâþ´þ
þ•þ- þáþ®û” þâþ´þŸ þ¯þ• þ•þ-þ•þ®þ£ þÑþüþ—þ• þþûþí
þ¶þëþŽ @û• þ•þ- þ©þ®þ³ þâþ´þŸ þêþ‘ þŽþãþ®û” þÝþŽþ
[ñ] þªþëþ© ûýþã

در شکل (۱) می توانید قسمتی از خط لوله انتقال فرآورده های نفتی را مشاهده کنید.

شکل (۱): قسمتی از خط لوله انتقال فرآورده های نفتی

پس اگر این تعبیر را بپذیریم که انرژی باعث بدست آمدن پول و سرمایه می شود، عایق حرارتی به میزان قابل توجهی قادر به کسب آن است، چرا که عایق، انرژی را محافظت و ذخیره می نماید. در مواردی که سیستم های سرد کننده مورد استفاده قرار می گیرد، عایق حرارتی خوب و مناسب می تواند میزان انرژی لازم را جهت تبرید به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش دهد. در واحد های صنعتی انرژی حررتی به میزان زیادی قابل تولید و مصرف است. لذا از دست دادن یا حفظ آن و یا جلوگیری از اتلاف حرارتی می تواند هزینه های تولید یا سرمایه گذاری های اولیه صنعتی را کاسته و بدین ترتیب مقدار زیادی پول و سرمایه پس انداز می شود. [۲]

در حالت لوله سیال گرم، عایق از جریان سیال به هوای محیط جلوگیری می کند. در حالت لوله سیال سرد، عایق از ورود گرمای محیط به درون لوله جلوگیری می کند. بنابراین عایق به منظور حفظ گرما یا به عبارت دیگر انرژی به کار می رود. علیرغم این توضیحات هنوز عایق جای خود را در صنعت پیدا نکرده است. امروزه همه می دانند که چه مقدار عظیمی انرژی جهت بکارگیری صنایع مختلف مورد نیاز است. با انجام عایق کاری مقدار قابل توجهی از انرژی که امروزه به هدر می رود، می تواند ذخیره و مورد استفاده قرار گیرد.

بنابراین تفهیم اصول و مبانی عایق کاری امر مهمی در صنعت است. [۱]

از جمله موارد کاربرد عایق می توان به موارد زیر اشاره کرد: [۳]

۱- کاهش بهره حرارتی
۲- محافظت در برابر یخ زدگی
۳- فراهم ساختن کنترل میعان
۴- تأمین محافظت از لوله در برابر خوردگی
۵- کنترل دمای فرآیند
۶- ذخیره انرژی

در اکثر اوقات عایق جهت انجام وظایف بالا به طور ترکیبی انتخاب می شود.

میزان عایق کاری با توجه به اقلیم های مختلف زمستانی و تابستانی متغییر بوده و به درجه حرارت محیط اطراف بستگی دارد.

با توجه به دمای سیستم، عایق های حرارتی به دو نوع مختلف طبقه بندی می شوند که عبارتند از: [۴]

۱- سیستم های سرد با محدوده دمایی ۱۰۰- تا ۵ درجه سانتی گراد
۲- سیستم های گرم با محدوده دمایی ۵ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد

ایمنی و قابل اطمینان بودن یکی از مهمترین و بحرانی ترین خواص سیستم های خطوط لوله در صنایع نفت می باشد.

سیستم های عایق در مورد لوله های نفت و گاز در محیط های خورنده برای زمان های بیش از ۲۰ سال سرویس می دهند. کارایی و موثر بودن عایق در تمام طول مدت کارکرد برای تضمین وجود جریان الزامی است. دمای سیال بایستی به منظور جلوگیری از تشکیل واکس ها و هیدرات ها به اندازه کافی بالا نگه داشته شود. [۴]

سیستم های فرآیند های شیمیایی اکثراً از فولاد های کربنی و یا فولاد های آلیاژی ساخته شده اند و به دلیل اینکه اغلب در دماهایی بالاتر و یا پایین تر از دمای محیط کار کرده و سرویس می دهد، با مواد عایق پوشانده می شوند. عایق ها می توانند از مواد مختلفی ساخته شوند. معمولاً یک لایع مانع در برابر هوا هم مورد استفاده قرار می گیرند. [۵]

همچنین باید در نظر داشت که در حرارت های بالا، مقدار کمی رطوبت در سیستم باقی می ماند که بعد از گرم شدن تبدیل به بخار فشرده شده و تمایل به خروج از عایق و غلاف دارد. در این شرایط اگر غلاف از نوع محافظ در برابر بخار نباشد، به ناچار این بخارات در جداره داخلی غلاف شروع به کندانس شدن نموده و اگر راهی برای خروج پیش بینی نشده باشد و در همانجا جمع و عایق را خیس

خواهد کرد.

