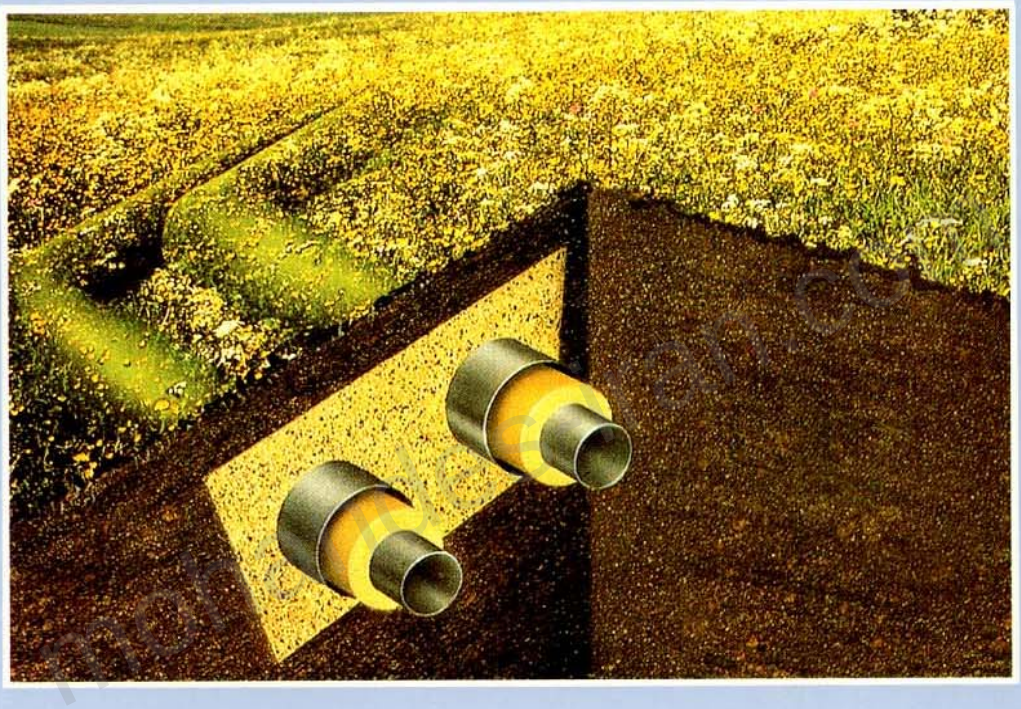
A-PDF Watermark DEMO: Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

جمهوری اسلامی ایران
وزارت نیرو
امور انرژی

راهنماهای فنی مدیریت انرژی



۱۲

ضخامت اقتصادی عایقها برای لوله های آب داغ

دفتر بهینه سازی مصرف انرژی

http://www.mohandes-iran.com

mohandes-iran.com

mohandes-iran.com

http://www.mohandes-iran.com

پیشگفتار

در طی دهۀ آینده، هـزینـۀ انرژی الکتریکی چه برای گرمایش و سـرمایش، چـه برای روشنائی و چه بـعنوان نـیروی مـحرکه در فـرآیـند تـولید صنعتی، ادارات، مدارس، منازل، ... رشد چشمگیری پیدا خواهد کرد که البته دلایل این رشـد، خارج از بحث این نوشتار است.

در عرصۀ رقابت جهانی در راستای مصرف کمتر (مصرف بهینه) و تولیـد هرچه بیشتر، کشورها، جوامع و صنایعی موفق‌تر خواهند بود که در این رقابت که شـاید از دیـدگاهی بـتوان آن را مـبارزه بـرای تـنازع بـقاء و ادامـۀ فـعالیت نـامید، بـا تحقیقات و مطالعات موفق به یافتن و پس از آن بکار بـردن راهـهای جـلوگیری از اتلاف انرژی شوند .

انرژی بطور عام و انرژی الکتریکی بطور خاص که امروز در اختیار و خـدمت هـم میهنان عزیز، قرار می‌گیرد، با هزینه‌ای به مراتب گزاف‌تر تهیه می‌شود ولیکن دولت جمهوری اسلامی ایران با تأمـین بـخشی از هـزینه‌های تـولید آن از مـحل درآمـدهای عـمومی خود و یا به قیمـت عدم انجام بسیاری از پروژه‌های زیـربنائی ملی، آنرا بدینگونه در اختیار وا می‌گذارد.

اتلاف این انرژی الکتریکی و اصولاً هر نوع انرژی تولید شده از مـنابع فسـیلی، علاوه بر خسارات مالی جبران‌ناپذیری که دارد، زیانها ی غیرقابل انکـاری نـیز بـر محیط زیست ملی ما و جهان وارد خواهد آورد.

اکنون سالیان متمادی از زمانی می‌گذرد که کشورهای پیشرفته که حتی برخی از آنها از حداکثر امکانات طبیعی و صنعتی برای تولید انرژی برخوردارند، در کـنار تلاش در جهت استفاده از انرژی‌هـای نو (خورشید، باد، امواج، ...)، استفاده صحیح از انرژی را در رأس اهـم اهـداف خـود قـرار داده و صـاحبان صـنایع، صـنعتگران، مـدیران سازمانها، ..... و حتی سازندگان ساختمانهای مسکونی و بالاخره استفاده‌کنندگان این بناها را مخاطب قرار داده و با وضع دستورالعملها و در مواردی ضوابط و قوانین بازدارنده، آنها را تشویق، راهنمائی و حتی راهبری در جهت جلوگیری از اتلاف انرژی می‌نمایند.

انجام پاره‌ای از این اقدامات، اگر در زمان مناسب نسبت به اِعمال آنها اقـدام گردد، حتی هیچگونه هزینۀ اضافی را نیز تحمیل نخواهد نمود و جهت همه‌گیر شدن جنبش جلوگیری از اتلاف انرژی، دائماً جلسات توجیهی و سمینارهائی برای تصمیم گیرندگان برگزار می‌گردد تا از پی‌آمدها و بهتر بگوئیم عواقب مـختلف آن آگاه گردند.

در کنار اقدامات فوق، تلاش متخصصین و دانشمندان در جهت اختراع، ابداع و تولید وسایل و تجهیزات کارآمد نیز جبهۀ دیگری است که برای مبارزه بـا اتـلاف انرژی گشوده شده است که از جمله آنها می‌توان بـه تـولید صـنعتی تـجهیزات و لامپهای پر انرژی، کم مصرف و بادوام اشاره کرد.

با توجه به روند افزایش جمعیت و تبعات آن و هرجه بیشـتر مـسـتهلک شـدن منابع تولید انرژی، چندان دور نخواهـد بود که نه تنها افراد، بلکه جوامع نیز درموقعـیتی قرار نداشته باشند که بتوانند بـه میزان مورد علاقۀ خـود انرژی مـصرف نمایند بلکه با هرچه فشرده‌تر شـدن جـوامع، حـتماً اهـرمهای مـلی و جـهانی و خود

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

محدودکننده‌ای وارد عمل خواهند گردید که ابتکار عمل در زمینهٔ تولید و مصرف انرژی را بعهده خواهند گرفت.

علیرغم اینکه کاربرد بعضی از اقدامات صرفه‌جویانه (یا بهتر است گفته شود استفاده صحیح و جلوگیری کننده از اتلاف بیهوده)، نیاز به مقداری سرمایه‌گذاری اولیه دارند که البته میزان آن بستگی به دامنه و وسعت اقدامات بعمل آمده دارد، ولی نکته‌ای که مبرهن و غیرقابل انکار می‌باشد آن است که این سرمایه‌گذاری اولیه در مدت کوتاهی خودبخود مستهلک می‌گردد.

علاوه بر نشست‌ها و سمینارهائی که به آنها اشاره گردید تشکیلات گوناگونی که در کشورهای مختلف جهان جهت سامان دادن به مشکل انرژی و آگاه کردن قشرهای مختلف جامعه ایجاد شده‌اند، اقدام به نشر جزوات، بروشورها و اطلاعیه‌هائی نموده و آنها را در دسترس کلیهٔ افرادی که به نوعی با مصرف و صرفه‌جوئی انرژی ارتباط دارند قرار می‌دهند.

در همین راستا، معاونت انرژی وزارت نیرو نیز اقدام به ترجمه و چاپ جزوه‌ای که ملاحظه می‌فرمائید نموده است که در کشور انگلستان و بتوسط "مرکز تحقیقات ساختمان" ـ (Building Research Establishment)، "واحد صرفه‌جویی انرژی مرکز تحقیقات ساختمان" ـ (Building Research Energy Conservation Support Unit) "واحد پشتیبانی تکنولوژی انرژی" ـ (Energy Technology Support Unit) " اداره کارآئی انرژی" (Energy Efficiency Office) تهیه گردیده‌اند که این معاونت به لحاظ ضرورت تسریع در نشر و ارائه راهنماها و دستورالعملهای فنی، هیچگونه تغییری در ارقام، آمار، نمودارها، جداول و اشکال آن نداده است ولیکن امیدوار است که انشاءا... چاپ‌های بعدی این جزوه و همچنین جزوات دیگری که در دست ترجمه و چاپ قرار دارند، براساس آمار و اطلاعات کشور ایران تهیه شده و در اختیار شما قرار داده شوند.

معاونت انرژی وزارت نیرو

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

۱ ـ مقدمه ٦
۲ ـ تأثیر عایق‌کاری ٦
۳ ـ ضخامت اقتصادی عایق ۸
۱ ـ ۳ ـ ملاحظات اساسی برای تخمین ضخامت اقتصادی ۱۰
٤ ـ انواع عایق ۱۱
٥ ـ تخمین ضخامت اقتصادی ۱۳
۱ ـ ٥ ـ استفاده از جداول خاص ۱٤
۲ ـ ٥ ـ استفاده از جداول خاص هر مورد ۱٦
٦ـ تطابق با شرایط محیطی ۲۱
ضمیمهٔ ۱: ۲۲
ضمیمهٔ ۲: ۲۳
ضمیمه ۳: ۳٥
قطعات عایقی شکل داده شده فیبری سخت ۳٦
قطعات عایقی شکل داده شده سیلیکات کلسیم سخت یا قطعاتی با ۸٥٪ اکسید منیزیم ٤۰
قطعات عایقی شکل داده شده پـلی‌ایزوسیانورات سخت یا قطعات پلی‌اورتان سخت ٤٥
قطعات عایقی شکل داده شده لاستیک نـیتریل گسـترده و فـوم پـلی‌اتیلن ٤۷
ضمیمهٔ ٤: ٤۸

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

۱ ـ مقدمه

این کتابچه اطلاعاتی را در زمینه ضخامت اقتصادی عایق برای لوله‌های آب داغ ارائه می‌دهد. اطلاعات و توصیه‌های عملی قابل توجهی در این کتابچه ارائه می‌شود تا هم مورد استفاده پرسنل ماهر قرارگیرد و هم بصورت مفاد آموزشی بکار گرفته شود.

هزینه عایق‌بندی از طریق صرفه‌جوئیهای عمده‌ای که به علت کاهش هزینه‌های سوخت ایجاد می‌شود، جبران می‌گردد. این جزوه تشریح می‌کند که چگونه ضخامت عایق را تعیین کنیم تا بهترین نتیجه را باعث گردد.

اگرچه مسئلهٔ عایق‌بندی لوله‌هایی که تحت دمای محیط کار می‌کنند نیز اهمیت دارد این جزوه تنها در زمینه عایق‌بندی لوله‌های داغ بحث می‌نماید. بویژه مباحث مربوط به لوله‌های سیستمهای آب داغ وگرمایش خانگی و غیرخانگی و لوله‌کشی فرآیند را بیان می‌نماید. اطلاعات و تکنیکها برای تعیین اقتصادی‌ترین ضخامت عایق مطابق با BS 5422 :1990 می‌باشد.

هدف این کتابچه آن است که به عنوان راهنمای مفید و خلاصه‌ای برای تعیین ضخامت اقتصادی عایق لوله‌های داغ استفاده گردد. لذا مراجع دراین جزوه از همه مدارک گسترده موجود در صنعت عایق‌بندی و موسسهٔ استانداردهای بریتانیا (BSI) [1] می‌باشند.

کتابچه‌ای تحت عنوان «عایق‌کاری تجهیزات فرآیند و بهره‌وری سوخت» تصویر گسترده‌ای از کاربرد عایق‌کاری برای تجهیزات فرآیند را ارائه می‌دهد و باید توأم با این جزوه مطالعه شود.

۲ ـ تأثیر عایق‌کاری

هر سطحی که داغ‌تر از محیط اطرافش باشد، حرارت از دست می‌دهد نرخ تلفات حرارتی وابسته به عوامل متعددی است اما دما و سطح بیشترین تأثیر را دارند. دمای بیشتر و سطح بزرگتر موجب اتلاف حرارتی بیشترمی‌شوند. افزودن یک لایهٔ عایق به یک سطح داغ دمای سطح خارجی را کاهش می‌دهد. اگرچه هنگامیکه عایق به یک لولهٔ مدور اضافه می‌شود ممکن است مساحت سطح خارجی افزایش یابد اما تأثیر نسبی کاهش دما خیلی بیشتر است و تلفات حرارتی کاهش می‌یابد. بطور مثال یک لوله بدون عایق ۱۵ میلیمتری را در نظر بگیرید که حامل یک سیال گرم بوده و ازداخل هوائی با دمای ۲۰°c عبور می‌کند بطوریکه دمای سطح خارجی آن به ۷۵°c می‌رسد. تلفات حرارتی درحدود ۶۰ وات در هر متر طول لوله است. افزودن یک لایهٔ عایق استاندارد با ضخامت ۲۵ میلیمتر مساحت سطح خارجی را تقریباً ۳/۵ برابر افزایش می‌دهد اما دمای سطح خارجی از ۷۵°c حدود ۲۳°c افت می‌کند، تأثیر کلی این کار کاهش تلفات حرارتی از ۶۰ وات به ۱۲ وات در هر متر طول لوله است.

[1] British Standard Institution

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

تلفات حرارتی باعث صرف هزینه می‌شود. تلفات حرارتی حاصل از یک لوله بدون عایق ۵۰ میلیمتری به طول ۱۰۰ متر، حامل بخار فرآیند با دمای ۱۰۰°c هزینه‌ای در حدود ۳۰۰۰ پوند در سال خواهد داشت، اگر این بخار توسط یک دیگ‌بخار گازسوز با هزینهٔ گاز در حدود ۱ پنس بر کیلووات ساعت (یا تقریباً ۳۰ پنس بر واحد حرارتی) تولید شود. اگر یک لایهٔ نازک ۵۰ میلیمتری از عایق مناسب روی آن کشیده شود، این هزینه به ۲۵۰ پوند در سال کاهش می‌یابد. بنابراین سالیانه ۲۷۵۰ پوند صرفه‌جویی می‌شود.

هنگامیکه دمای سیال فرآیند افزایش می‌یابد هزینهٔ (قابل اجتناب) به شدت افزایش می‌یابد. اگر سیال داغ دارای دمای ۲۰۰°c باشد، لولهٔ بدون عایق هزینه‌ای حدود ۱۰۰۰۰ پوند در سال خواهد داشت این میزان از تلفات حرارتی معادل تولید ۱kw برق بطور شبانه‌روزی برای بیش از ۲۵ سال می‌باشد. اگر یک لایه عایق با ضخامت ۷۵ میلیمتر روی لوله کشیده شود، این میزان تلفات می‌تواند به ۵۶۰ پوند در سال هم برسد (جهت اطمینان از وجود یک دمای مناسب برای سطح خارجی باید هنگامیکه دمای لوله افزایش می‌یابد ضخامت عایق هم افزایش یابد). بدین ترتیب یک هزینهٔ «قابل اجتناب» ۹۴۴۰ پوند در سال وجود دارد.

استفاده از عایق بر روی لوله‌های حامل سیال دما بالا، روشی معمول و پذیرفته شده است. نمی‌بایست تصور شود که هر عایق موجود مؤثرترین ترکیب برای کاهش هزینهٔ «قابل اجتناب» است. در بسیاری حالات، لایه‌های ضخیم‌تر عایق به خوبی توجیه می‌شوند. تمام سطوح داغ تلفات حرارتی دارند و همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، بایستی شیرها، فلانج‌ها[1] و غیره که اغلب به دلایل مسائل تعمیر و نگهداری، فاقد عایق هستند مورد توجه قرارگیرند. یک شیر فاقد عایق حدوداً برابر با یک متر لوله فاقد عایق با همان قطر، تلفات حرارتی دارد. فلنج‌های فاقد عایق که دارای سطح کمتری هستند حدوداً نصف این مقدار تلفات دارند. بنابراین یک شیر ۵۰ میلیمتری فاقد عایق حامل بخار فرآیند با دمای ۲۰۰°c سالانه حدود ۱۰۰ پوند و با عایق مناسب حدود ٦ پوند در سال هزینه صرف می‌کند. عایق‌کاری، تأثیری بر عملکرد شیرها نمی‌گذارد و عایق مربوطه می‌تواند جهت سهولت تعمیر ونگهداری بصورت قطعات ساده قابل جابجائی مورد استفاده قرارگیرد. فایده دیگر عایق‌کاری، دمای یکنواخت‌تر فلز است که باعث کاهش تنش‌های حرارتی القاء شده در سیستم لوله‌کشی می‌شود که این تنش‌ها می‌توانند باعث نشتی در اتصالات شوند.

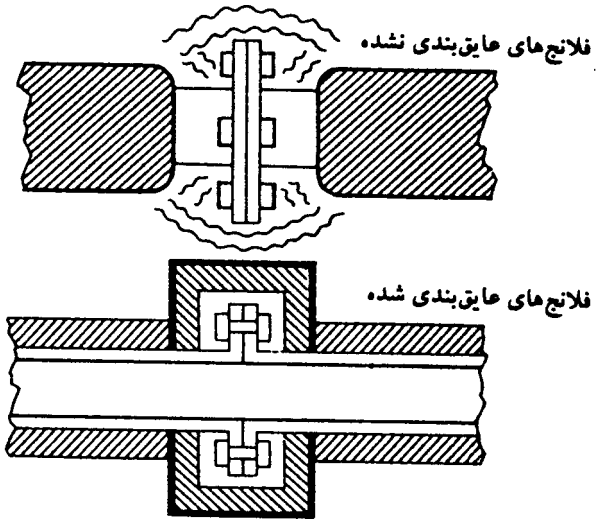
اگر چه در لوله‌های دمای بالا نوعی عایق‌کاری استفاده می‌شود، در لوله‌های کم دما با قطر داخلی کم یا لوله‌هایی که تنها متناوباً استفاده می‌شوند، عایق‌کاری غالباً صرفنظر می‌شود. با وجود این همانند شیرها و فلنج‌ها، برای این موارد نیز میزان قابل توجهی صرفه‌جریی در هزینهٔ «قابل اجتناب» قابل کسب است. بطور مثال، زمان بازگشت سرمایه[2] برای عایقی با ضخامت ۲۵ میلیمتر روی لولهٔ ۱۵ میلیمتری در یک تأسیسات حرارتی گازی خانگی که دمای کار آن حدوداً ٦۰ – ۷۰ درجه سانتیگراد می‌باشد در جدول ۱ نشان داده شده است. زمان

---

[1] Flanges
[2] Payback Periods

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

بازگشت سـرمایه عبارت از تعداد سالهایی است که سرمایه‌گذاری اولیه جـهت صـرفه‌جویی در هزینه، از طریق سوددهی حاصل از این صـرفه‌جویی در آن تـعداد سـالها جـبران می‌گردد.



شکل ۱: تلفات حرارتی از طریق فلانج‌های فاقد حرارت

جدول ۱ زمان بازگشت سرمایه برای عایق‌بندی روی لوله‌کشی حرارت مرکزی خانگی	
تعداد ساعات کار (ساعت)	زمان بازگشت سرمایه (سال)
۱۰۰۰	۲
۲۰۰۰	۱
۳۰۰۰	۰/۷
٤۰۰۰	۰/۵
(در محاسبهٔ زمان بازگشت سرمایه فرض می‌شود که کل هزینهٔ نصب عایق معادل ۲ پوند در هر متر می‌باشد)	

۳ ـ ضخامت اقتصادی عایق

مثالهای ارائه شده در بخش قبل، اشاره‌ای به صـرفه‌جویی در هـزینه دارد کـه این کار می‌تواند با استفاده از عایق‌بندی مناسب برای جلوگیری از تلفات حرارتی نامطلوب در لوله‌کشی انجام گیرد. برای یک لوله و شرایط فرآیند خاصی، نرخ تلفات بستگی به ضخامت لایهٔ عایق و عملکرد حرارتی آن دارد.

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

در اکثرحالات، مهمترین جنبهٔ عملکرد حرارتی عایق، هدایت حرارتی آن است. هدایت حرارتی بعنوان یک خاصیت فیزیکی، رابطه بین نرخ انتقال حرارت از طریق یک ماده و اختلاف درجه حرارت دو سر مسیر انتقال حرارت را بیان می‌نماید. برای ضخامت معینی از یک عایق با کاهش هدایت حرارتی، تلفات حرارتی در آن نیز کاهش می‌یابد. هدایت حرارتی مؤثر یک لایه عایق بستگی به نحوه کار گذاشتن آن نیز دارد زیرا نحوه کارگذاری عایق ممکن است مثلاً بر تعداد فضاهای خالی یا مواد نگهدارنده اثر گذارد. دمای کار بر میزان هدایت حرارتی بسیاری ازمواد عایقی نیز تأثیر می‌گذارد (به بخش ٤ «انوع عایق» مراجعه‌کنید.

از عوامل دیگری که بر عملکرد حرارتی عایق تأثیر می‌گذارد ویژگیهای سطح خارجی عایق می‌باشد که بر تلفات تشعشعی تأثیر می‌گذارد. بطور مثال تلفات تشعشعی می‌تواند با افزودن یک پوستهٔ فلزی براق به لایهٔ عایق کاهش داده شود. فواید چنین کاری به شرایط واقعی کار بستگی دارد اما میزان ۱۰ ٪ کاهش در کل تلفات حرارتی غیر عملی نخواهد بود.

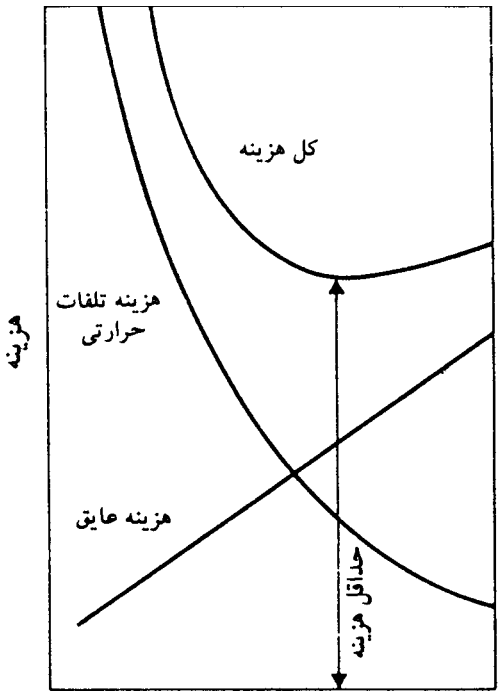
معمولاً سازندگان عایقها اطلاعاتی از عملکرد حرارتی آنها فراهم می‌آورند تا از محاسبات پیچیده انتقال حرارت اجتناب شود. اطلاعاتی که معمولاً بعنوان مقادیر «U» شناخته می‌شوند تلفات حرارتی در واحد طول لوله را برای مقادیر مختلفی از قطر لوله، دمای بخار فرآیند و ضخامت عایق ارائه می‌دهند. در حالیکه این اطلاعات جهت تخمین مفید هستند. مهم است که توجه شود که مقادیر، براساس شرایط خارجی ویژه‌ای (اغلب هوای ساکن با دمای ۲۰°c) می‌باشند. هنگامیکه شرایط واقعی کار بطور قابل توجهی با شرایط در نظر گرفته شده برای مقادیر «U» متفاوت باشد باید به این تفاوت توجه کرد.

با انتخاب مناسب نوع و ضخامت عایق می‌توان تلفات حرارتی سیستم‌های لوله‌کشی را به طور مؤثر به صفر رساند. هزینهٔ بهره‌برداری از یک لوله داغ برابر با هزینهٔ تلفات حرارتی به علاوه هزینهٔ هر نوع عایق‌کاری می‌باشد. بطور کلی، با افزایش ضخامت عایق و بهبود عملکرد حرارتی آن هزینه‌ای بعنوان جریمه وجود دارد. اگرچه صرف هزینهٔ بیشتر باعث صرفه‌جوئی بیشتر در هزینه می‌شود اما بیش از حد بخصوصی، افزایش هزینه عایق‌بندی در مقابل صرفه‌جوئی حاصل قابل توجیه نیست.

تأثیر ترکیبی افزایش هزینه به دلیل افزایش ضخامت لایهٔ عایقی و افزایش صرفه‌جویی در هزینه در شرایط خاص بهره‌برداری در شکل ۲ نمایش داده شده است.

حداقل هزینهٔ نشان داده شده در شکل ۲، عبارتست از حداقل مقدار مجموع هزینه‌های عایق‌بندی و تلفات حرارتی که در یک مدت زمان بخصوصی محاسبه می‌گردد (دوره ارزیابی). حداقل هزینه، متناظر با یک ضخامت معین عایق خواهد بود که این ضخامت بعنوان ضخامت اقتصادی عایق‌کاری شناخته می‌شود. در عمل، چون بسیاری از انواع عایقها تنها در ضخامتهای خاصی وجود دارند لذا منحنی‌های نشان داده شده بدین صورت هموار و صاف نیستند. با این وجود، اصول کلی قابل اعمال است.

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com



شکل ۲:ضخامت اقتصادی عایق‌کاری

۱ ـ ۳ ـ ملاحظات اساسی برای تخمین ضخامت اقتصادی

اکثر اطلاعاتی که جهت تخمین ضخامت اقتصادی عایق مورد نیاز است از شکل ۲ نتیجه می‌شود. بویژه، اطلاعاتی مربوط به محاسبهٔ هزینهٔ تلفات حرارتی سیستم لوله‌کشی در دورهٔ ارزیابی و هزینهٔ نصب عایق‌کاری مورد نیاز هستند. هر دو مورد باید برای مقادیر مختلفی از ضخامت عایق محاسبه گردند. در مرجع اصلی ایـن کتابچه، BS 5422:1990 در دوره ارزیابی تعداد کل ساعات کاری است که در این مدت قرار است سرمایه‌گذاری مورد ارزیابی قرارگیرد. بنابراین دوره مزبور مساوی حاصلضرب سـاعات کار سالانه و عمر سـرمایه‌گـذاری برحسب سـال است. هزینه‌های سالانه با معنی‌تر از هزینه‌های دوره ارزیابی هستند. در نـتیجه، در هر بررسی مربوط به ضخامت اقتصادی، تعیین هزینه‌های سالانه تـوصیه مـی‌شود و هزینه‌های دورهٔ ارزیابی بسادگی از اطلاعات سالانه تعیین می‌شوند. بطور ایده‌آل، عمر سرمایه‌گذاری وابسته به عمر مفید عایق است اما اغلب، سیاست شرکتها در خصوص سرمایه‌گذاری، طول زمان کوتاهتری را دیکته می‌نماید. اطـلاعات لازم برای بررسی کامل ضخامت اقتصادی می‌تواند بدین صورت خلاصه شود:

۱ ـ تعیین هزینهٔ سالانهٔ تلفات حرارتی در هر متر از طول لوله

اطلاعات لازم:

- هزینهٔ سوخت (بر حسب واحدهای معمولی خرید بطور مثال پنس بر واحد حرارتی)

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

- بازده دیگ‌بخار (برحسب درصد)
- دوره سالانه بهره‌برداری (برحسب ساعت)
- تلفات حرارتی در هر متر از طول لوله (برحسب وات بر متر) که وابسته است به:

اندازه لوله

دمای بهره‌برداری

نوع و ضخامت عایق

شرایط محیطی

(روشهای تخمین تلفات حرارتی از روی این اطلاعات در بخش ۵ بیان می‌شود)

۲ ـ تعیین هزینهٔ عایق‌کاری

اطلاعات لازم:

ـ هزینهٔ ماده عایق (برحسب پوند بر هر متر لوله)

ـ هزینه‌های فرعی[1] (برحسب پوند بر هر متر لوله)

ـ هزینه‌های نیروی انسانی (برحسب پوند بر هر متر لوله)

۳ ـ تعیین دورهٔ ارزیابی

ـ عمر سرمایه‌گذاری (برحسب سال)

ـ مدت زمان بهره‌برداری سالانه (برحسب ساعت)

بررسی تعیین ضخامت اقتصادی عایق می‌تواند با توجه به اصول اولیه و با استفاده از اطلاعات پایه انجام گیرد. این روش می‌تواند هم جزئیات دقیق یک کاربرد خاص و هم روش استاندارد شرکت را برای اززیابی بالقوه سرمایه‌گذاری بصورت توأم بکار گیرد. بطور مثال، تکنیکهای تنزل پول (DCF)[2] توسط بعضی از سازمانها بکار گرفته می‌شوند. در طرف مقابل، جداول ضخامتهای اقتصادی براساس مقادیر نمونهٔ هزینه‌ها و غیره آماده شده‌اند. استفاده از این جداول ممکن است برای یک حالت خاص جواب بهینه را فراهم نکند اما معمولاً پاسخ بهتری را نسبت به انتخاب دلخواه تأمین می‌نماید.

قبل از اینکه روشهای دستیابی به مقدار ضخامت اقتصادی را مورد توجه قرار دهیم، بررسی خلاصه‌ای از انوع عایقهای موجود امری مفید می‌باشد. انتخاب نوع عایق بر عملکرد حرارتی و هزینه‌های نصب تأثیر می‌گذارد.

٤ ـ انواع عایق

مواد عایقی بصورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

ـ غیرآلی: ساخته شده ازمواد بدون شکل یا بلوری سیلیکونی/آلومینیمی/کلسیمی

---

[1] Ancillary
[2] Discounted

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

ـ آلی: ساخته شده از پلیمرهای هیدروکربنی بصورت رزین‌های ترموستینگ/ترموپلاستیک [1] یا پلاستیک‌ها.

ماده عایقی می‌تواند بصورت انعطاف‌پذیر یا صلب باشد که هر دو نوع آنها بصورت قطعات لوله‌ای شکل وجود دارند. جدول ۲ فهرستی از انواع عایقهای عمده را همراه با جزئیات مربوطه ارائه می‌دهد.

انواع خاصی از عایقها می‌توانند به صورت اسپری اعمال شوند که این روش بخصوص برای لوله‌های بزرگ مناسب است. از بین مواد عایق فهرست شده در جدول ۲، پشم معدنی و فوم سخت پلی‌اورتان می‌توانند بدین روش بکار گرفته شوند. مواد عایق دیگری که بصورت اسپری بکار گرفته می‌شوند عبارتند از ورمیکولایت [2] (با حداکثر دمای ۱۱۰۰°c) و سیلیکات آلومینیوم (با حداکثر دمای ۱۲۶۰°c). یک نگهدارنده ممکن است در این موارد لازم باشد.

هدایت حرارتی عایقها بطور قابل توجهی با نوع ماده، چگالی و دمای‌کار آن تغییر می‌کند. جدول ۳ نمونه‌ای از یک مجموعهٔ مواد را ارائه می‌دهد.

جدول ۲: مواد عایقی موجود بصورت قطعات لوله‌ای شکل

ماده عایقی	حداکثر دمای تقریبی برحسب °C	چگالی حجمی معمولی برحسب kg/m³
پشم معدنی (شیشه)	۲۳۰	۱۵-۱۰۰
پشم معدنی (سنگی)	۸۵۰	۸۰-۱۵۰
اکسید منیزیم	۳۱۵	۱۸۰-۲۲۰
سیلیکات کلسیم	۸۰۰	۱۹۰-۲۶۰
فوم سخت‌پلی اورتان	۱۱۰	۳۰-۱۶۰
فوم‌سخت‌پلی‌ایزوسیانورات	۱۴۰	۳۰-۶۰
فوم سخت فنولیک	۱۲۰	۳۵-۲۰۰
پلیتن	۸۰	۳۰-۴۰
لاستیک مصنوعی	۱۱۶	۶۰-۱۰۰

[1] Thermosetting/Thermoplastic Resin
[2] Vermiculite

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

جدول ۳: هدایت حرارتی مواد عایقی				
مواد عایقی	چگالی kg/m^3	هدایت حرارتی W/m.k درجه حرارت °c		
		۵۰	۱۰۰	۳۰۰
سیلیکات کلسیم	۲۱۰	۰/۰۵۵	۰/۰۵۸	۰/۰۸۳
لاستیک نیتریل گسترده	۶۵-۹۰	۰/۰۳۹	–	–
پشم معدنی (شیشه)	۱۶	۰/۰۴۷	۰/۰۶۵	–
	۴۸	۰/۰۳۵	۰/۰۴۴	–
پشم معدنی (سنگی)	۱۰۰	۰/۰۳۷	۰/۰۴۳	۰/۰۸۸
اکسید منیزیم	۱۹۰	۰/۰۵۵	۰/۰۵۸	۰/۰۸۲
فوم پلی ایزوسیانورات	۵۰	۰/۰۲۳	۰/۰۲۶	–

دمای کار ملاک خوبی برای انتخاب یک ماده عایقی خاص است اما عوامل دیگر مربوط به محیط کار نیز باید به حساب آورده شوند. این عوامل شامل کاربرد داخلی یا خارجی ماده، سطح نهایی مورد نیاز، قیود مقاومتی سازه و قابلیت دسترسی می‌باشد. اگرچه مواد موجود همگی نیازهای مشترکی را برآورده می‌سازند اما توجه به این نکته مهم است که ضخامت اقتصادی، با نوع عایق تغییر می‌کند زیرا که خصوصیات و هزینه‌های انواع عایقها با یکدیگر متفاوت است.

توضیحات بیشتر در مورد مواد عایقی می‌تواند در BS 5422:1990 یافت شود. در کتابچه‌ای تحت عنوان «عایق‌کاری تجهیزات فرآیند و بهره‌وری سوخت» اطلاعات عمده‌ای درباره عایق‌کاری تعدادی از تجهیزات فرآیندها به همراه توضیحات بیشتری در مورد نتایج نهائی، همراه با تجارب مفید ارائه می‌شود.

۵ ـ تخمین ضخامت اقتصادی

سه روش مختلف برای تخمین ضخامت اقتصادی وجود دارد. اولین روش به شکل خاصی از جداول آماده شده‌ای استفاده می‌کند که این جداول براساس فرضیاتی برای هر قسمت از اطلاعات مورد نیاز جهت تخمین ضخامت اقتصادی پایه‌گذاری شده است. فرضیات مورد نظر در مورد تعداد زیادی از کاربردها معتبر هستند و استفاده از این جداول بسیار ساده است. بهرحال این روش مقداری خطا دارد چرا که جزئیات خاص مسئله را نمی‌توان وارد محاسبات نمود. روش دوم و روش صحیح‌تر تنظیم جداول خاص هر مورد است که جزئیات بخصوص مسئله را بحساب می‌آورد و لذا ضریب اطمینان بیشتری را فراهم می‌سازد. این دو روش به تفصیل در این بخش توضیح داده می‌شوند.

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

سومین روش تخمین ضخامت اقتصادی، روش حل جبری است که نیاز به مهارت در عملیات ریاضی دارد اما کمترین تعداد مفروضات و بیشترین انعطاف‌پذیری را در بین سه روش گفته شده دارد این روش تنها باید هنگامی بکاربرده شود که مقدار خیلی دقیق ضخامت مورد نیاز است و حال آنکه اغلب، این کار لزومی ندارد زیرا بسیاری از انواع عایقها تنها در اندازه‌های معینی وجود دارند. به همین دلیل، روش جبری در اینجا توضیح داده نمی‌شود.

۱ ـ ۵ ـ استفاده از جداول خاص

جداول ضخامت اقتصادی عایقها برای انواع مختلف کاربردها در BS 5422:1990 بیان شده است. ضخامتهای اقتصادی برای مقادیر مختلفی از اندازهٔ لوله، دمای سطع لوله (معمولاً دمای سیال فرآیند) و هدایت حرارتی عایق دسته‌بندی شده است. این جداول در ضمیمه ۲ بصورت زیر آورده شده‌اند:

- سرویسهای گرمایش و آب داغ غیر خانگی:

سرویسهای گرمایش

ـ دیگ بخار با سوخت جامد — جدول ۸

ـ دیگ بخار گاز سوز — جدول ۹

ـ دیگ بخار نفت سوز — جدول ۱۰

سرویسهای آب داغ — جدول ۱۱

- سرویسهای گرمایش و آب داغ خانگی:

سرویسهای گرمایش

ـ نواحی دارای گرمایش — جدول ۱۲

ـ نواحی بدون‌گرمایش — جدول ۱۳

- سرویسهای آب داغ
- لوله‌کشی فرآیند

ـ نواحی دارای گرمایش — جدول ۱٤

ـ نواحی بدون گرمایش — جدول ۱۵

- لوله‌کشی فرآیند — جدول ۱٦

این جداول ساده‌ترین روش را برای تعیین مقدار ضخامت اقتصادی لازم فراهم می‌کنند اما شرایط کاری تحت مطالعه باید بطور معقولی فرضیات بکار رفته جهت محاسبهٔ مقادیر جدول را برآورده سازد. هنگامیکه اطلاعات مربوط به کاربرد مورد نظر دردسترس نباشد از جداول استفاده می‌کنیم اما اگر اطلاعات در دسترس باشند آنگاه باید توافق مسئله با فرضیات جدول را بررسی کنیم و درصورت توافق از جدول استفاده کنیم. شرایط محیطی درخصوص جداول ۸ تا ۱٦ هوای ساکن با دمای c ۲۰° است مگر آنکه بر خلاف آن بیان شده باشد.

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

جدول ٤ هزینه‌های سوخت و دوره ارزیابی بکار رفته بـرای مـحاسبه مـقادیر جدول را برای سه‌گونهٔ کـاربرد شـامل سـرویسهای آب داغ و حـرارت مـرکزی غیرخانگی، سرویسهای آب داغ و حرارت مرکزی خانگی و لوله‌کشی فرآیند نشان می‌دهد. هزینه‌های سوخت بر حسب پنس بـر مگاژول مفید بیان می‌شود که عبارتست از هزینه سوخت برحسب پنس بر مگاژول تقسیم بر بازده دیگ بخار.

جدول۴: هزینه‌های سوخت و دوره ارزیابی برای محاسبهٔ ضخامت اقتصادی جداول ۸ تا ۱۶

	هزینه سوخت پنس بر مگاژول مفید	دورهٔ ارزیابی ساعت[1]
سرویسهای آب داغ و حرارت مرکزی غیر خانگی		
سوخت: سوخت جامد	۰/۳۸	
گاز	۰/۵۷	
نفت	۰/۶۷	
کاربرد: حرارت مرکزی		۲۰۰۰۰
سرویسهای آب داغ		۴۰۰۰۰
سرویسهای آب داغ و حرارت مرکزی خانگی		
سوخت: گاز	۰/۷۶	
کاربرد: حرارت مرکزی		۱۷۰۰۰
سرویسهای آب داغ		۹۰۰۰
لوله‌کشی فرآیند	۲۰/۶	۴۰۰۰۰

نکات:

(۱) دورهٔ ارزیابی بر اساس یک کار متناوب نمونه برای تعداد ساعات نشان داده در یک دورهٔ پنج ساله مـحاسبه شده است (به عنوان مثال برای کاربرد پیوسته غیرخانگی برای ۵ سال = ٤٠٠٠٠ ساعت)

(۲) استنتاج شده از BS 5422:1990

جدول ۱۷ هزینهٔ مفید حرارت را برای سوختهای عمده به ازای مقادیر مختلفی از بهای سوخت که برحسب واحدهای مـعمول خرید و بر پایهٔ بازده نمونه دیگ‌های بخار است، ارائه می‌دهد. برای یک بهای معین خرید، هزینهٔ مفید حرارت می‌تواند مستقیماً از جدول ۱۷ بدست آید. هزینه‌های عایق‌کاری به روش ویژه‌ای که در زیر توصیف می‌گردد بیان می‌شود. بطورکلی، ضخامتهای اقتصادی براسـاس تخمین هزینه‌های سوخت، عایق‌بندی و نصب بر پایه قـیمت‌های سـال ۱۹۹۵ میلادی محاسبه شده‌اند.