اختلاف فشار بخاری که در لایه داخلی عایق و غلاف نیرو وارد می کند بقدر کافی زیاد می باشد و اگر سوراخ یا منفذ ریزی در لوله وجود داشته باشد، این بخار براحتی داخل لوله نفوذ می کند. [۵]

طراحی سیستم عایق کاری به طور کلی شامل مراحل زیر می باشد: [۶]

۱- پیش بینی نقاط و شرایط بحرانی و عملکرد عایق مورد نیاز
۲- پیش بینی و محاسبه خواص عایق و اتصالات مورد نیاز سیستم
۳- انتخاب عایق و اتصالاتی که بتواند نیاز سیستم را بر طرف کند
۴- محاسبه ضخامت عایق
۵- طراحی فیزیکی عایق و اتصالات در سیستم

در این مطالعه قصد داریم ضخامت بهینه برای عایق های خطوط لوله انتقال نفت خام را بدست آوریم، تا علاوه بر عایق کاری و ذخیره سرمایه و انرژی، بهترین و مناسب ترین ضخامت را برای بیشترین ذخیره انرژی بدست آوریم.

در این مطالعه یک نمونه از فرآورده های نفتی (نفت خام) با نرخ ۲۰۰۰ (m^3/h) در خط لوله ای به طول ۱۰۰ (km) و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد جاری است. متوسط درجه حرارت در محیط اطراف خط لوله، در مرحله اول ۱۵- درجه سانتی گراد و در محله دوم ۲۵+ درجه سانتی گراد می باشد.

عایق کاری مناسب لوله ها، متاثر از عوامل متعددی است که از مهم ترین آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- ضریب انتقال حرارت یا ضریب مقاومت حرارتی
۲- ضریب تابش سطح
۳- ضخامت عایق
۴- چگالی عایق

مشخصات لوله و عایق مورد استفاده در این مطالعه را می توانید در جدول (۱) مشاهده کنید.

باید توجه داشت ضخامت عایق در ابتدا ۳ سانتی متر در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات لوله و عایق

تعریف	مقدار	نام
ضخامت دیواره لوله	2 cm	
ضریب هدایت حرارتی دیواره لوله	45 W/m.K	
ضخامت عایق	3 cm	
ضریب هدایت حرارتی عایق	0.025 W/m.K	

۲- مدلسازی ریاضی

۲-۱- معادلات جریان سیال

معادلات مومنتوم جریان نفت در داخل لوله افقی به صورت زیر می باشد: [۷] و [۸]

(۱)

(۲)

در معادله (۱) و (۲)، A نشان دهنده سطح مقطع لوله ( )، نشان دهنده چگالی ( )، u نشان دهنده سرعت سیال (m/s) و p نشان دهنده فشار ( ) می باشد.

عبارت دوم در سمت چپ معادله (۲)، نشان دهنده افت فشار در لوله در اثر یک برش داخلی می باشد.

درمعادله (۲)، نشان دهنده ضریب اصطکاک دارسی که تابعی از عدد رینولدز، زبری سطح و قطر لوله می باشد که بر اساس معدله (۳) توصیف می شود: [۹]

(۳)

بر این اساس عدد رینولدز در این مسئله باید در محدوده زیر باشد:

۲-۲- معادلات انتقال انرژی

معادله انتقال انرژی در خط لوله توسط معادله (۴) توصیف می شود: [۷] و [۸]

(۴)

در معادله (۴)، نشان دهنده ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ($J/kg.K$)، T دما (k)، k ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)، یک منبع حرارتی (W/m) به دلیل تبادل حرارت با محیط اطراف از طریق دیواره لوله می باشد.

عبارت دوم در سمت راست معادله (۴)، مربوط به گرمای آزاد شده بر اثر کار نیروی اصطکاک می باشد.

(۵)

در معادله (۵)، Z محیط لوله (m)، h ضریب انتقال حرارت جابه

جایی (W/m^2K)، دمای سطح خارجی لوله (k) می باشد.

در شکل (۲) می توان قسمت های مختلف لوله و لایه های آن را مشاهده نمود.

شکل (۲): مشخصات لوله

: شعاع بیرونی دیوار nام (m)

: مختصات یک دیواره (m)

: ضخامت دیواره nام (m)

در شکل (۳) می توانید ضریب انتقال حرارت هدایتی دیوار و عایق و همچنین ضریب انتقال حرارت جابه جایی در داخل و خارج لوله را مشاهده کنید.

شکل (۳): ضریب انتقال حرارت هدایتی و جابه جایی لوله و عایق

ضریب انتقال حرارت جابجای در داخل لوله به صورت معادله (۶) توصیف می شود: [۱۰]

(۶)

برای معادله (۶)، عدد ناسلت به صورت معادله (۷) محاسبه می شود:

(۷)

ضریب انتقال حرارت جابه جای در خارج لوله به صورت معادله (۸) توصیف می شود: [۱۰]

(۸)

برای معادله (۸)، عدد ناسلت با فرض اینکه سرعت متوسط هوا ۱۰ (m/s) است، به صورت معادله (۹) محاسبه می شود:

(۹)

در این مطالعه، عدد رینولدز ، در نظر گرفته شده است. همچنین برای حل، ابتدا درجه حرارت در لوله قبل و بعد از عایق کاری را محاسبه کرده، سپس درجه حرارت را پس از یک عایق کاری بهینه بدست می آوریم.

می توان ضریب مقاومت حرارتی هر لایه عایق را با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه کرد: [۱۱]

(۱۰)

عبارت D_0 بیانگر قطر خارجی عایق، D_i بیانگر قطر داخلی عایق و λ بیانگر ضریب انتقال حرارت عایق در دمای متوسط کاری است.

محاسبه ضریب مقاومت حرارتی سطوح داخلی و خارجی لوله ها، پیچیده بوده و نیازمند در اختیار داشتن ضریب انتقال حرارت سطوح

داخلی و خارجی لوله است که این ضرایب با روش های تجربی بدست آمده و در استانداردهای مختلف متفاوت هستند.

باید توجه داشت که درجه حرارت ورودی و خروجی یکسان را به عنوان یک قید برای مسئله بهینه سازی در نظر می گیریم.

۳- شبیه سازی

همانطور که گفته شد شبیه سازی این مطالعه توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام شده است. در ابتدا محیط اطراف را در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد و سپس دمای ۲۵+ درجه سانتی گراد فرض می کنیم.

هندسه مدل را 3D در نظر گرفته شده است، و برای هر دو محیط، مد کاربری Non-Isothermal Pipe Flow (nipfl) و شرایط حل مسئله را به صورت پایا در نرم افزار COMSOL Multiphysics 4.4 در نظر گرفته شده است.

۳-۱- هندسه مدل

هندسه مدل را همان طور که گفته شد ۱۰۰ k m از خط لوله در نظر گرفته شده است، که در شکل (۴) قابل مشاهده می باشد.

شکل (۴): هندسه مدل

۳-۲- مواد مورد استفاده

همانطور که قبلاً گفته شد، نفت خام به عنوان سیال درون لوله در نظر گرفته شده است. همچنین هوا به عنوان ماده اطراف لوله قرار داده شده است.

۳-۳- پارامتر های محیط سرد

در مرحله اول پرامتر های مربوط به محیط سرد را در نظر گرفته و حل می کنیم. [۱۲]

نام	مقدار	تعریف
rho_oil	870[kg/m^3]	چگالی نفت
mu_oil	1e-2[Pa*s]	ویسکوزیته نفت
Cp_oil	2000[J/kg/K]	گرمای ویژه نفت
k_oil	0.1[W/m/K]	ضریب هدایت حرارتی نفت
v_air	10[m/s]	سرعت هوا در اطراف لوله
T_in	20[degC]	دمای داخل لوله
T_ext	-15[degC]	دمای محیط اطراف لوله
oil_rate	2000[m^3/h]	نرخ جریان حجمی نفت

۳-۴- پارامتر های محیط گرم

پرامتر های مربوط به محیط گرم نیز مانند پارامتر های محیط سرد می باشد، با این تفاوت که برای T_ext دمای ۲۵+ وارد شده است.