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

هزینه‌های عایق‌کاری و نصب با هم ترکیب شده و بعنوان هزینه افزایشی[1] عایق‌کاری تعریف می‌شود. مقادیر هزینهٔ افزایشی در جداول ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ ارائه شده‌اند. جداول ۱۸ و ۱۹ به ترتیب مربوط به سرویسهای آب داغ و حرارت مرکزی غیرخانگی و خانگی هستند. جداول ۲۰ و ۲۱ بر ضخامت تک لایه و دو لایه عایق بر روی لوله‌کشی فرآیند دلالت دارند.

۲ ـ ۵ ـ استفاده از جداول خاص هر مورد

هنگامیکه اطلاعات مربوط به یک کاربرد خاص بطور قابل توجهی با فرضیات استفاده شده در محاسبه مقادیر جداول ضخامت اقتصادی (جداول ۸ تا ۱۶) تفاوت داشته باشد، باید محاسبات ویژه‌ای را در بارهٔ آن کاربرد خاص انجام داد. ساده‌ترین روش محاسبه، تهیه جدولی است که هزینهٔ کل یعنی هزینهٔ تلفات حرارتی بعلاوه هزینه‌های عایق‌کاری را در دورهٔ ارزیابی برای مقادیر مختلف ضخامتهای عایق نشان دهد. بنابراین ضخامتی که حداقل هزینهٔ کل را نتیجه دهد بعنوان ضخامت اقتصادی انتخاب می‌گردد.

جدولی بصورت شکل ۳ مورد نیاز و اطلاعات مندرج در بخش ۳ «ضخامت اقتصادی عایق» برای تکمیل کردن این جدول لازم است. مفهوم عناوین در جدول و روش محاسبهٔ مقادیر مربوطه بصورت زیر می‌باشد. جهت وضوح مثال انجام شده در صفحهٔ ۲۵ هر عنوان یا یک شماره مرحله مشخص شده است.

ضخامت عایق (مرحلهٔ ۱)

جدول برای یک دسته مقادیر ممکن ضخامت‌ها تکمیل می‌شود. اگر لازم باشد، لولهٔ بدون عایق یعنی ضخامت عایق برابر با صفر میلیمتر، را می‌توان بعنوان عنصر اول جدول قرار داده و هر یک از ضخامتهای موجود عایق انتخاب شده را، بعنوان عناصر بعدی در جدول قرار داد. راه دیگر اینست که ضخامت اقتصادی در جدول بعنوان یک راهنما برای مقدار تقریبی ضخامت و مقادیری از ضخامت، نزدیک به این مقدار موجود، استفاده گردد.

ضخامت عایق	تلفات حرارتی	ضریب هزینه	هزینه حرارت تلف شده دورهٔ ارزیابی	هزینه نصب عایق	هزینهٔ کل
میلی‌متر	وات بر متر	پوند بر وات	(پوند بر یک متر از طول لوله)	(پوند بر یک متر از طول لوله)	(پوند بر یک متر از طول لوله)

شکل ۳: نمونهٔ جدول موردنیاز برای جداول خاص هر مورد

[1] Incremental cost

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

تلفات حرارتی (مرحلهٔ ۲)

نرخ تلفات حرارتی بر حسب وات در هر متر از طول لوله است، این تلفات وابسته به دمای جریان فرآیند، قطر لوله، ضخامت عایق و شرایط محیطی است. تلفات حرارتی می‌تواند براحتی توسط نمودارهای از قبل آماده شده (نمودارهای ۱ الی ۲۵) که تلفات حرارتی را برای انوع عایقها و مقادیری از ضخامت عایقها، قطر لوله‌ها و دما نشان می‌دهد، تعیین‌گردد. جهت سهولت، این نمودارها در ضمیمهٔ ۳ مجدداً آورده شده‌اند. جدول ۵ بطور مناسبی اطلاعات هر نمودار را خلاصه می‌کند. در هر مورد خاص تحت مطالعه، با توجه به نوع عایق و دمای لوله، نمودار لازم را از جدول ۵ تعیین نمایند. استفاده از این نمودارها در نمودار ۳ که برای یک نوع عایق خاص با قطعات فیبری سخت [1] و دمای تا c°۱۰۰ است، نشان داده شده‌است. به‌طور مثال خطوط نقطه‌چین نشان می‌دهند که یک لولهٔ ۵۰ میلیمتری با عایقی به ضخامت ۵۰ میلیمتر دارای نوع تلفات حرارتی برابر با ۲۰W/m می‌باشد، حال آنکه همان لوله بدون عایق دارای تلفات حرارتی برابر با ۲٤۰W/m می‌باشد. به روشی مشابه می‌توان مقدار تلفات حرارتی را برای هر ترکیبی از قطر لوله و ضخامت عایق بدست آورد. اگر شرایط محیطی همراه با باد باشد آنگاه باید به بخش ٦ مراجعه کرد.

ضریب هزینه (مرحلهٔ ۳)

ضریب هزینه عبارتست از هزینهٔ یک وات تلفات حرارتی در هر متر از طول لوله در دورهٔ ارزیابی، برحسب پوند. ضریب هزینه وابسته به دوره ارزیابی و هزینه حرارت مفید می‌باشد. مراحل تعیین ضریب هزینه عبارتند از:

۱) تعیین میزان مگاژول حرارتی که در واحد طول لوله در دوره ارزیابی تلف می‌شود با این شرط که نرخ تلفات حرارتی یک وات برمتر باشد. یک وات برابر با یک ژول بر ثانیه است. بنابراین اگر دوره ارزیابی برحسب ساعت بیان شود میزان ژولی که همراه با یک وات تلفات حرارتی تلف می‌شود عبارتست از:

دورهٔ ارزیابی × ۳٦۰۰

یک مگاژول برابر با یک میلیون ژول ($۱۰^{۶}$ ژول) می‌باشد بنابراین میزان مگاژولی که با یک وات تلفات حرارتی تلف می‌شود عبارتست از:

($۱۰^{۶}$/(دورهٔ ارزیابی × ۳٦۰۰)

۲) تعیین ضریب هزینه که عبارتست از حاصلضرب هزینهٔ حرارت مفید بر حسب پنس بر مگاژول در میزان مگاژول تلف شده یعنی:

($۱۰^{۶}$/(هزینه/ دورهٔ ارزیابی × ۳٦۰۰)

حاصل را باید بر ۱۰۰ تقسیم کنیم تا ضریب هزینه بر حسب پوند بر وات بیان شود.

[1] Performed Rigid Fibrous Sections

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

این دو مرحله می‌توانند بصورت یک فرمرل خلاصه شوند:

$$\text{ضریب هزینه} = \frac{\text{پنس}}{\text{مگاژول}} \times \text{دورهٔ ارزیابی} \times \frac{۳۶}{۱۰^{۶}}$$

هزینهٔ حرارت تلف شده در دورهٔ ارزیابی (مرحلهٔ ٤)

این هـزینه عبارتسـت از هزینه کل حرارت تلف شده بر واحد طـول لوله بـرای ضخامت خاصی از عایق در دوره ارزیابی. ستون مربوط به تلفات حرارتی، تلفات را بر حسب وات بر متر و ستون ضریب هزینه، هزینه را برحسب پوند بر وات برای دوره ارزیابی نشان می‌دهند. بنابراین هزینهٔ تلفات حرارتی بصورت زیـر مـحاسبه می‌شود:

ضریب هزینه × تلفات حرارتی

جدول ۵: خلاصه‌ای از نمودارهای تلفات حرارتی (ضمیمهٔ ۳)

دمای سطح لوله (°c)	شمارهٔ نمودار — نوع عایق A	B	C	D
۵۰	۱	۱۱		۲۴
۷۰			۲۱	
۷۵	۲	۱۲		۲۵
۱۰۰	۳	۱۳	۲۲	
۱۲۵			۲۳	
۱۵۰	۴	۱۴		
۲۰۰	۵	۱۵		
۳۰۰	۶	۱۶		
۴۰۰	۷	۱۷		
۵۰۰	۸	۱۸		
۶۰۰	۹	۱۹		
۷۰۰	۱۰	۲۰		

انواع عایقها: A: قطعات عایقی شکل داده شده فیبری سخت

B: قطعات عایقی شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم (قطعات عایقی اکسید منیزیم تنها تا $۳۰۰^{\circ}c$)

C: قطعات عایقی شکل داده شدهٔ پلی‌ایزوسیانورات یا پلی‌اورتان (قطعات عایقی پلی‌اورتان تنها تا $۱۰۰^{\circ}c$)

D: قطعات عایقی شکل داده شده لاستیک نیتریل‌گسترده و فوم‌پلی‌اتیلن

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

هزینهٔ نصب عایق (مرحلهٔ ۵)

عبارتست از کل هزینهٔ عایق‌کاری در هر متر از طـول لوله شـامل هـزینهٔ مـواد عایقی، هزینهٔ نصب، سطح نهایی تمام شده، مواد نگهدارنده و غیره. این هزینه باید برای هر ضخامتی از عایق مورد نظر محاسبه شود.

هزینهٔ کل (مرحلهٔ ٦)

این هزینه عبارتست از مجموع هزینه تلفات حرارتی در دوره ارزیابی و هزینه نصب عایق‌کاری.

مثال:

مثال زیر کاربرد روش جدول‌بندی در هر مورد خاص را برای محاسبه ضخامت اقتصادی نشان می‌دهد.

یک سیستم گرمایشی غیرخانگی، بخار را در دمای $۱۰۰^{\circ}c$ از طریق لوله‌های ۵۰ میلیمتری استفاده می‌نماید. بخار توسط یک دیگ بخارگازی که دارای بازده ۷۰٪ است تأمین می‌شود و هزینهٔ گاز ۲۸ پنس بر واحد حرارتی است. قرار است از مادهٔ عایق فیبری شکل داده شده‌ای (با هدایت حرارتی $۰/۵۵۰W/(m.k)$) اسـتفاده شود. هزینهٔ کل عایق نصب شده با ضخامتهای گوناگون موجود از طرف سـازنده بصورت زیر می‌باشد:

ضخامت ۱۹ میلیمتر	۱/٤ پوند بر متر
۲۵ میلیتر	۲ پوند بر متر
۳۲ میلیتر	۲/۳ پوند بر متر
۳۸ میلیتر	۲/۹ پوند بر متر
۵۰ میلیتر	۸/٤ پوند بر متر

دورهٔ ارزیابی ۲۲۰۰۰ ساعت است (عمرسرمایه‌گذاری ۵ سال با ٤٤۰۰ ساعت بهره‌برداری سالانه) و می‌توان فرض نمود که لوله‌کشی در محیطی با هوای ساکن و دمای $۲۰^{\circ}c$ است.

مرحلهٔ ۱: ضخامت عایق

برای این مسئله، جدول ۹ نشان می‌دهد که ضخامت اقتصادی عایق تا ۳ میلیمتر است (نتیجهٔ حاصل از جدول‌بندی برای یک لوله با قطر خارجی ٦۰/۳ میلیمتر که نزدیکترین مقدار به مسئلهٔ مورد نظر ما می‌باشد). در نتیجه، محاسبات پیرامون این ضخامت مورد نیاز است و اولین تخمین برای ضخامت اقتصادی باید ۲۵ میلیمتر باشد. حال می‌توان مـقادیر هر سـتون از جدول تخمـین را محاسبه نمود.

مرحلهٔ ۲: تلفات حرارتی

نمودار ۳، نمودار تلفات حرارتی مناسب برای این مسئله است که نشان می‌دهد یک لولهٔ ۵۰ میلیمتری با عایق فیبری شکل داده شده با ضخامت ۲۵ میلیمتر دارای نرخ تلفات حرارتی برابر با $۳۰W/m$ می‌باشد.

مرحله ۳: ضریب هزینه

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

جدول ۱۷ نشان می‌دهد که هزینهٔ مفید حرارت برای یک دیگ بخار گازی بـا بازده ۷۰٪ و هزینهٔ سوخت ۲۲/۱٦ پنس بر واحد حرارتی، ۰/۳ پنس بر مگاژول و برای سوختی با هزینه ۲۹/٥٤ پنس بر واحد حرارتی، ۰/٤ پنس بر مگاژول است. در این مسئلهٔ خاص هزینهٔ گاز ۲۸ پنس بر واحد حرارتی بوده و باید هزینهٔ مفید حرارت محاسبه شود. برای این کار با یک تناسب سـاده مـی‌توان هـزینهٔ مـفید را بصورت زیر محاسبه کرد:

هزینهٔ مفید = [۰/۳ / ۲۲/۱٦] = ۰/۳۸ پنس/مگاژول

مدت زمان محاسبه ۲۲۰۰۰ ساعت است و لذا ضریب هزینه عبارتست از:

ضریب هزینه = ۰/۳۸ × ۲۲۰۰۰ × ۳٦/۱۰۰ = ۰/۳ پوند/وات

توجه کنید که ضریب هزینه برای ضخامتهای مختلف عایق یکسان است.

مرحلهٔ ٤: هزینهٔ حرارت تلف شده در دورهٔ ارزیابی

حاصلضرب ضریب هزینه در حرارت تلف‌شده برابر بـا هـزینه حـرارت تـلف‌شـده اسـت. بنابراین:

هزینهٔ حرارت = ۳۰ × ۰/۳ = ۹ پوند/متر

مرحلهٔ ٥: هزینهٔ نصب عایق

در این مسئله این هزینه برابر با ۲ پوند بر مـتر داده شـده است.

مرحلهٔ ٦: هزینهٔ کل

مجموع هزینهٔ حرارت و هزینهٔ نـصب عایق (مرحلهٔ ٤ + مرحـلهٔ ٥) هزینهٔ کل می‌باشد.

هزینهٔ کل = ۹ + ۲ = ۱۱ پوند/متر

برای مقادیر دیگر ضخامت نیز محاسبات مشابهی انجام‌گرفته و نتایج در جدول ٦ درج شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد کـه حـداقـل هـزینه، جـهت عـایقی بـا ضخامت ۳۸ میلیمتر می‌باشد و بایستی ضخامت عایق این مقدار انتخاب گردد. توجه کنید که در این مثال ضخامت اقتصادی حاصل از روش جدول‌بندی تقریباً برابر با مقدار حاصل از جداول از قبل آماده می‌باشد. این مطلب برای هر کـاربرد صادق نیست. همچنین باید بخاطر داشته باشیم که مقادیر هزینهٔ کـل بـه شـدت وابسته به معیارهای سرمایه‌گذاری سازمان می‌باشد.

جدول ۶: مثال تعیین ضخامت اقتصادی توسط جدول‌بندی

ضخامت عایق (mm)	تلفات حرارتی (w/m)	ضریب هزینه (£/w)	هزینهٔ تلفات حرارتی (£/m)	هزینهٔ نصب عایق (£/m)	هزینهٔ کل (£/m)
۲۵	۳۰	۰/۳	۹	۲	۱۱
۳۲	۲۶	۰/۳	۷/۸	۲/۳	۱۰/۱۰
۳۸	۲۳	۰/۳	۶/۹	۲/۹	۹/۸
۵۰	۲۰	۰/۳	۶	۸/۴	۱۴/۴

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

٦ـ تطابق با شرایط محیطی

تمام روشهایی که در بالا اشاره شد بر اساس شرایط محیطی با هوای ساکـن و دمای $20^{\circ}c$ محاسبه شده‌اند. حرکت هوا که در اکثر حالات عـملی از باد نـاشی می‌شود و دماهای مختلف محیط می‌تواند تأثیر بسزایی روی میزان تلفات حرارتی و در نتیجه روی ضخامت اقتصادی عایق داشته باشد. به عـنوان مـثال، بـادی بـا سرعت ۳۰کیلومتر بر ساعت تلفات حرارتی را تقریباً بین ٤ تـا ٦ بـرابـر افـزایش می‌دهد.

احتساب دقیق این آثار نیازمند بکاربردن معادلات اساسی انتقال حرارت است که در ضمیمهٔ ٤ بیان شده است. بهرحال مقادیر تلفات حـرارتی بـیان شـده در نمودارهای ۱ تا ۲۵ در ضمیمهٔ ۳ که در روش جدولبندی برای ارزیابی ضخامت اقتصادی استفاده می‌شوند می‌توانند براحتی برای در نظر گرفتن آثار بـاد تصحیح شوند.

جدول ۷ ضرایب تصحیح سرعت باد را ارائه می‌دهد. مـقدار تلفات حـرارتـی حاصل از نمودارهای۱ تا ۲۵ باید در ضرایب نشان داده شـده در جدول ۷ ضرب شـوند.

ضرایب بیان شده درجدول ۷ مربوط به سطوح با شدت انتشار زیاد، متوسط و کم دلالت بر طبیعت سطح خارجی عایق دارند. بعنوان یک راهنمایی، سطح رنگ شده معمولاً دارای خاصیت انتشار باد، فولاد اکسید شده دارای خاصیت انـتشار متوسط و آلومینیم صیقلی دارای خاصیت انتشار کم می‌باشند.

اگر اطلاعاتی از سرعت باد در دسترس نباشد آنگاه مقادیر زیر توصیه می‌شوند:

سرعت باد برای مکانهای سرپوشیده ۱ متر بر ثانیه

سرعت باد برای مکانهای عادی ۳ متر بر ثانیه

سرعت باد برای مکانهای روباز ۱۰ متر بر ثانیه

جدول ۷: ضرایب تصحیح سرعت باد

سرعت باد	ضرایب		
(متر بر ثانیه)	سطح با خاصیت انتشار زیاد	سطح باخاصیت انتشارمتوسط	سطح با خاصیت انتشار کم
هوای ساکن	۱	۱	۱
۱	۱/۳۵	۱/۴۴	۱/۵۸
۲	۱/۶۵	۱/۸۱	۲/۱۱
۳	۲	۲/۲۵	۲/۷۲
۵	۲/۶	۳	۳/۸۶
۱۰	۴	۴/۷۵	۶/۳۲

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

ضمیمهٔ ۱:

برخی از تبدیلات مفید

تبدیل ضرایب برای واحدهایی که در این کتابچه استفاده شده‌اند:

	SI				انگلیسی
دما	°c	×	۱/۸+۳۲	=	°F
طول	mm	×	۰/۰۳۹۴		in
	W	×	۳/۲۸۰۸	=	ft
حجم	liters	×	۰/۲۲	=	gal
وزن	tonne	×	۰/۹۸۴۲	=	ton
انرژی	GJ	×	۹/۴۷۸۲	=	therm
نرخ جریان حرارتی	W/Linear m	×	۱/۰۴	=	Btu/ft.h
هدایت حرارتی	W/mk	×	۶/۹۳۳۵	=	Btu in/ft^{2}h°F
ثابت هدایت حرارتی	W/m^{2}k	×	۰/۱۷۶	=	Btu /ft^{2}h°F

برای سوخت نفت سنگین مقدار لیتر در تن = ۱۰۲۰

برای سوخت نفت متوسط مقدار لیتر در تن= ۱۰۴۰

برای گازوئیل مقدار لیتر در تن = ۱۱۸۰

mohandes-iran.com

http://www.mohandes-iran.com

ضمیمهٔ ۲:

جدول اقتباس شده از BS 5422 :1990

جدول ۸: ضخامت اقتصادی عایق برای تأسیسات حرارتی غیرخانگی تغذیه شده بوسیلهٔ دیگ بخار یا سوخت جامد

قطر خارجی لوله فولادی که روی آن ضخامت عایق افزوده می‌شود. برحسب (mm)[1]	دمای سطح داغ (°C) (با محیطی با هوای ساکن در دمای ۲۰°C)										
	+۷۵			+۱۰۰			+۱۵۰				
	هدایت حرارتی در دمای متوسط (W/m.k)										
	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷
	ضخامت عایق (mm)										
۱۷/۲	۱۴	۱۷	۲۰	۲۳	۱۷	۲۱	۲۴	۲۶	۲۲	۲۵	۲۸	۳۲
۲۱/۳	۱۵	۱۸	۲۲	۲۴	۱۷	۲۲	۲۵	۲۷	۲۳	۲۶	۳۰	۳۴
۲۶/۹	۱۷	۲۰	۲۳	۲۵	۲۰	۲۴	۲۶	۲۸	۲۴	۲۸	۳۲	۳۵
۳۳/۷	۱۷	۲۱	۲۴	۲۶	۲۰	۲۵	۲۷	۳۱	۲۵	۲۹	۳۴	۳۷
۴۲/۴	۱۸	۲۲	۲۵	۲۷	۲۱	۲۵	۲۸	۳۲	۲۵	۳۱	۳۵	۳۹
۴۸/۳	۱۸	۲۳	۲۵	۲۸	۲۲	۲۶	۲۹	۳۳	۲۶	۳۲	۳۶	۴۱
۶۰/۳	۱۹	۲۴	۲۶	۲۹	۲۳	۲۷	۳۱	۳۵	۲۷	۳۳	۳۸	۴۳
۷۶/۱	۲۰	۲۴	۲۷	۳۱	۲۳	۲۸	۳۳	۳۶	۲۸	۳۵	۴۰	۴۵
۸۸/۹	۲۰	۲۴	۲۸	۳۲	۲۴	۲۸	۳۳	۳۷	۲۹	۳۶	۴۲	۴۶
۱۱۴/۳	۲۱	۲۵	۲۹	۳۳	۲۵	۳۰	۳۵	۳۹	۳۱	۳۷	۴۴	۴۸
۱۳۹/۷	۲۲	۲۶	۳۰	۳۴	۲۵	۳۱	۳۶	۴۱	۳۱	۳۸	۴۵	۵۰
۱۶۸/۳	۲۲	۲۶	۳۱	۳۵	۲۵	۳۲	۳۷	۴۲	۳۲	۴۰	۴۶	۵۲
۲۱۹/۱	۲۲	۲۷	۳۲	۳۶	۲۶	۳۳	۳۸	۴۳	۳۳	۴۲	۴۸	۵۴
۲۷۳	۲۳	۲۷	۳۳	۳۶	۲۶	۳۴	۳۹	۴۴	۳۴	۴۳	۴۹	۵۵
بیش از ۳۲۳/۹ و از جمله سطوح مسطح	۲۳	۲۸	۳۴	۳۸	۲۷	۳۵	۴۲	۴۷	۳۵	۴۵	۵۳	۶۰

(۱) قطرهای خارجی مطابق BS 3600 هستند . برای لوله‌کشی مسی با قطرهای خارجی مشابه با بالا، همین ضخامت عایق استفاده می‌شود.

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

جدول ۹: ضخامت اقتصادی عایق برای تأسیسات حرارتی غیرخانگی تغذیه‌شده بوسیلهٔ دیگ بخار یا سوخت گاز

قطر خارجی لوله فولادی که ضخامت عایق روی آن افزوده می‌شود. برحسب (mm)[1]	دمای سطح داغ (°C) (با محیطی با هوای ساکن در دمای ۲۰°C)											
	+۷۵			+۱۰۰			+۱۵۰					
	هدایت حرارتی در دمای متوسط (W/m.k)											
	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷
	ضخامت عایق (mm)											
۱۷/۲	۱۷	۲۲	۲۴	۲۶	۲۰	۲۴	۲۷	۳۱	۲۴	۲۹	۳۴	۳۷
۲۱/۳	۱۸	۲۳	۲۵	۲۷	۲۲	۲۵	۲۹	۳۳	۲۶	۳۲	۳۶	۳۹
۲۶/۹	۲۰	۲۴	۲۶	۲۹	۲۳	۲۷	۳۱	۳۴	۲۷	۳۳	۳۸	۴۲
۳۳/۷	۲۱	۲۵	۲۷	۳۱	۲۴	۲۸	۳۳	۳۶	۲۸	۳۵	۴۰	۴۴
۴۲/۴	۲۲	۲۵	۲۹	۳۲	۲۵	۳۰	۳۴	۳۸	۳۰	۳۷	۴۲	۴۷
۴۸/۳	۲۲	۲۶	۳۰	۳۳	۲۵	۳۱	۳۵	۳۹	۳۱	۳۸	۴۴	۴۸
۶۰/۳	۲۳	۲۷	۳۲	۳۵	۲۶	۳۲	۳۷	۴۱	۳۳	۳۹	۴۶	۵۰
۷۶/۱	۲۴	۲۸	۳۳	۳۶	۲۷	۳۴	۳۹	۴۳	۳۴	۴۲	۴۸	۵۲
۸۸/۹	۲۴	۲۹	۳۴	۳۷	۲۸	۳۵	۴۰	۴۵	۳۵	۴۳	۴۹	۵۳
۱۱۴/۳	۲۵	۳۱	۳۵	۳۹	۲۹	۳۶	۴۲	۴۷	۳۶	۴۵	۵۱	۵۶
۱۳۹/۷	۲۵	۳۲	۳۶	۴۱	۳۰	۳۷	۴۳	۴۸	۳۷	۴۷	۵۳	۵۹
۱۶۸/۳	۲۵	۳۲	۳۷	۴۲	۳۱	۳۸	۴۵	۵۰	۳۸	۴۸	۵۶	۶۱
۲۱۹/۱	۲۶	۳۳	۳۸	۴۴	۳۲	۴۰	۴۶	۵۲	۴۰	۵۱	۵۸	۶۵
۲۷۳	۲۷	۳۴	۴۰	۴۵	۳۳	۴۱	۴۷	۵۳	۴۱	۵۲	۵۹	۶۸
بیش از ۳۲۳/۹ و از جمله سطوح مسطح	۲۷	۳۶	۴۲	۴۷	۳۴	۴۳	۵۱	۵۸	۴۲	۵۴	۶۳	۷۲

(۱) قطرهای خارجی مطابق BS 3600 هستند . برای لوله‌کشی مسی با قطرهای خارجی مشابه با بالا، همین ضخامت عایق استفاده می‌شود.

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

جدول ۱۰: ضخامت اقتصادی عایق برای تأسیسات حرارتی غیرخانگی تغذیه‌شده بوسیله دیگ بخار با سوخت نفت

قطر خارجی لوله	دمای سطح داغ (°C) (با محیطی با هوای ساکن در دمای ۲۰°C)										
لوله‌ای که ضخامت	+۷۵			+۱۰۰			+۱۵۰				
عایق روی آن	هدایت حرارتی در دمای متوسط (W/m.k)										
افزوده می‌شود.	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷
برحسب (mm)[1]	ضخامت عایق (mm)											
۱۷/۲	۱۸	۲۳	۲۵	۲۸	۲۲	۲۶	۲۹	۳۳	۲۶	۳۲	۳۶	۴۰
۲۱/۳	۱۹	۲۴	۲۷	۲۹	۲۳	۲۷	۳۲	۳۵	۲۷	۳۴	۳۸	۴۳
۲۶/۹	۲۱	۲۵	۲۸	۳۲	۲۴	۲۹	۳۳	۳۶	۲۹	۳۵	۴۱	۴۵
۳۳/۷	۲۲	۲۶	۲۹	۳۳	۲۶	۳۱	۳۵	۳۸	۳۱	۳۷	۴۳	۴۷
۴۲/۴	۲۳	۲۷	۳۲	۳۵	۲۶	۳۲	۳۷	۴۱	۳۲	۳۹	۴۵	۵۰
۴۸/۳	۲۴	۲۸	۳۳	۳۶	۲۷	۳۳	۳۸	۴۲	۳۳	۴۱	۴۶	۵۱
۶۰/۳	۲۵	۲۹	۳۴	۳۷	۲۸	۳۵	۳۹	۴۴	۳۵	۴۳	۴۹	۵۲
۷۶/۱	۲۵	۳۱	۳۵	۳۹	۲۹	۳۶	۴۲	۴۶	۳۶	۴۵	۵۰	۵۵
۸۸/۹	۲۵	۳۲	۳۶	۴۱	۳۰	۳۷	۴۳	۴۸	۳۷	۴۶	۵۱	۵۷
۱۱۴/۳	۲۶	۳۳	۳۸	۴۳	۳۱	۳۸	۴۴	۴۹	۳۹	۴۸	۵۴	۶۰
۱۳۹/۷	۲۷	۳۴	۳۹	۴۴	۳۳	۴۱	۴۷	۵۱	۴۱	۵۰	۵۷	۶۳
۱۶۸/۳	۲۷	۳۵	۴۱	۴۵	۳۳	۴۲	۴۸	۵۴	۴۲	۵۲	۵۹	۶۶
۲۱۹/۱	۲۸	۳۶	۴۲	۴۷	۳۴	۴۳	۵۱	۵۶	۴۳	۵۴	۶۲	۶۹
۲۷۳	۲۹	۳۷	۴۳	۴۸	۳۵	۴۴	۵۲	۵۷	۴۵	۵۵	۶۴	۷۱
بیش از ۳۲۳/۹ و از جمله سطوح مسطح	۳۱	۳۸	۴۵	۵۲	۳۷	۴۷	۵۵	۶۲	۴۷	۶۰	۶۹	۷۷

(۱) قطرهای خارجی مطابق BS 3600 هستند . برای لوله‌کشی مسی با قطرهای خارجی مشابه با بالا، همین ضخامت عایق استفاده می‌شود.

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

جدول ۱۱: ضخامت اقتصادی عایق برای سرویسهای آب داغ غیرخانگی

قطر خارجی لوله فولادی که ضخامت عایق روی آن افزوده می‌شود. برحسب (mm)[1]	دمای آب ۶۰°C+										
	سوخت جامد			گاز			نفت				
	هدایت حرارتی در دمای متوسط (W/m.k)										
	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۷
	ضخامت عایق (mm)											
۱۷/۲	۱۷	۲۱	۲۴	۲۷	۲۰	۲۴	۲۸	۳۲	۲۲	۲۷	۳۱	۳۴
۲۱/۳	۱۸	۲۲	۲۵	۲۸	۲۲	۲۶	۳۰	۳۲	۲۳	۲۸	۳۲	۳۶
۲۶/۹	۲۰	۲۳	۲۷	۲۹	۲۳	۲۸	۳۲	۳۵	۲۴	۲۹	۳۴	۳۸
۳۳/۷	۲۰	۲۴	۲۸	۳۱	۲۴	۲۹	۳۳	۳۷	۲۶	۳۱	۳۶	۴۰
۴۲/۴	۲۱	۲۶	۳۰	۳۳	۲۵	۳۱	۳۴	۳۹	۲۸	۳۳	۳۸	۴۲
۴۸/۳	۲۲	۲۷	۳۱	۳۴	۲۶	۳۲	۳۶	۴۰	۲۹	۳۴	۳۹	۴۳
۶۰/۳	۲۳	۲۸	۳۲	۳۶	۲۷	۳۳	۳۸	۴۲	۳۰	۳۶	۴۱	۴۵
۷۶/۱	۲۳	۲۹	۳۴	۳۷	۲۸	۳۵	۴۰	۴۴	۳۱	۳۷	۴۲	۴۷
۸۸/۹	۲۴	۳۰	۳۵	۳۸	۲۹	۳۶	۴۱	۴۵	۳۲	۳۸	۴۴	۴۸
۱۱۴/۳	۲۵	۳۱	۳۶	۴۰	۳۰	۳۷	۴۳	۴۷	۳۳	۴۰	۴۶	۵۱
۱۳۹/۷	۲۵	۳۲	۳۷	۴۱	۳۱	۳۸	۴۴	۵۰	۳۴	۴۱	۴۷	۵۲
۱۶۸/۳	۲۶	۳۳	۳۸	۴۲	۳۲	۳۹	۴۵	۵۲	۳۴	۴۲	۵۱	۵۶
۲۱۹/۱	۲۶	۳۴	۳۹	۴۴	۳۳	۴۱	۴۷	۵۵	۳۵	۴۴	۵۳	۵۹
۲۷۳	۲۷	۳۵	۴۰	۴۵	۳۴	۴۲	۵۱	۵۷	۳۶	۴۵	۵۵	۶۱
بیش از ۳۲۳/۹ و از جمله سطوح مسطح	۲۹	۳۶	۴۲	۵۰	۳۵	۴۴	۵۴	۶۱	۴۰	۵۱	۵۹	۶۵

(۱) قطرهای خارجی مطابق BS 3600 هستند . برای لوله‌کشی مسی با قطرهای خارجی مشابه با بالا، همین ضخامت عایق استفاده می‌شود.

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

جدول ۱۲: ضخامت اقتصادی عایق برای تأسیسات حرارت مرکزی خانگی در نواحی دارای گرمایش

قطر خارجی لوله مسی(mm)	آب با دمای ۷۵°C+ همراه با محیطی با هوای ساکن و دمای ۲۰°C+				
	هدایت حرارتی در دمای ۴۰°c+ (W/m.k)				
	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴	۰/۰۴۵
	ضخامت عایق (mm)				
۱۰	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۷
۱۲	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۹
۱۵	۱۸	۱۹	۲۱	۲۹	۳۱
۲۲	۲۰	۲۹	۳۰	۳۲	۳۳
۲۸	۲۱	۳۰	۳۲	۳۴	۳۵
۳۵	۲۲	۳۲	۳۴	۳۵	۳۷
۴۲	۲۲	۳۳	۳۵	۳۷	۳۹
۵۴	۲۳	۳۵	۳۷	۳۹	۴۰
سطوح مسطح	۲۹	۳۱	۳۴	۳۶	۳۸

جدول ۱۳: ضخامت اقتصادی عایق برای تأسیسات حرارت مرکزی خانگی در نواحی بدون گرمایش

قطر خارجی لوله مسی(mm)	آب با دمای ۷۵°C+ همراه با محیطی با هوای ساکن و دمای ۱°C-				
	هدایت حرارتی در دمای ۴۰°c+ (W/m.k)				
	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴	۰/۰۴۵
	ضخامت عایق (mm)				
۱۰	۱۹	۲۰	۲۱	۳۲	۳۴
۱۲	۲۰	۲۱	۲۲	۳۲	۳۴
۱۵	۲۱	۲۲	۳۲	۳۳	۳۵
۲۲	۲۲	۳۲	۳۴	۳۵	۳۶
۲۸	۲۳	۳۴	۳۶	۳۶	۳۶
۳۵	۲۴	۳۵	۳۷	۳۸	۳۹
۴۲	۲۵	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
۵۴	۲۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
سطوح مسطح	۳۴	۳۷	۴۰	۴۳	۴۵

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

جدول ۱۴: ضخامت اقتصادی عایق برای سیستمهای آب گرم خانگی در نواحی دارای گرمایش

قطر خارجی لوله مسی(mm)	آب با دمای ۶۰°C+ همراه با محیطی با هوای ساکن و دمای ۲۰°C+				
	هدایت حرارتی در دمای ۴۰°c+ (W/m.k)				
	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴	۰/۰۴۵
	ضخامت عایق (mm)				
۱۰	۱۳	۱۲	۱۲	۱۲	۱۵
۱۲	۱۳	۱۲	۱۲	۱۵	۱۶
۱۵	۱۳	۱۲	۱۴	۱۶	۱۷
۲۲	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
۲۸	۱۴۰	۱۵	۱۶	۱۸	۱۹
۳۵	۱۵	۱۷	۱۷	۱۹	۱۹
۴۲	۱۵	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
۵۴	۱۶	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
سطوح مسطح	۲۰	۲۲	۲۲	۲۲	۲۵

جدول ۱۵: ضخامت اقتصادی عایق برای سیستمهای آب گرم خانگی در نواحی بدون گرمایش

قطر خارجی لوله مسی(mm)	آب با دمای ۶۰°C+ همراه با محیطی با هوای ساکن و دمای ۱°C-				
	هدایت حرارتی در دمای ۴۰°c+ (W/m.k)				
	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴	۰/۰۴۵
	ضخامت عایق (mm)				
۱۰	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
۱۲	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
۱۵	۱۵	۱۷	۱۷	۱۹	۱۹
۲۲	۱۶	۱۸	۲۰	۲۰	۲۱
۲۸	۱۷	۱۹	۲۰	۲۱	۳۰
۳۵	۱۸	۲۰	۲۱	۲۲	۳۱
۴۲	۱۹	۲۰	۲۲	۲۳	۳۲
۵۴	۲۰	۲۱	۲۳	۳۳	۳۴
سطوح مسطح	۲۳	۲۵	۲۵	۲۹	۳۱

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

جدول ۱۶: ضخامت اقتصادی عایق برای لوله‌کشی فرآیند و تجهیزات مربوطه

قطر خارجی لوله فولادی (mm)	دمای سطح داغ در دمای متوسط (°C) (با محیطی با هوای ساکن و دمای +۲۰°C)														
	+۱۰۰				+۲۰۰				+۳۰۰						
	هدایت حرارتی در دمای متوسط (W/m.k)														
	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷
	ضخامت عایق (mm)														
۱۷/۲	۲۸	۳۱	۳۵	۳۸	۴۱	۴۵	۴۹	۵۲	۵۶	۵۹	۵۲	۵۷	۶۱	۶۶	۷۰
۲۱/۳	۲۹	۳۷	۳۷	۴۰	۴۳	۴۶	۵۰	۵۳	۵۸	۶۲	۵۵	۶۰	۶۵	۷۰	۷۴
۲۶/۹	۳۱	۳۵	۳۹	۴۳	۴۶	۵۰	۵۴	۵۹	۶۳	۶۷	۵۹	۶۴	۶۹	۷۴	۷۸
۳۳/۷	۳۳	۳۶	۴۰	۴۴	۴۸	۵۲	۵۶	۶۱	۶۵	۶۹	۶۱	۶۶	۷۲	۷۷	۸۲
۴۲/۴	۳۶	۴۰	۴۵	۴۹	۵۳	۵۶	۶۱	۶۷	۷۲	۷۷	۶۷	۷۳	۷۹	۸۴	۹۰
۴۸/۳	۳۸	۴۲	۴۷	۵۱	۵۵	۵۹	۶۴	۷۰	۷۵	۸۰	۷۰	۷۷	۸۲	۸۸	۹۵
۶۰/۳	۴۱	۴۵	۵۰	۵۵	۵۹	۶۳	۶۹	۷۵	۸۱	۸۶	۷۶	۸۲	۸۹	۹۶	۱۰۲
۷۶/۱	۴۲	۴۷	۵۲	۵۷	۶۲	۶۷	۷۳	۷۹	۸۵	۹۰	۷۸	۸۶	۹۴	۱۰۱	۱۰۷
۸۸/۹	۴۴	۴۹	۵۴	۵۹	۶۴	۷۰	۷۶	۸۲	۸۹	۹۴	۸۳	۹۰	۹۸	۱۰۵	۱۱۲
۱۰۱/۶	۴۵	۵۰	۵۶	۶۲	۶۶	۷۳	۷۹	۸۵	۹۱	۹۷	۸۵	۹۳	۱۰۱	۱۰۹	۱۱۶
۱۱۴/۳	۴۶	۵۲	۵۷	۶۳	۶۸	۷۶	۸۰	۸۷	۹۳	۹۹	۸۷	۹۵	۱۰۳	۱۱۱	۱۱۸
۱۳۹/۷	۴۹	۵۴	۶۰	۶۶	۷۱	۷۸	۸۴	۹۲	۹۹	۱۰۵	۹۴	۱۰۲	۱۱۰	۱۱۸	۱۲۵
۱۶۸/۳	۵۲	۵۸	۶۴	۷۰	۷۶	۸۳	۹۰	۹۸	۱۰۵	۱۱۱	۱۰۱	۱۰۷	۱۱۷	۱۲۶	۱۳۳
۲۱۹/۱	۵۴	۶۰	۶۷	۷۴	۸۰	۸۷	۹۵	۱۰۴	۱۱۲	۱۱۹	۱۰۵	۱۱۴	۱۲۴	۱۳۳	۱۴۲
۲۲۳/۵	۵۵	۶۲	۶۹	۷۶	۸۲	۸۹	۹۸	۱۰۶	۱۱۵	۱۲۲	۱۰۸	۱۱۷	۱۲۷	۱۳۷	۱۴۶
۲۷۳	۵۶	۶۳	۷۱	۷۸	۸۴	۹۳	۱۰۰	۱۱۰	۱۱۸	۱۲۶	۱۱۳	۱۲۰	۱۳۲	۱۴۲	۱۵۱
۳۲۳/۹	۵۸	۶۶	۷۳	۸۰	۸۶	۹۴	۱۰۴	۱۱۴	۱۲۳	۱۳۲	۱۱۵	۱۲۳	۱۳۵	۱۴۵	۱۵۳
۳۵۵/۶	۵۹	۶۷	۷۴	۸۱	۸۸	۹۷	۱۰۷	۱۱۶	۱۲۵	۱۳۴	۱۱۶	۱۲۵	۱۳۷	۱۴۷	۱۵۶
۴۰۶/۴	۶۲	۶۹	۷۶	۸۳	۹۰	۱۰۰	۱۰۹	۱۱۸	۱۲۷	۱۳۶	۱۱۸	۱۲۸	۱۴۰	۱۵۰	۱۵۹
۴۵۷	۶۳	۷۰	۷۷	۸۴	۹۱	۱۰۲	۱۱۱	۱۲۰	۱۲۹	۱۳۸	۱۲۱	۱۳۲	۱۴۴	۱۵۴	۱۶۳
۵۰۸	۶۵	۷۲	۷۹	۸۶	۹۳	۱۰۵	۱۱۴	۱۲۳	۱۳۲	۱۴۱	۱۲۴	۱۳۴	۱۴۶	۱۵۶	۱۶۵
بیش از ۵۰۸ و از جمله سطوح مسطح	۷۲	۷۸	۸۷	۹۸	۱۰۵	۱۱۳	۱۲۴	۱۳۳	۱۴۲	۱۵۱	۱۲۷	۱۳۷	۱۵۱	۱۶۱	۱۷۰