۳-۵- مش بندی

در این مطالعه نوع مش Extra fine انتخاب شده است. این نوع مش از ۸۳۴ جزء یا شبکه تشکیل شده که اندازه کوچکترین جزء آن $6*10^{-7}$ متر و اندازه بزرگترین جزء آن $1.34*10^{-4}$ متر می باشد، و به دلیل دقت در محاسبات این مش بندی انتخاب شده است. در شکل (۵) هندسه پس از مش بندی قابل مشاهده است.

شکل (۵): مش بندی هندسه

۴- نتیجه گیری

پس از حل می توان تغییرات فشار در طول خط لوله را در شکل (۶) مشاهده نمود.

شکل (۶): تغییرات فشار در خط لوله

همانطور که مشاهده می شود، در ابتدای خط لوله که نرخ جریان سیال (نفت خام) بالا می باشد، فشار به بیشترین مقدار خود (رنگ قرمز) می رسد.

هرچه در طول خط لوله پیش می رویم مشاهده می شود با کاهش نرخ جریان سیال، مقدار فشار نیز کاهش می یابد تا به کمترین میزان خود (رنگ آبی) می رسد. پس از بررسی تغییرات فشار، شروع به بدست آوردن تغییرات دمایی در طول لوله شده است.

در ابتدا محیط سرد را در نظر گرفته شده است. پس از حل شبیه سازی برای محیط ۱۵- سانتی گراد نمودار (۱) حاصل می شود. این نمودار تغییرات دما بر حسب طول لوله در لوله را در ۳ حالت بدون عایق، با عایق و ضخامت بهینه عایق نشان می دهد.

در نمودار (۱)، رنگ آبی مربوط به تغییرات دمایی در لوله بدون عایق، رنگ سبز، مربوط به تغییرات دمایی در لوله با عایق و رنگ قرمز، مربوط به تغییرات دمایی در لوله با ضخامت بهینه عایق می باشد.

با توجه به نمودار (۱) می توان دریافت که لوله بدون عایق کاری پس از طی مسافت کمی از طول لوله، دمای سیال داخل آن و دمای لوله با دمای محیط اطراف برابر می شود، اما در لوله ای که عایق کاری شده است، می توان مشاهده کرد که نه تنها دمای لوله و سیال داخل آن کاهش پیدا نکرده است، بلکه دما نیز افزایش پیدا کرده است. در نهایت، بعد از پیدا کردن ضخامت بهینه عایق، می توان مشاهده نمود که تغییرات دمایی در لوله به حداقل مقدار خود رسیده است.

نمودار (۱): تغییرات دما بر حسب طول لوله در ۳ حالت بدون عایق (آبی)، با عایق (سبز) و ضخامت بهینه عایق (قرمز) زمانی که محیط اطراف لوله سرد تر می باشد.

حال به بررسی تغییرات دمایی در محیط گرم می پردازیم.

همانطور که گفته شد دمای محیط گرم ۲۵+ در نظر گرفته شده است. این بدین معنی است که دمای داخل لوله از دمای محیط اطراف کمتر می باشد.

در شکل (۷) می توان تغییرات دمایی درون لوله را پس از عایق کاری مشاهده کنید.

شکل (۷): تغییرات دمایی درون خط لوله عایق کاری شده

با توجه به شکل (۷) مشخص می شود که وقتی خط لوله عایق کاری شده باشد، تغییرات دمایی و در ادامه آن اتلاف حرارتی به حداقل مقدار خود می رسد.

این تغییرات دمایی حدود ۲ درجه سانتی گراد می باشد که در صورت عدم عایق کاری این مقدار به ۵ درجه سانتی گراد ارتقاء می یابد. این تغییرات دمایی را با انجام محاسبات بهینه سازی می توان به صفر رساند که در ادامه در نمودار (۲) این نتیجه را مشاهده می کنید.

در نمودار (۲)، رنگ آبی مربوط به تغییرات دمایی در لوله بدون عایق، رنگ سبز، مربوط به تغییرات دمایی در لوله با عایق و رنگ قرمز، مربوط به تغییرات دمایی در لوله با ضخامت بهینه عایق می باشد.