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

ادامهٔ جدول ۱۶

قطر خارجی لوله فولادی (mm)	دمای سطح داغ در دمای متوسط (°C) (با محیطی با هوای ساکن و دمای ۲۰°C+)																			
	+۴۰۰				+۵۰۰				+۶۰۰				+۷۰۰							
	هدایت حرارتی در دمای متوسط (W/m.k)																			
	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۱
	ضخامت عایق (mm) (نگاه کنید به نکته)																			
۱۷/۲	۶۴	۶۹	۷۴	۷۹	۸۳	۷۶	۸۱	۸۶	۸۹	۹۵	۹۱	۸۶	۸۱	۷۶	۸۳	۷۹	۷۴	۶۹	۶۴	
۲۱/۳	۶۸	۷۳	۷۸	۸۳	۸۸	۸۱	۸۶	۹۱	۹۳	۹۸	۹۶	۹۱	۸۶	۸۱	۸۸	۸۳	۷۸	۷۳	۶۸	
۲۶/۹	۷۳	۷۸	۸۳	۸۹	۹۳	۸۷	۹۲	۹۸	۱۰۰	۱۰۵	۱۰۳	۹۸	۹۲	۸۷	۹۳	۸۹	۸۳	۷۸	۷۳	
۳۳/۷	۷۶	۸۱	۸۷	۹۲	۹۷	۸۹	۹۵	۱۰۰	۱۰۳	۱۰۸	۱۰۶	۱۰۰	۹۵	۸۹	۹۷	۹۲	۸۷	۸۱	۷۶	
۴۲/۴	۸۳	۸۹	۹۶	۱۰۲	۱۰۷	۹۹	۱۰۵	۱۱۱	۱۱۳	۱۲۰	۱۱۷	۱۱۱	۱۰۵	۹۹	۱۰۷	۱۰۲	۹۶	۸۹	۸۳	
۴۸/۳	۸۷	۹۳	۱۰۰	۱۰۶	۱۱۲	۱۰۳	۱۰۹	۱۱۶	۱۱۹	۱۲۵	۱۲۲	۱۱۶	۱۰۹	۱۰۳	۱۱۲	۱۰۶	۱۰۰	۹۳	۸۷	
۶۰/۳	۹۳	۱۰۱	۱۰۸	۱۱۵	۱۲۱	۱۱۱	۱۱۸	۱۲۵	۱۲۸	۱۳۵	۱۳۲	۱۲۵	۱۱۸	۱۱۱	۱۲۱	۱۱۵	۱۰۸	۱۰۱	۹۳	
۷۶/۱	۹۹	۱۰۶	۱۱۳	۱۲۱	۱۲۷	۱۱۷	۱۲۳	۱۳۲	۱۳۵	۱۴۶	۱۳۹	۱۳۲	۱۲۳	۱۱۷	۱۲۷	۱۲۱	۱۱۳	۱۰۶	۹۹	
۸۸/۹	۱۰۳	۱۱۰	۱۱۸	۱۲۶	۱۳۳	۱۲۳	۱۳۰	۱۳۸	۱۴۱	۱۵۲	۱۴۵	۱۳۸	۱۳۰	۱۲۳	۱۳۳	۱۲۶	۱۱۸	۱۱۰	۱۰۳	
۱۰۱/۶	۱۰۶	۱۱۴	۱۲۳	۱۳۰	۱۳۸	۱۲۶	۱۳۴	۱۴۲	۱۴۵	۱۵۷	۱۵۰	۱۴۲	۱۳۴	۱۲۶	۱۳۸	۱۳۰	۱۲۳	۱۱۴	۱۰۶	
۱۱۴/۳	۱۰۹	۱۱۶	۱۲۵	۱۳۳	۱۴۰	۱۲۹	۱۳۷	۱۴۵	۱۴۹	۱۶۰	۱۵۳	۱۴۵	۱۳۷	۱۲۹	۱۴۰	۱۳۳	۱۲۵	۱۱۶	۱۰۹	
۱۳۹/۷	۱۱۶	۱۲۴	۱۳۳	۱۴۱	۱۴۹	۱۳۸	۱۴۶	۱۵۵	۱۵۸	۱۷۱	۱۶۳	۱۵۵	۱۴۶	۱۳۸	۱۴۹	۱۴۱	۱۳۳	۱۲۴	۱۱۶	
۱۶۸/۳	۱۲۳	۱۳۲	۱۴۲	۱۵۱	۱۵۹	۱۴۷	۱۵۶	۱۶۵	۱۷۳	۱۸۲	۱۷۰	۱۶۵	۱۵۶	۱۴۷	۱۵۹	۱۵۱	۱۴۲	۱۳۲	۱۲۳	
۲۱۹/۱	۱۳۰	۱۴۰	۱۵۱	۱۶۱	۱۷۱	۱۵۶	۱۶۶	۱۷۶	۱۸۰	۱۹۵	۱۸۶	۱۷۶	۱۶۶	۱۵۶	۱۷۱	۱۶۱	۱۵۱	۱۴۰	۱۳۰	
۲۷۴/۵	۱۳۵	۱۴۵	۱۵۶	۱۶۵	۱۷۵	۱۶۱	۱۷۱	۱۸۲	۱۸۶	۲۰۱	۱۹۲	۱۸۲	۱۷۱	۱۶۱	۱۷۵	۱۶۵	۱۵۶	۱۴۵	۱۳۵	
۲۷۳	۱۳۹	۱۴۹	۱۶۰	۱۷۰	۱۸۰	۱۶۶	۱۷۶	۱۸۸	۱۹۱	۲۰۷	۱۹۸	۱۸۸	۱۷۶	۱۶۶	۱۸۰	۱۷۰	۱۶۰	۱۴۹	۱۳۹	
۳۲۳/۹	۱۴۲	۱۵۳	۱۶۴	۱۷۴	۱۸۴	۱۷۱	۱۸۱	۱۹۳	۱۹۶	۲۰۷	۲۰۲	۱۹۳	۱۸۱	۱۷۱	۱۸۴	۱۷۴	۱۶۴	۱۵۳	۱۴۲	
۳۵۵/۶	۱۴۶	۱۵۷	۱۶۸	۱۷۸	۱۸۸	۱۷۷	۱۸۵	۱۹۷	۲۰۱	۲۱۲	۲۰۶	۱۹۷	۱۸۵	۱۷۷	۱۸۸	۱۷۸	۱۶۸	۱۵۷	۱۴۶	
۴۰۶/۴	۱۴۹	۱۶۰	۱۷۱	۱۸۱	۱۹۲	۱۸۱	۱۸۹	۲۰۲	۲۰۷	۲۱۸	۲۱۳	۲۰۲	۱۸۹	۱۸۱	۱۹۲	۱۸۱	۱۷۱	۱۶۰	۱۴۹	
۴۵۷	۱۵۳	۱۶۵	۱۷۶	۱۸۷	۱۹۸	۱۸۷	۱۹۶	۲۰۹	۲۱۳	۲۲۵	۲۲۰	۲۰۹	۱۹۶	۱۸۷	۱۹۸	۱۸۷	۱۷۶	۱۶۵	۱۵۳	
۵۰۸	۱۵۵	۱۶۸	۱۷۹	۱۹۱	۲۰۲	۱۹۱	۲۰۰	۲۱۳	۲۱۸	۲۳۱	۲۲۶	۲۱۳	۲۰۰	۱۹۱	۲۰۲	۱۹۱	۱۷۹	۱۶۸	۱۵۵	
بیش از ۵۰۸ و از جمله سطوح مسطح	۱۵۸	۱۷۱	۱۸۲	۱۹۵	۲۰۵	۱۹۴	۲۰۷	۲۱۸	۲۲۸	۲۳۹	۲۳۰	۲۱۸	۲۰۷	۱۹۴	۲۰۵	۱۹۵	۱۸۲	۱۷۱	۱۵۸	

نکته: برای ضخامت‌های تیره، دمای سطح خارجی هنگامی که از یک سطح با خاصیت انتشار کم استفاده می‌شود (مثلاً فلز براق)، از $50^{\circ}c$ هم تجاوز می‌کند.

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

جدول ۱۷: مقایسهٔ هزینهٔ سوختها: هزینهٔ حرارت مربوط به بهای سوخت					
هزینهٔ حرارت	سوخت نفت با بازده ٪۷۰	گاز طبیعی با بازده ٪۷۰	سوخت جامد با بازده ٪۵۵	سوخت جامد با بازده ٪۷۰	برق با بازده ٪۱۰۰
پنس بر مگاژول مفید	پنس بر لیتر	پنس بر واحد حرارتی	پوند بر تن	پوند بر تن	پنس بر کیلووات‌ساعت
۰/۳	۷/۸۹	۲۲/۱۶	۳۸/۴	۵۸/۶۱	۱/۰۸
۰/۴	۱۰/۵۲	۲۹/۵۴	۵۱/۲	۷۸/۱۵	۱/۴۴
۰/۵	۱۳/۱۵	۳۶/۹۳	۶۴/۰	۹۷/۶۸	۱/۸۰
۰/۵۶	۱۴/۷۳	۴۱/۳۶	۷۱/۷	۱۰۹/۴۰	۲/۰۲
۰/۶	۱۵/۷۸	۴۴/۳۱	۷۶/۸	۱۱۷/۲۲	۲/۱۶
۰/۶۴	۱۶/۸۳	۴۷/۲۷	۸۱/۹	۱۲۵/۰۳	۲/۳۰
۰/۶۸	۱۷/۸۸	۵۰/۲۲	۸۷/۰	۱۳۲/۸۵	۲/۴۹
۰/۷۲	۱۸/۹۴	۵۳/۱۸	۹۲/۱	۱۴۰/۶۶	۲/۵۹
۰/۷۶	۱۹/۹۹	۵۶/۱۳	۹۷/۲	۱۴۸/۴۸	۲/۷۴
۰/۸	۲۱/۰۴	۵۹/۰۸	۱۰۲/۴	۱۵۶/۲۹	۲/۸۸
۰/۸۴	۲۲/۰۹	۶۲/۰۴	۱۰۷/۵	۱۶۴/۱۱	۳/۰۲
۰/۸۸	۲۳/۱۴	۶۵/۰۰	۱۱۲/۶	۱۷۱/۹۲	۳/۱۷
۰/۹۲	۲۴/۲۰	۶۷/۹۶	۱۱۷/۷	۱۷۴/۷۴	۳/۳۱
۰/۹۶	۲۵/۲۵	۷۰/۹۱	۱۲۲/۸	۱۸۷/۵۵	۳/۴۶
۱	۲۶/۳۰	۷۳/۸۷	۱۲۸/۰	۱۹۵/۳۷	۳/۶۰
۱/۰۴	۲۷/۳۵	۷۶/۸۲	۱۳۳/۱	۲۰۳/۱۸	۳/۷۴
۱/۰۸	۲۸/۴۰	۷۹/۷۷	۱۳۳/۲	۲۰۳/۶۶	۳/۸۹
۱/۱۲	۲۹/۴۶	۸۲/۷۳	۱۴۳/۳	۲۱۸/۸۱	۴/۰۳
۱/۱۶	۳۰/۵۱	۸۵/۶۸	۱۴۸/۴	۲۲۶/۶۷	۴/۱۸
۱/۲	۳۱/۵۶	۸۸/۶۴	۱۵۳/۵	۲۳۴/۴۴	۴/۳۲

نکته۱: اولین ستون جدول، هزینه‌های اساسی موردنیاز برای محاسبهٔ ضخامت اقتصادی را نشان می‌دهد. مقادیر، هم قیمت‌های گذشته و هم افزایش قیمت ممکن در آینده را می‌پوشانند.

نکته۲: بازده‌های داده شده در عناوین ستونها اشاره به مقادیر فرض شدهٔ بازده در محاسبات دارد لذا آنها بازده در شرایط کار واقعی نیستند. در عمل، بازده سیستم برای یک مسئلهٔ خاص ممکن است بطور قابل توجهی کمتر از مقادیر داده شده باشد.

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

جدول ۱۷ بر اساس جدول ۳۶ در BS 5422 :1990 می‌باشد. ستون مربوط به عنوان «سوخت نفت با بازده ۷۰٪» در اینجا دوباره محاسبه شده و از استاندارد انگلیسی برداشت نشده است.

جدول ۱۸: هزینه افزایشی عایق‌کاری برای سرویسهای آب داغ و گرمایش غیرخانگی

قطر خارجی لولهٔ فولادی (mm)	ضخامت (mm)									متوسط هزینه پوند بر مترمکعب
	۲۰-۲۵	۲۵-۳۰	۳۰-۴۰	۴۰-۵۰	۵۰-۶۰	۶۰-۷۰	۷۰-۸۰	۸۰-۹۰	۹۰-۱۰۰	
	هزینهٔ افزایشی عایق‌کاری (£/m³) پوند بر مترمکعب									
۱۷/۲	۳۱۸	۷۶۰	۳۸۰	۶۴۵	۱۱۳۳	-	-	-	-	۶۴۷
۲۱/۳	۲۹۹	۷۳۷	۳۳۶	۶۲۵	۱۱۲۷	-	-	-	-	۶۲۵
۲۶/۹	۳۱۸	۷۴۵	۳۲۵	۶۱۵	۱۱۱۵	۲۶۲	۴۵۷	-	-	۵۴۸
۳۳/۷	۳۹۵	۶۰۸	۳۵۲	۵۹۰	۱۰۷۲	۲۵۶	۴۴۱	-	-	۵۳۱
۴۲/۴	۳۴۴	۶۱۰	۳۱۰	۵۵۷	۱۰۹۱	۲۳۵	۴۶۴	۳۱۲	۸۱	۴۱۷
۴۸/۳	۳۳۵	۵۶۲	۳۰۸	۵۶۳	۱۰۷۹	۲۱۵	۴۳۴	۳۰۷	۱۱۱	۴۳۵
۶۰/۳	۳۴۶	۵۹۲	۲۹۱	۵۶۷	۹۵۷	۳۳۰	۴۷۷	۴۲۸	۱۸۵	۴۵۳
۷۶/۱	-	۵۵۴	۲۸۳	۵۱۸	۹۲۸	۳۴۰	۴۷۳	۵۰۳	۳۸۵	۴۸۶
۸۸/۹	-	۵۲۶	۲۸۶	۴۸۴	۹۱۷	۳۵۲	۴۷۵	۴۴۴	۶۲۱	۵۰۰
۱۱۴/۳	-	۵۳۹	۳۰۵	۵۳۴	۸۱۹	۴۹۷	۴۲۲	۴۷۱	۵۲۷	۵۱۴
۱۳۹/۷	-	۵۰۹	۲۹۴	۵۰۲	۷۲۴	۵۶۲	۴۲۷	۴۵۸	۵۱۲	۴۹۹
۱۶۸/۳	-	۴۸۶	۲۸۲	۵۰۱	۶۸۵	۴۴۱	۴۳۰	۵۵۵	۵۰۹	۴۸۶
۲۱۹/۱	-	۴۷۲	۲۸۲	۵۰۰	۶۸۳	۴۳۰	۴۴۸	۴۹۳	۵۰۰	۴۸۱
۲۷۳	-	۴۳۸	۲۷۶	۴۶۶	۶۴۷	۴۰۹	۴۴۲	۵۵۰	۴۸۳	۴۶۴
بیش از ۳۲۳/۹ و از جمله سطوح مسطح	-	-	-	۴۲۰	۹۸۳	۳۰۷	۴۲۹	۲۸۷	۳۶۳	۴۶۵

mohandes-iran.com

http://www.mohandes-iran.com

جدول ۱۹: هزینه افزایشی عایق‌کاری برای سرویسهای آب داغ و گرمایش خانگی

قطر خارجی لولهٔ مسی (mm)	ضخامت (mm)					متوسط هزینه پوند بر مترمکعب
	۶-۹	۹-۱۳	۱۳-۱۹	۱۹-۲۵	۲۵-۳۲	
	هزینهٔ افزایشی عایق‌کاری (پوند بر مترمکعب)					
۱۰	۱۶۹	۴۴۸	۵۴۳	-	-	۳۸۷
۱۲	۱۱۸	۴۲۱	۶۹۹	۱۴۵۹	-	۶۷۴
۱۵	۱۰۶	۵۱۶	۷۲۲	۱۴۴۸	۴۸۶	۶۵۶
۲۲	۲۰۱	۵۲۵	۷۵۷	۱۲۷۸	۴۸۹	۶۵۰
۲۸	۱۴۸	۶۴۸	۱۱۴۱	۹۸۰	۵۷۲	۷۰۵
۳۵	-	۵۸۶	۱۲۵۹	۸۹۳	۳۴۱	۷۷۰
۴۲	-	۶۴۷	۱۳۴۸	۶۴۱	-	۸۷۹
۵۴	-	۶۶۰	۱۳۵۷	۴۴۸	-	۸۱۵
سطوح مسطح	۱۶۷۰	۳۰۵	۹۴۳	۱۰۴۳	۱۲۲۹	۱۰۳۸

جدول ۲۰: هزینه افزایشی عایق‌کاری برای لوله‌کشی فرایند - تک لایه

قطر خارجی لولهٔ فولادی (mm)	ضخامت (mm)									متوسط هزینه پوند بر مترمکعب
	۲۰-۲۵	۲۵-۳۰	۳۰-۴۰	۴۰-۵۰	۵۰-۶۰	۶۰-۷۰	۷۰-۸۰	۸۰-۹۰	۹۰-۱۰۰	۱۰۰-۱۲	
	هزینهٔ افزایشی عایق‌کاری (پوند بر مترمکعب)										
۱۷/۲	۵۶۴	۸۳۰	۵۰۱	-	-	-	-	-	-	-	۶۳۵
۲۱/۳	۵۷۱	۸۳۸	۴۶۵	۶۶۵	۱۰۷۱	۳۴۳	۴۷۸	-	-	-	۶۲۶
۲۶/۹	۵۱۳	۷۷۶	۴۲۰	۶۵۰	۹۲۷	۴۳۶	۴۷۵	-	-	-	۶۰۲
۳۳/۷	۹۱۱	۷۰۸	۴۴۶	۶۲۴	۱۰۱۲	۳۰۴	۴۵۳	-	-	-	۶۳۷
۴۲/۴	۴۶۸	۶۸۹	۴۰۳	۵۸۸	۱۰۱۹	۴۹۲	۴۵۹	-	-	-	۵۶۰
۴۸/۳	۴۵۶	۶۴۲	۳۲۴	۶۴۳	۱۰۰۹	۲۶۶	۴۴۲	-	-	-	۵۴۲
۶۰/۳	۴۴۲	۶۳۰	۳۷۲	۵۷۵	۹۰۴	۳۵۸	۳۸۶	۳۸۹	-	-	۵۰۷
۷۶/۱	-	۵۹۷	۳۴۹	۵۲۷	۸۶۴	۳۶۵	۳۷۶	۴۹۰	-	-	۵۱۰
۸۸/۹	-	۵۴۳	۳۲۲	۴۹۶	۸۵۱	۳۶۰	۳۷۷	۴۳۴	۵۸۷	-	۴۹۹
۱۰۱/۶	-	۵۶۷	۳۳۶	۵۴۹	۷۶۷	۵۱۲	۴۱۳	۴۲۵	۳۷۸	-	۴۹۵
۱۱۴/۳	-	۵۴۶	۳۲۸	۵۲۷	۷۵۶	۲۸۲	۴۰۹	۴۵۰	۳۹۶	-	۵۰۲
۱۳۹/۷	-	۴۹۳	۳۲۱	۴۹۸	۷۴۶	۴۵۹	۴۰۴	۴۳۳	۴۸۵	-	۴۸۰
۱۶۸/۳	-	۴۷۲	۳۰۸	۴۸۲	۶۲۴	۴۲۳	۴۰۰	۵۱۸	۴۵۸	۳۵۶	۴۴۹
۲۱۹/۱	-	۴۴۴	۳۲۴	۴۶۷	۶۲۲	۴۰۹	۴۱۸	۴۵۰	۴۵۸	۳۶۱	۴۳۹
۲۴۴/۵	-	۴۳۷	۲۸۳	۴۵۳	۵۹۱	۴۰۰	۴۰۹	۴۶۷	۴۷۶	۳۶۴	۴۳۱
۲۷۳	-	۴۰۹	۲۷۷	۴۳۸	۵۸۰	۳۸۲	۴۰۶	۴۹۴	۴۳۳	۳۶۴	۴۲۰
۳۲۳/۹	-	۳۸۳	۲۶۷	۴۱۴	۵۶۲	۳۵۹	۴۰۳	۵۱۰	۴۶۵	۳۶۸	۴۹۹
۳۵۵/۶	-	-	-	۴۲۰	۸۶۲	۳۱۸	۴۴۳	۲۳۲	۴۱۸	۳۷۳	۴۲۴
۴۰۶/۴	-	-	-	۴۰۵	۸۷۰	۲۹۵	۴۵۳	۲۰۱	۳۶۷	۳۷۲	۴۲۳
۴۵۷	-	-	-	۳۸۹	۸۳۳	۲۸۸	۴۸۹	۱۷۰	۳۵۰	۳۵۸	۴۱۱
۵۰۸ و بیشتر از آن	-	-	-	۳۶۹	۸۲۷	۲۸۲	۳۸۳	۲۶۴	۳۲۹	۳۶۹	۴۰۶

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

جدول ۲۱: هزینه افزایشی عایق‌کاری برای لوله‌کشی فرایند - ضخامت دولایه

قطر خارجی لولهٔ فولادی (mm)	ضخامت (mm)								متوسط هزینه پوند بر مترمکعب
	۱۲۰-۱۴۰	۱۴۰-۱۶۰	۱۶۰-۱۸۰	۱۸۰-۲۰۰	۲۰۰-۲۲۰	۲۲۰-۲۴۰	۲۴۰-۲۶۰	۲۶۰-۲۸۰	۲۸۰-۳۰۰
	هزینهٔ افزایشی عایق‌کاری (پوند بر مترمکعب)								
۱۷/۲	۶۳۲	-	-	-	-	-	-	-	۶۳۲
۲۱/۳	۶۳۱	-	-	-	-	-	-	-	۶۳۱
۲۶/۹	۶۱۸	-	-	-	-	-	-	-	۶۱۸
۳۳/۷	۶۵۲	۴۵۱	-	-	-	-	-	-	۵۵۲
۴۲/۴	۵۷۳	۵۷۰	۲۸۳	-	-	-	-	-	۴۷۵
۴۸/۳	۵۵۳	۵۵۷	۴۱۶	-	-	-	-	-	۵۰۹
۶۰/۳	۵۱۷	۵۱۴	۵۱۲	۲۰۲	-	-	-	-	۳۳۶
۷۶/۱	۳۵۸	۵۲۳	۵۲۳	۱۰۱	-	-	-	-	۳۷۶
۸۸/۹	۳۶۲	۵۱۰	۵۱۱	۵۰۸	-	-	-	-	۳۷۳
۱۰۱/۶	۴۹۶	۵۱۰	۵۰۷	۵۰۷	۴۱۵	-	-	-	۴۸۷
۱۱۴/۳	۴۲۲	۵۱۳	۵۱۳	۵۱۴	۴۹۹	-	-	-	۴۹۲
۱۳۹/۷	۴۰۴	۴۸۹	۴۹۰	۴۹۳	۴۹۱	-	-	-	۴۷۳
۱۶۸/۳	۴۱۰	۴۵۶	۴۵۸	۴۵۹	۴۵۹	۴۵۵	-	-	۴۵۰
۲۱۹/۱	۵۹۴	۴۴۵	۴۴۷	۴۵۰	۴۴۹	۴۴۹	-	-	۴۶۵
۲۲۴/۵	۳۸۲	۴۳۹	۴۳۹	۴۳۹	۴۳۳	۴۳۲	۴۳۹	-	۴۳۰
۲۷۳	۵۸۱	۴۳۲	۴۲۸	۴۲۹	۴۳۱	۴۲۹	۴۳۱	-	۴۵۲
۳۲۳/۹	۳۰۰	۴۲۸	۴۳۶	۴۳۸	۴۴۵	۴۳۹	۴۴۳	۴۴۵	۴۲۲
۳۵۵/۶	۵۹۹	۴۰۷	۴۲۶	۴۳۶	۴۳۹	۴۳۱	۴۱۶	۴۳۶	۴۳۹
۴۰۶/۴	۵۶۲	۴۰۸	۴۴۰	۴۳۳	۴۳۱	۴۰۰	۴۳۶	۴۳۳	۴۳۳
۴۵۷	۶۳۷	۴۰۱	۴۲۵	۴۲۰	۴۱۹	۴۲۳	۴۲۰	۴۲۲	۴۲۱
۵۰۸	۵۲۸	۴۰۵	۴۲۴	۴۱۰	۴۲۰	۴۱۶	۴۱۵	۴۱۸	۴۱۸
۵۰۸ و بیشتر از آن	۵۵۲	-	-	-	-	-	-	-	۵۵۲

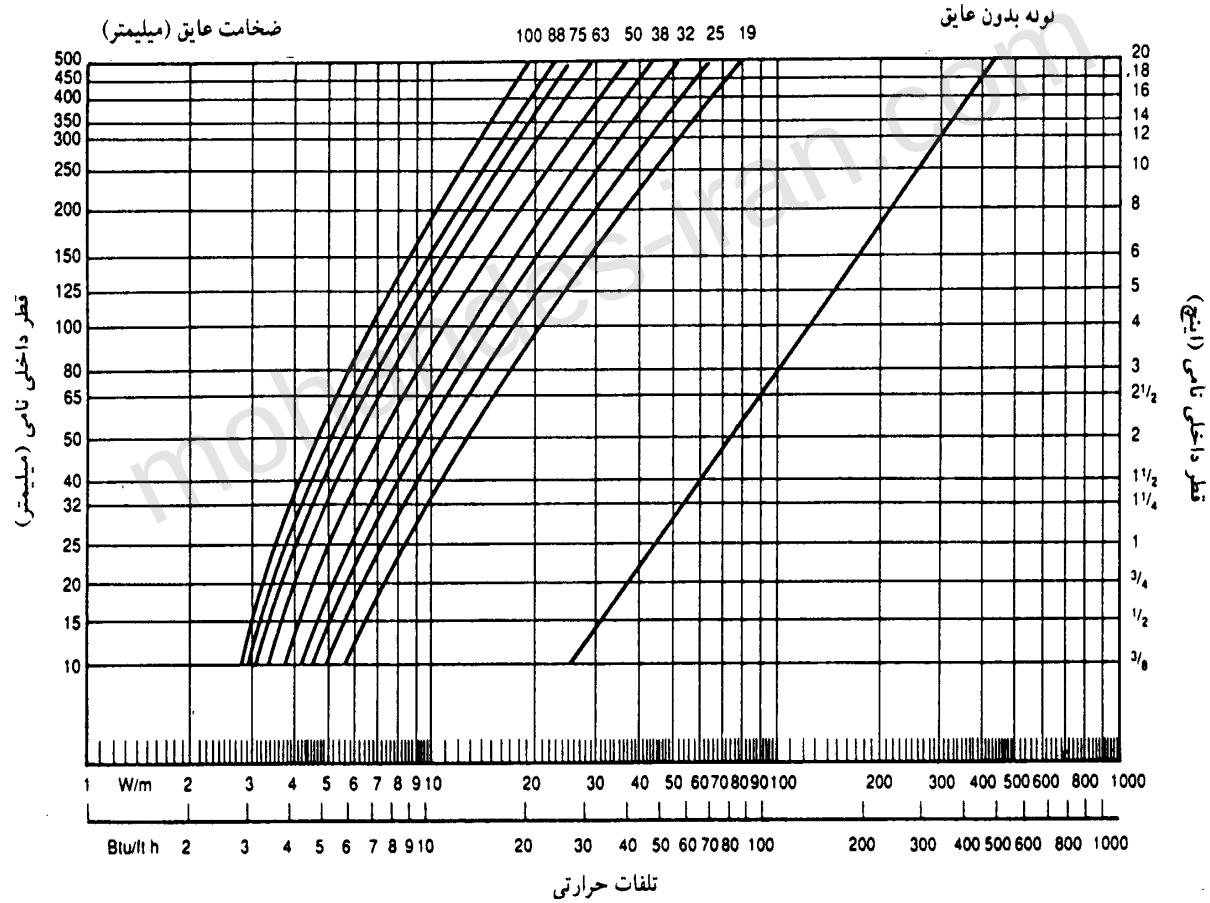
mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

ضمیمه ۳:

نمودارهای تلفات حرارتی برای مواد مختلف و دماهای مختلف سطوح

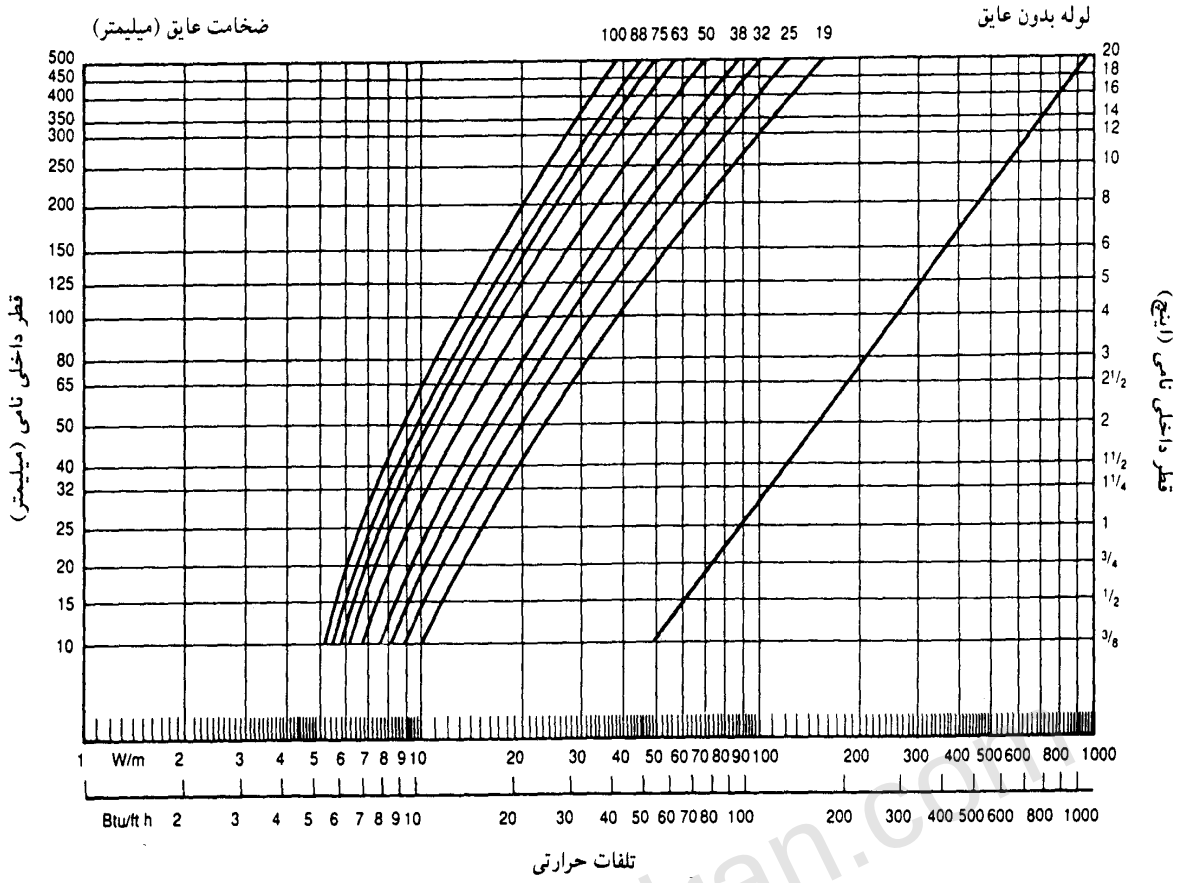
انوع فرآورده‌های عـایقی لوله‌ها محصول شرکتهای مـختلف وجود دارنـد. نمودارهای تلفات حرارتی براساس چهار نوع عمده این فرآورده‌ها که در زیر بـیان شده‌اند، می‌باشند.

- قطعات عایقی شکل داده شده فیبری سخت (شامل رشته‌های شیشه‌ای و سنگی) (نمودارهای ۱ تا ۱۰)
- قطعات عایقی شکل داده شده سیلیکات کلسیم سخت یا قطعاتی با ۸۵٪ اکسید منیزیم (تا $300^{\circ}c$) (نمودارهای ۱۱ تا ۲۰)
- قـطعات عـایقی شکل داده شـده پـلی‌ایزوسیانورات سخت یا قطعات پلی‌اورتان سخت (تا $100^{\circ}c$) (نمودارهای ۲۱ تا ۲۳)
- قطعات عایقی شکل داده شده لاستیک نـیتریل گسـترده و فـوم پـلی‌اتیلن (نمودارهای ۲٤ تا ۲۵)

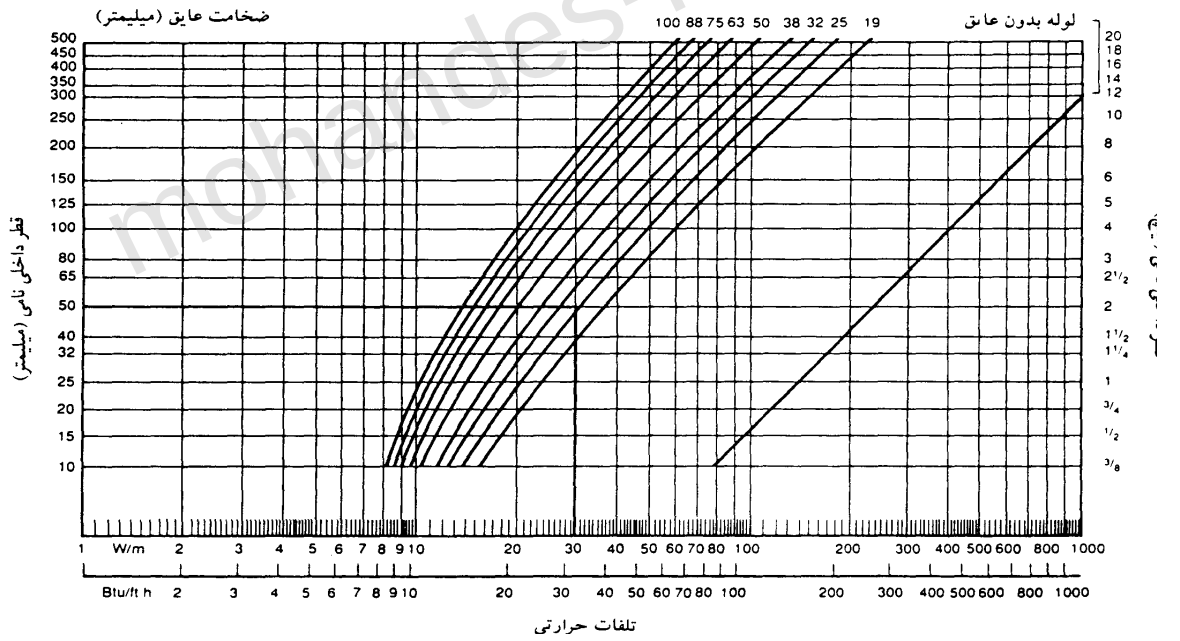


نمودار ۱: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $50^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

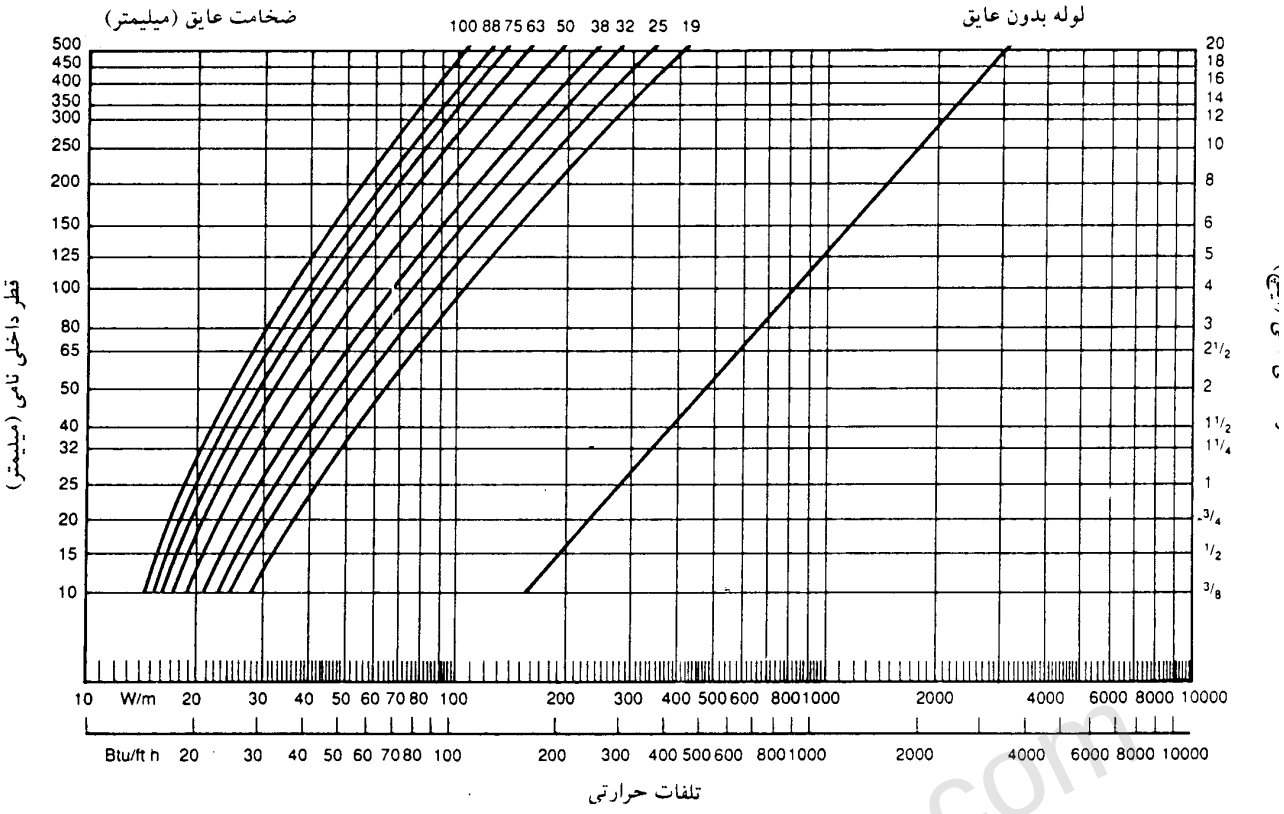


نمودار ۲: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $75^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