با توجه به نمودار (۲) می توان دریافت که لوله بدون عایق کاری پس از طی مسافت کمی از طول لوله، دمای سیال داخل آن و دمای لوله با دمای محیط اطراف برابر می شود، اما در لوله ای که عایق کاری شده است، می توان مشاهده کرد که دمای لوله و سیال داخل آن افزایش چشمگیری پیدا نکرده است، و دمای سیال داخل لوله حدود ۲ الی ۳ درجه سانتی گراد افزایش داشته است. در نهایت، بعد از پیدا کردن ضخامت بهینه عایق، می توان مشاهده نمود که تغییرات دمایی در لوله به حداقل مقدار خود رسیده است.

در نمودار (۳) نیز می توان تغییرات ضخامت عایق و اتلاف حرارتی ناشی از هر ضخامت را مشاهده نمود.

نمودار (۲): تغییرات دما بر حسب طول لوله در ۳ حالت بدون عایق (آبی)، با عایق (سبز) و ضخامت بهینه عایق (قرمز) زمانی که محیط اطراف لوله گرم تر می باشد.

نمودار (۳): اتلاف حررتی ناشی از مقادیر مختلف ضخامت عایق

۵- جمع بندی

در نهایت با بکارگیری روابط بهینه سازی و با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics، ضخامت بهینه عایق را در دو محیط سرد و گرم برای دستیابی به کمترین تبادل دمایی سیال داخل لوله با محیط اطراف را بدست آوردیم. با توجه به نمودار (۳) می توان مشاهده نمود که ضخامت عایق وقتی بین ۱/۵ تا ۲/۵ سانتی متر باشد، کمترین میزان اتلاف حرارتی قابل دستیابی است. بس ضخامت بهینه عایق در این بازه می باشد.

پس در کل می توان دریافت هنگامی که ضخامت عایق را در این شرایط در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ سانتی متر انتخاب و نصب کنیم، بدین ترتیب ، هزینه های تولید را کاسته و مقدار قابل توجهی انرژی را ذخیره کرده ایم که باعث پس انداز مقدار زیادی پول و سرمایه می شود.

۶- مراجع

[۱] Kaynakli, Omer. "A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications." Renewable and Sustainable Reviews 16.1 (2012): 415-425.

[۲] Kaynakli, Omer. "Economic thermal insulation thickness for pipes and ducts: A review study." Renewable and Sustainable Reviews 30 (2014): 184-194.

[۳] Bahadori, Alireza, and Hari B. Vuthaluru. "A simple correlation for estimation of economic thickness of thermal insulation for process piping and equipment." Applied Thermal Engineering 30.2 (2010): 254-259.

[۴] Özkan, Derya B., and Cenk Onan. "Optimization of insulation thickness for different glazing areas in buildings for various climatic regions in Turkey." Applied Energy 88.4 (2011): 1331-1342.

[۵] Henghui, Fan, et al. "Evaluation of Thermal Insulation Condition of Natural Gas Purification Equipments and Pipelines in Puguang Gasfield." Technology Supervision in Industry 3 (2013): 003.

[۶] Jelle, Bjørn Petter. "Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions–Properties, requirements and possibilities." Energy and Buildings 43.10 (2011): 2549-2563.

[۷] F.P. Incropera and D.P. DeWitt, Fundamental Heat and Mass Transfer, 4th Ed., John Wiley & Sons, 1996. Eq 8.62 and Eq 7.55, respectively.

[۸] S.E. Haaland, “Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Flow,” J. Fluids Engineering, vol. 105, no. 5, pp. 89–90, 1983.

[۹] Kawashima, D., and Y. Asako. "Data reduction of friction factor of compressible flow in micro-channels." International Journal of Transport Phenomena 17.2 (2014): 257-261.

[۱۰] Moraveji, Mostafa Keshavarz, et al. "Modeling of convective heat transfer of a nanofluid in the developing region of tube flow with computational fluid dynamics." International Communications in Heat and Mass Transfer 38.9 (2011): 1291-1295.

[۱۱] Keçebaş, Ali. "Determination of insulation thickness by means of exergy analysis in pipe insulation." Energy Conversion and Management 58 (2012): 76-83.

[۱۲] McAllister, E. W. Pipeline rules of thumb handbook: a manual of quick, accurate solutions to everyday pipeline engineering problems. Gulf Professional Publishing, 2013.