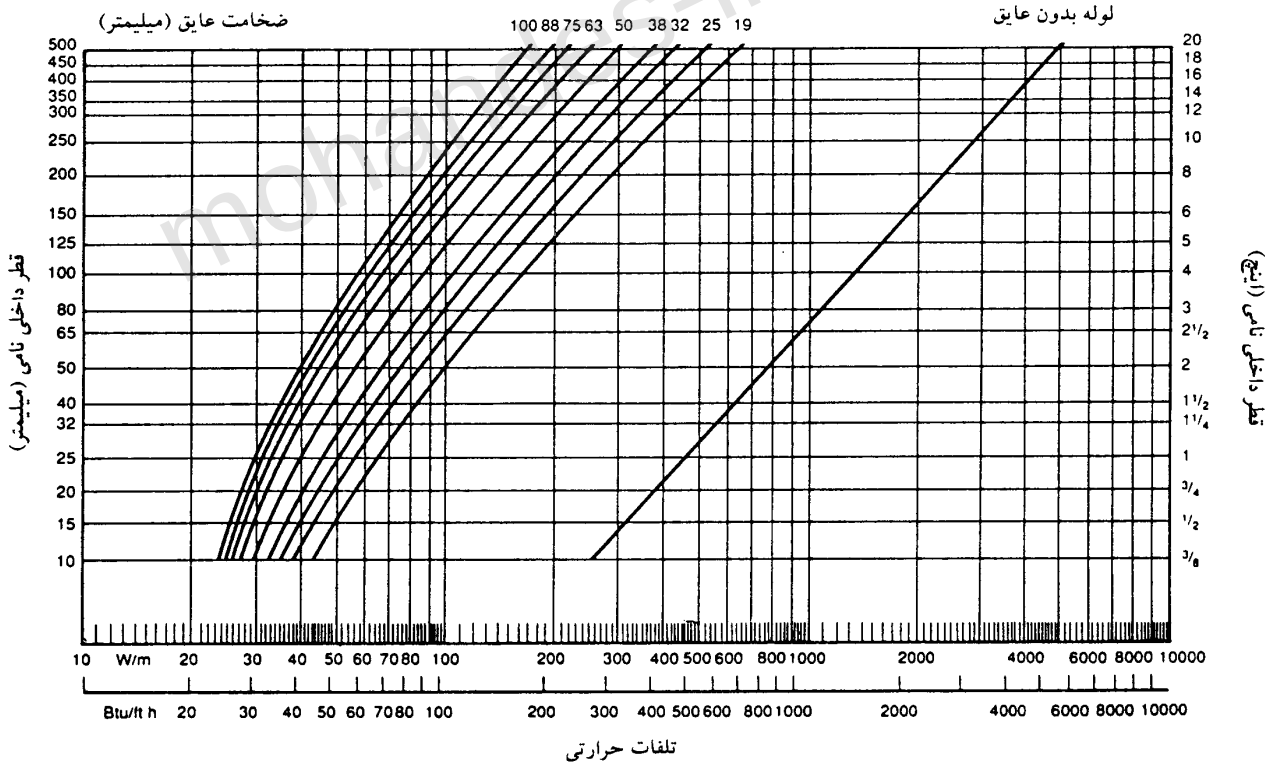


نمودار ۳: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $100^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

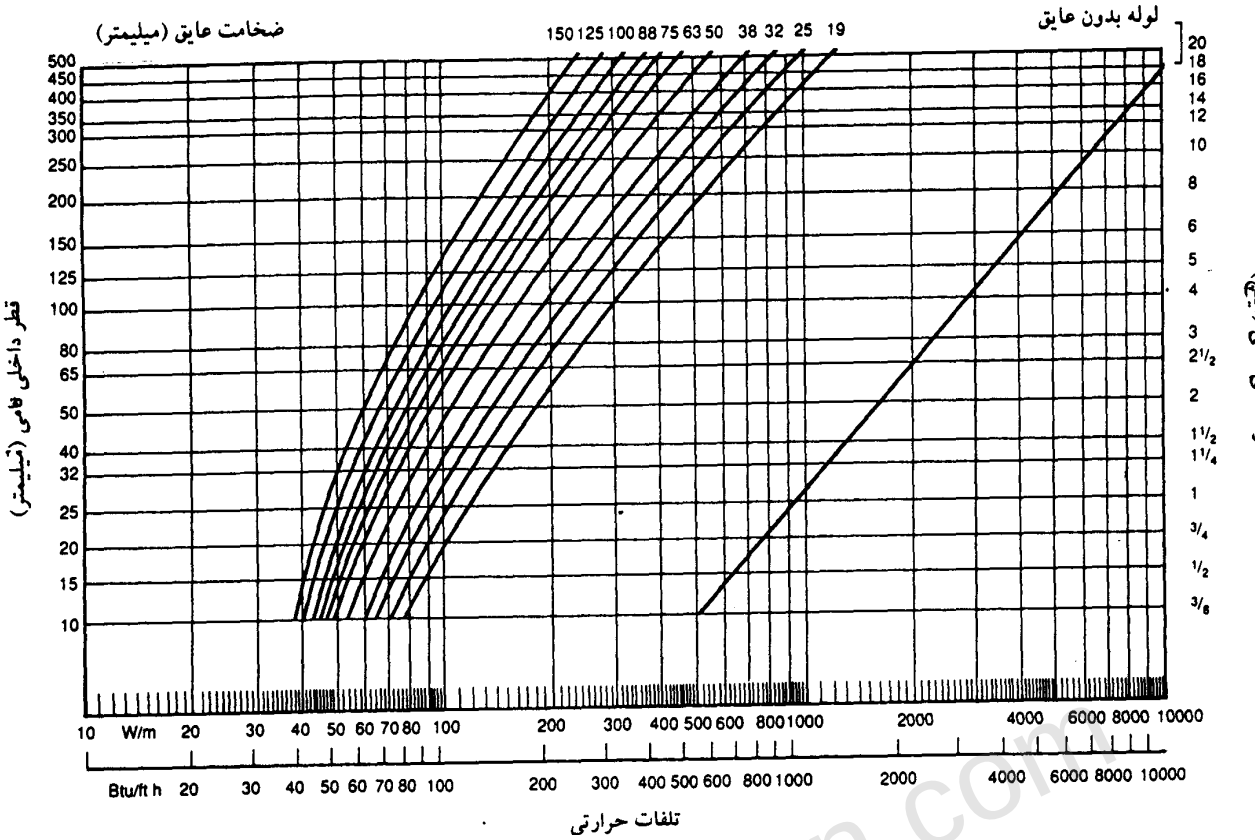


نمودار ٤: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $150^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

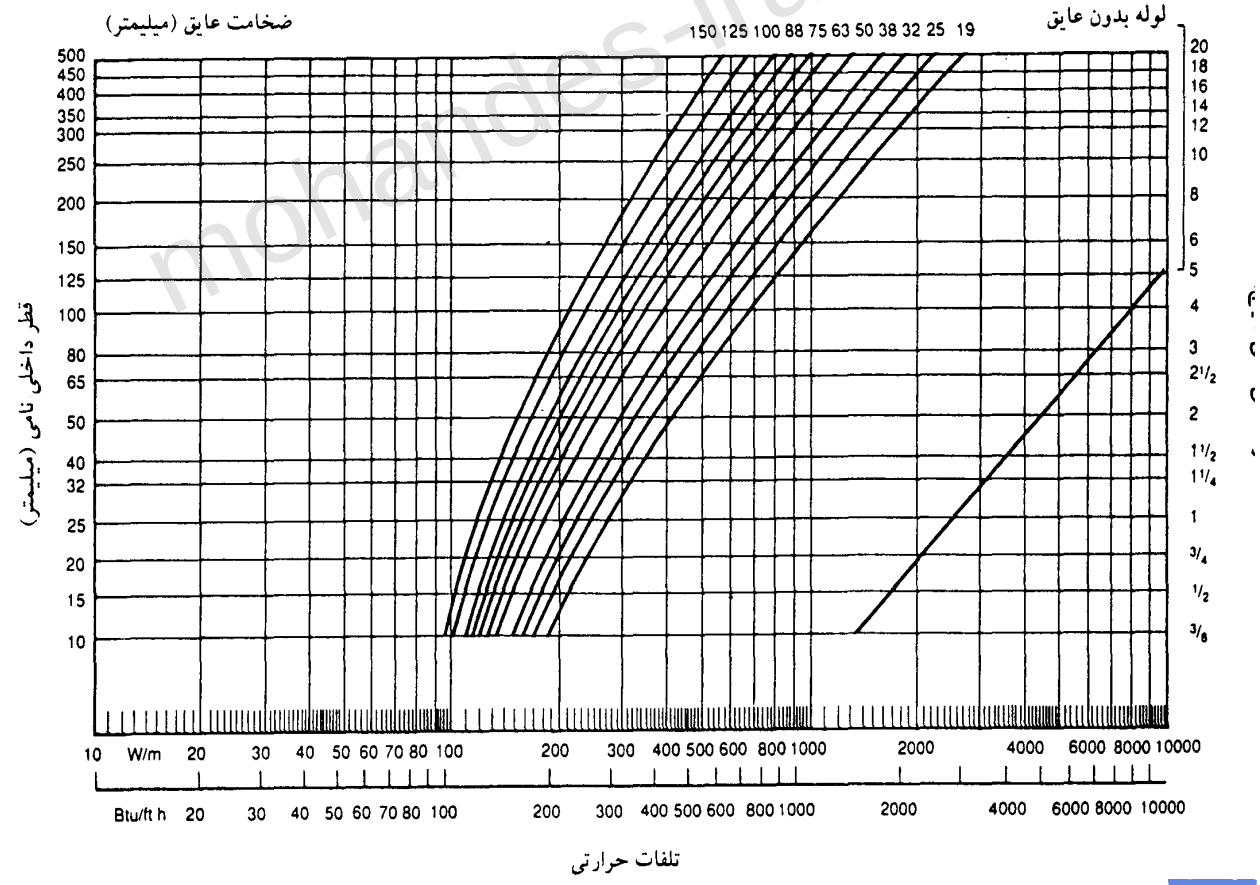


نمودار ٥: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $200^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

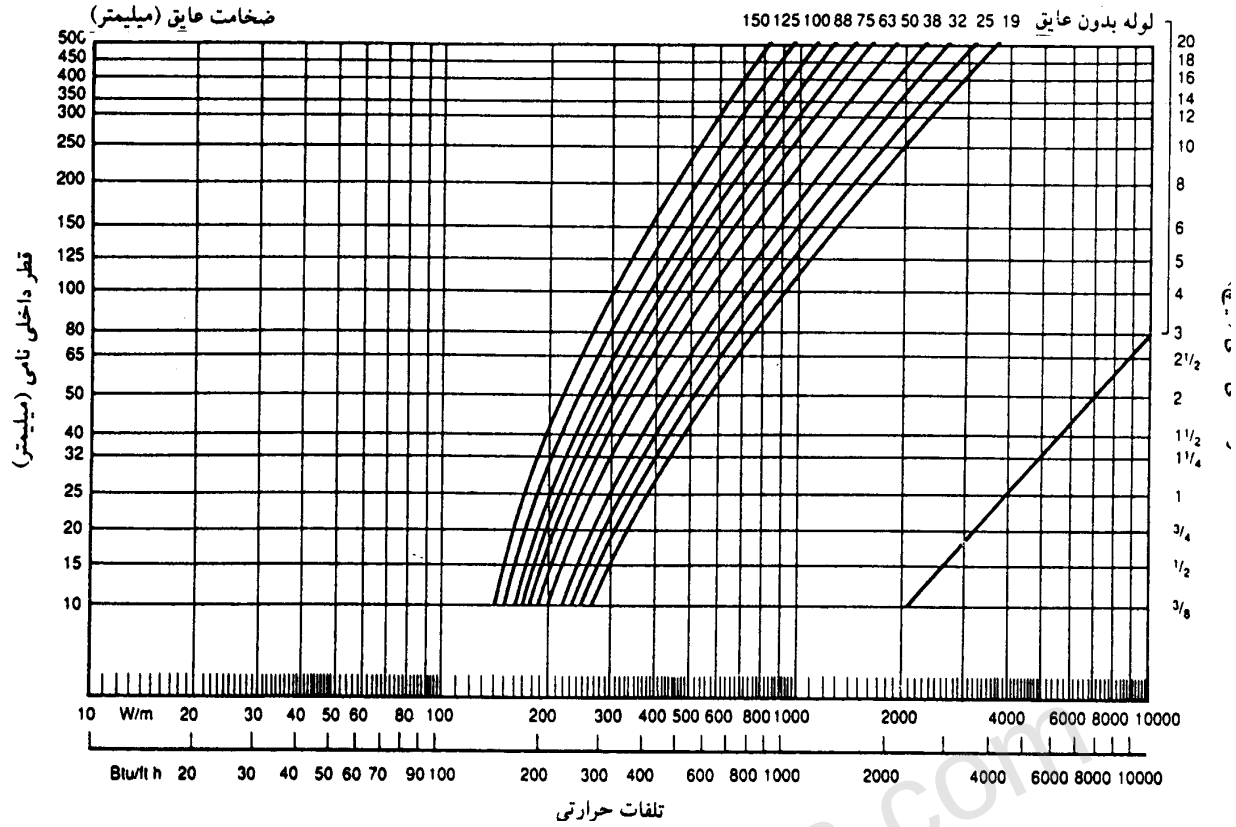


نمودار ٦: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $300^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

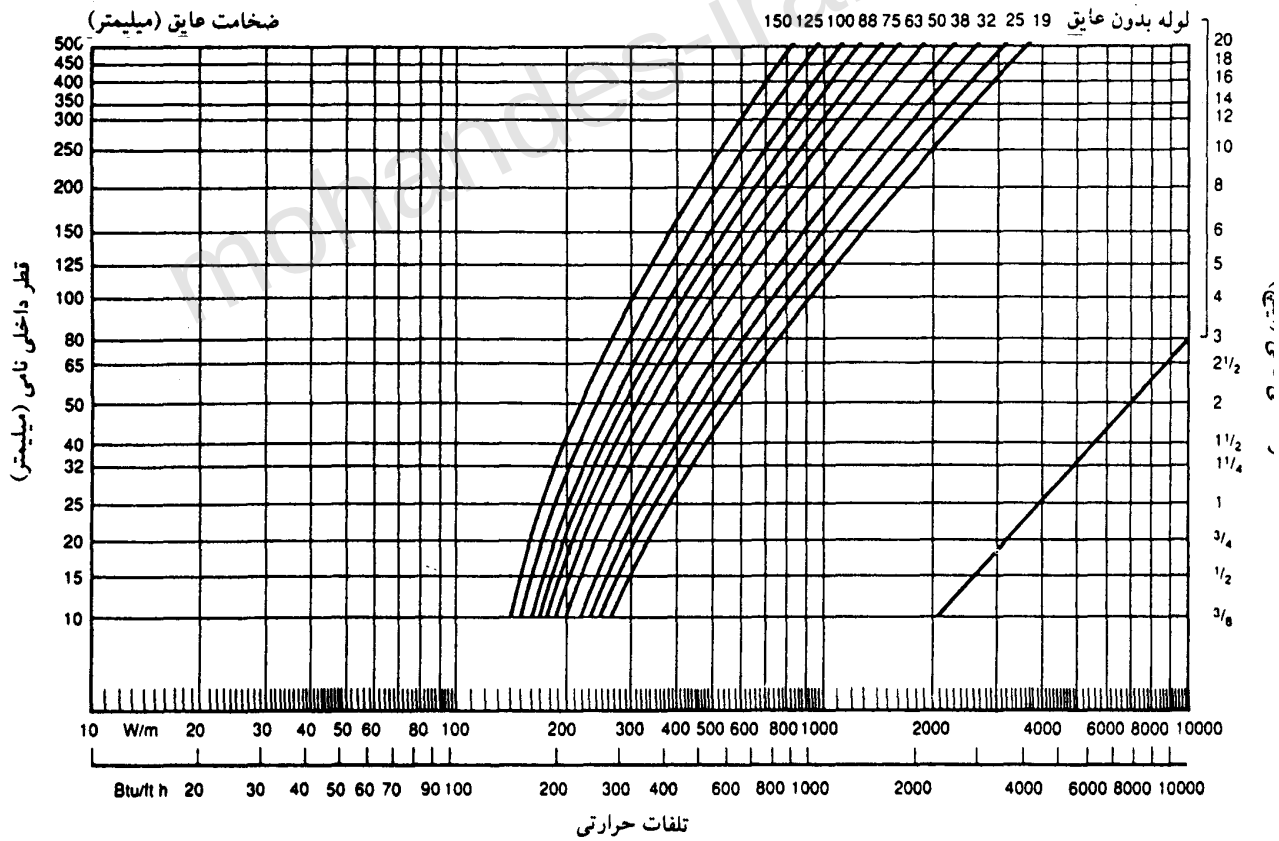


نمودار ٧: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $400^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

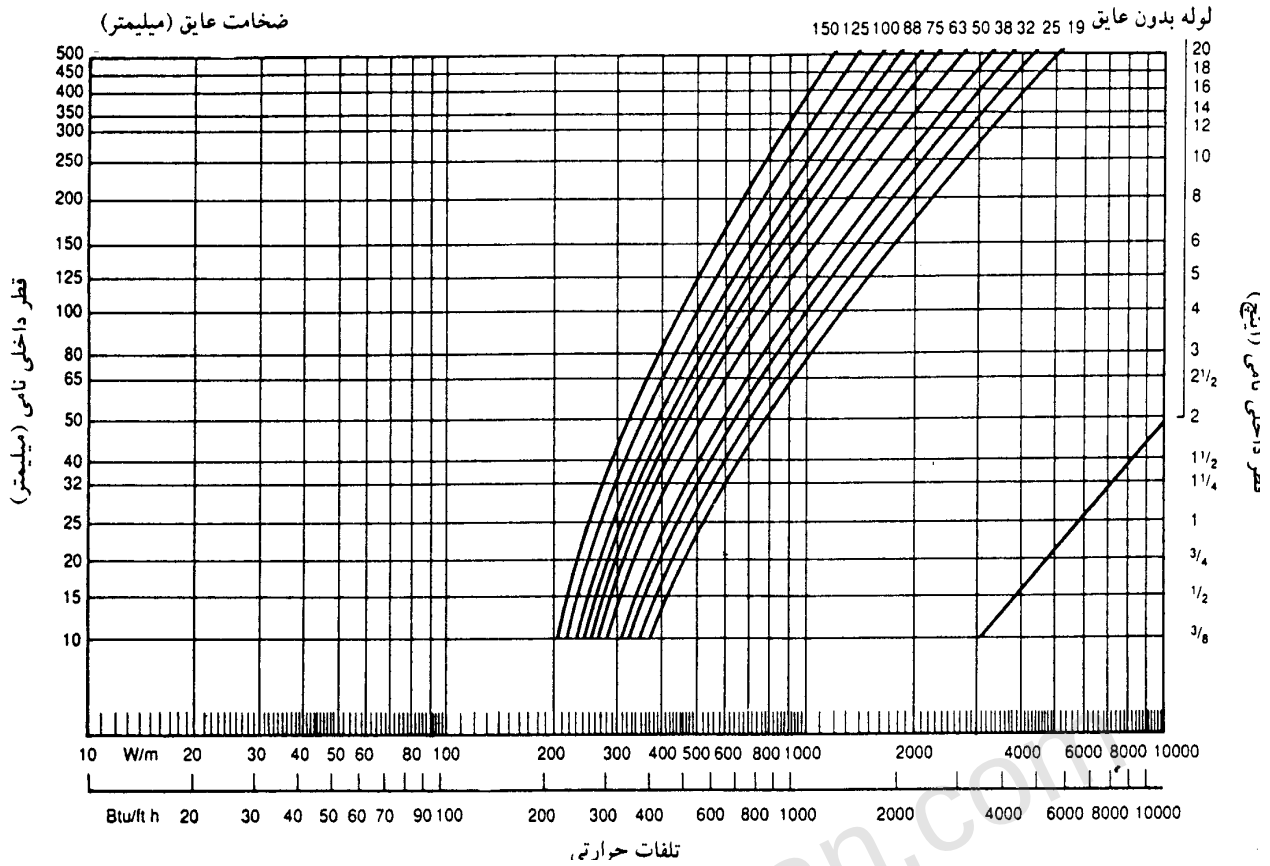


نمودار ۸: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $500^{\circ}C$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

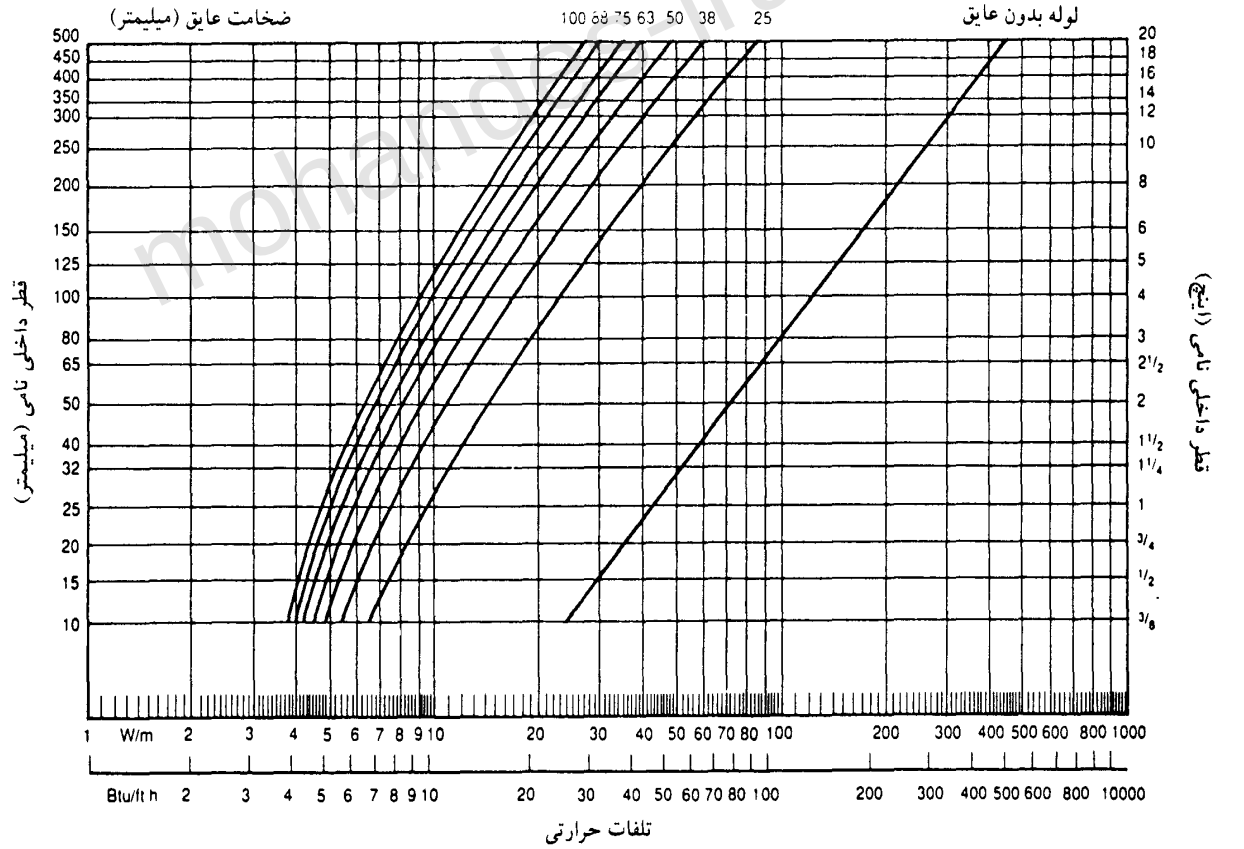


نمودار ۹: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $600^{\circ}C$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

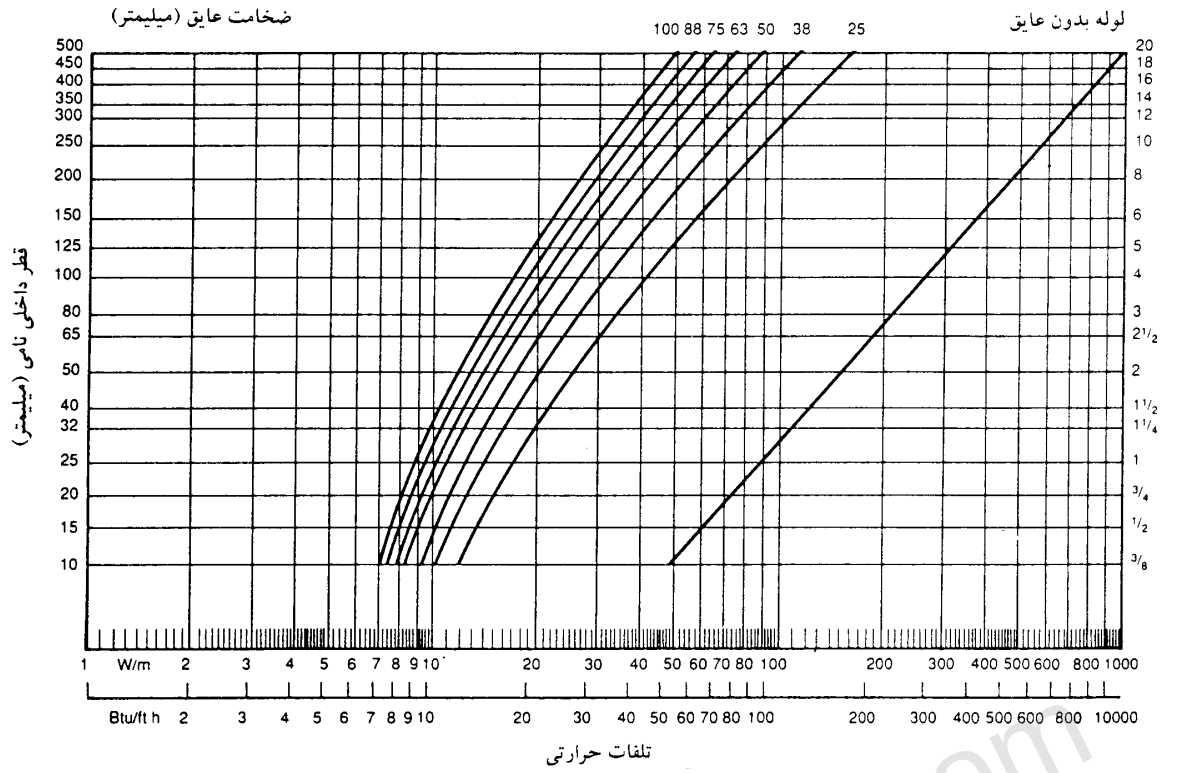


نمودار ۱۰: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $700^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات شکل داده شدهٔ فیبری سخت)

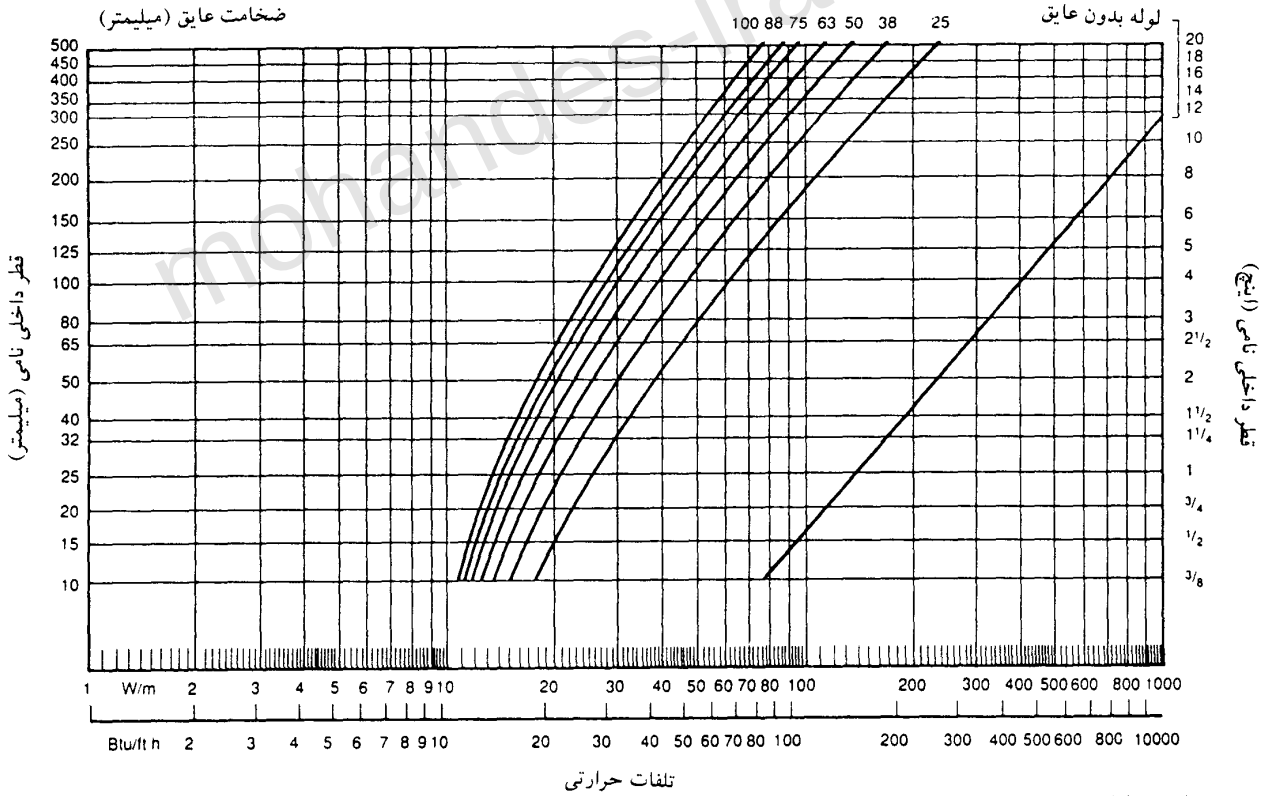


نمودار ۱۱: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $50^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

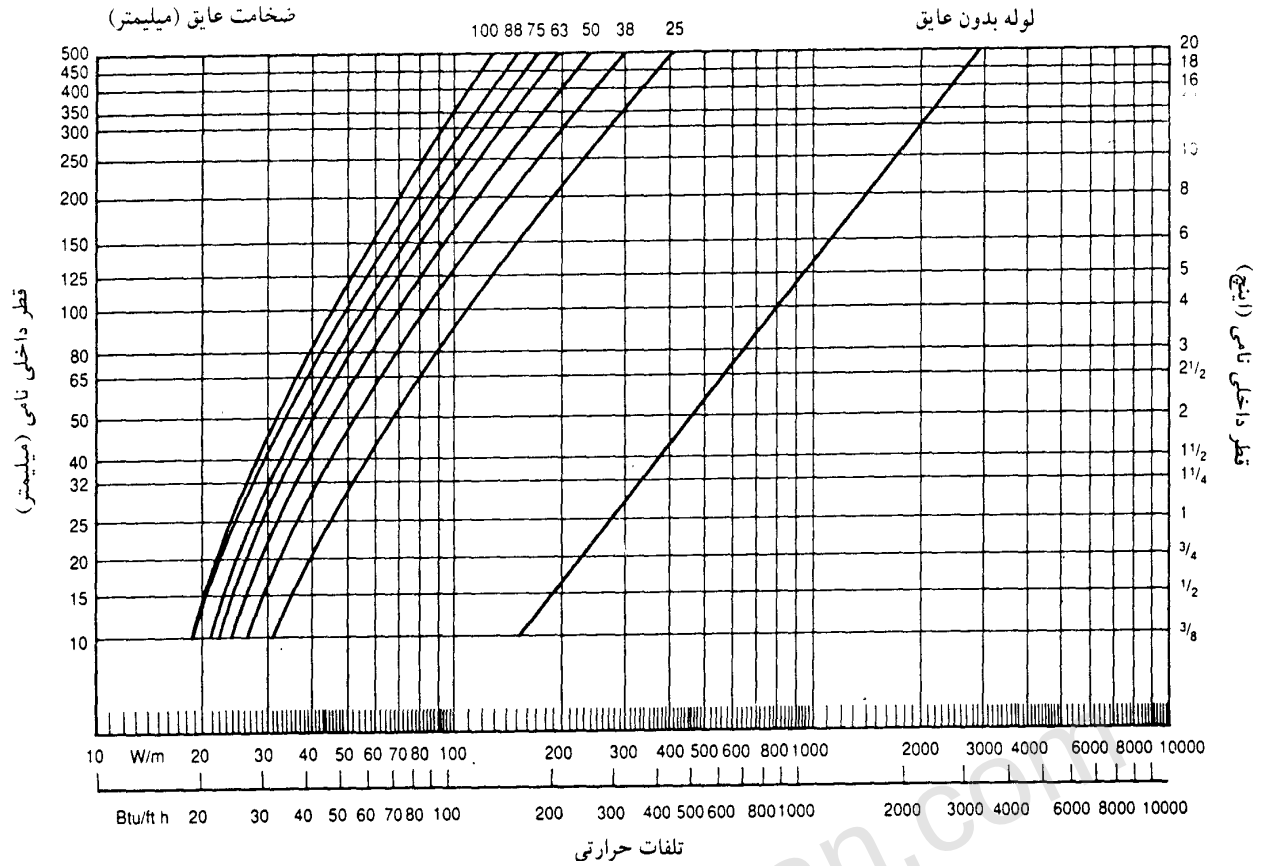


نمودار ۱۲: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح c° ۷۵ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

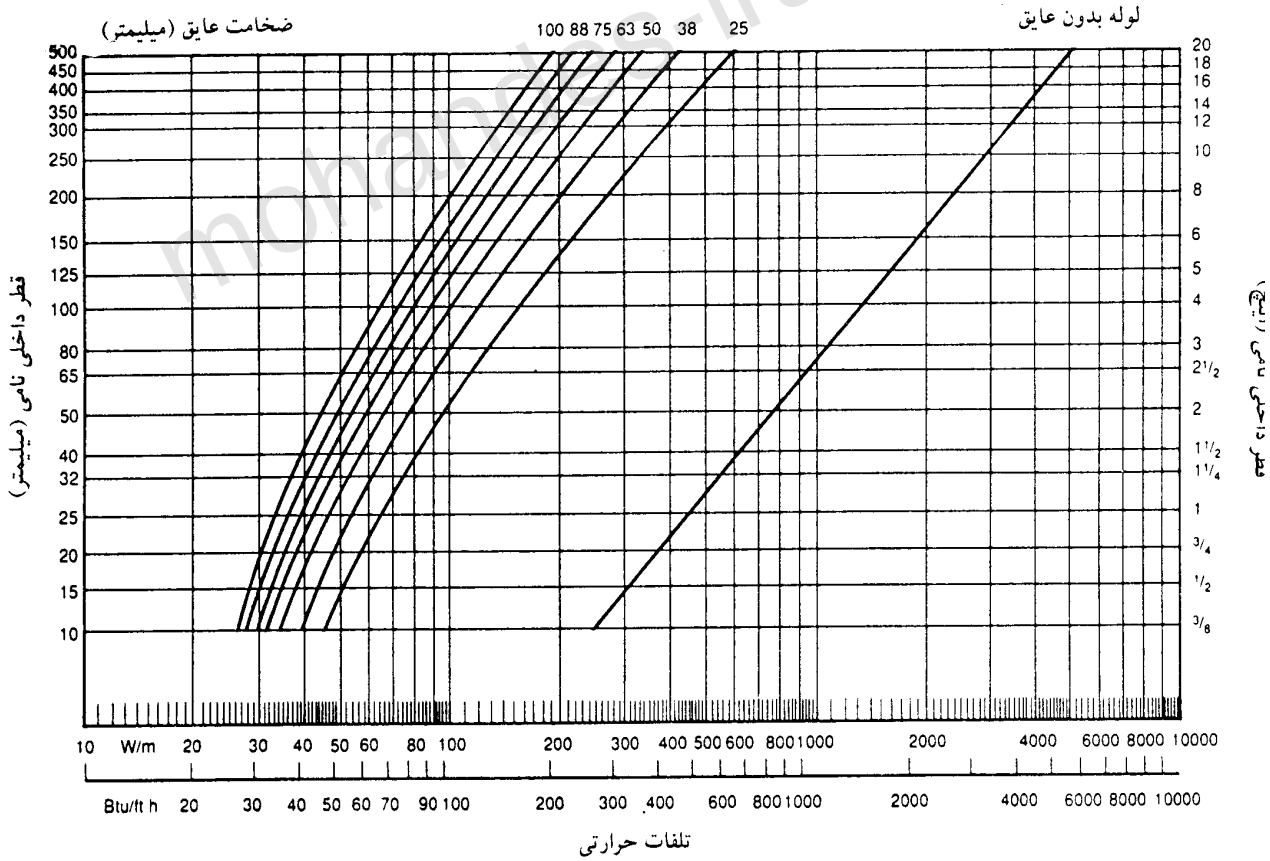


نمودار ۱۳: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح c° ۱۰۰ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

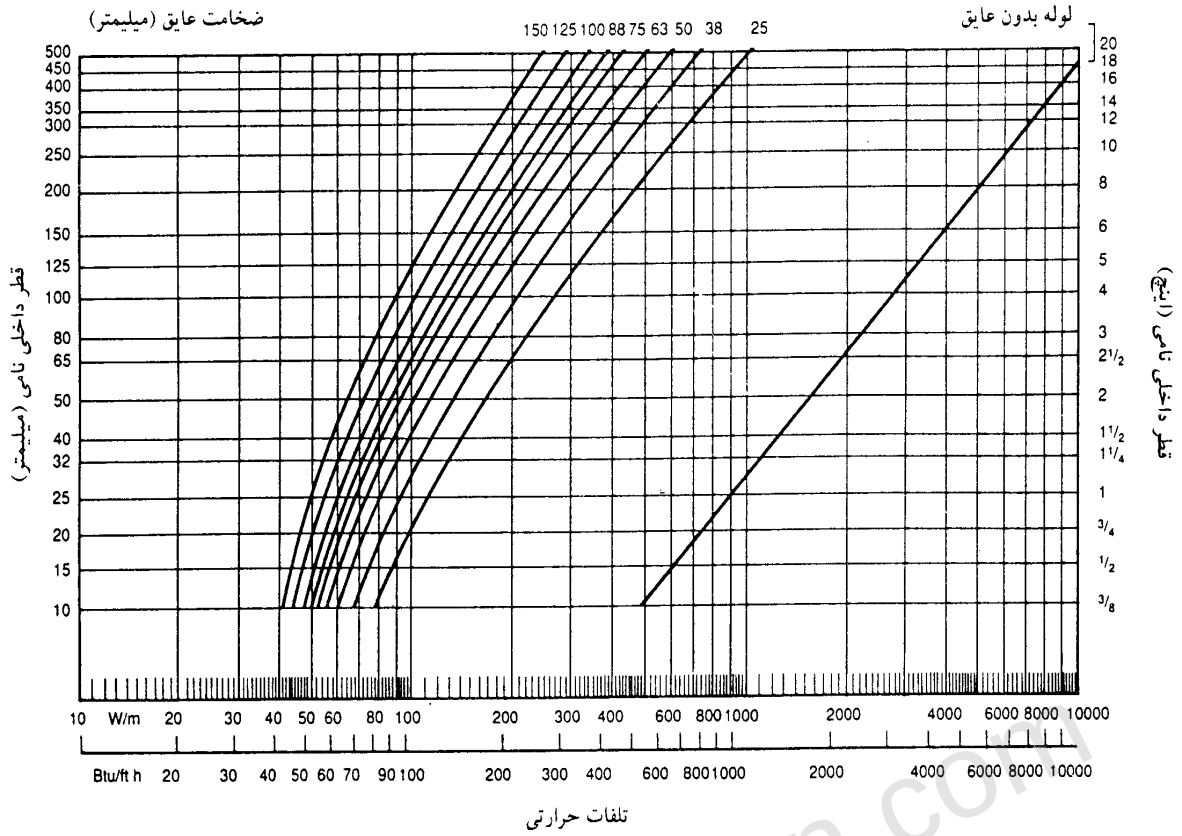


نمودار ١٤: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $150^{\circ}C$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ٨٥٪ اکسید منیزیم)

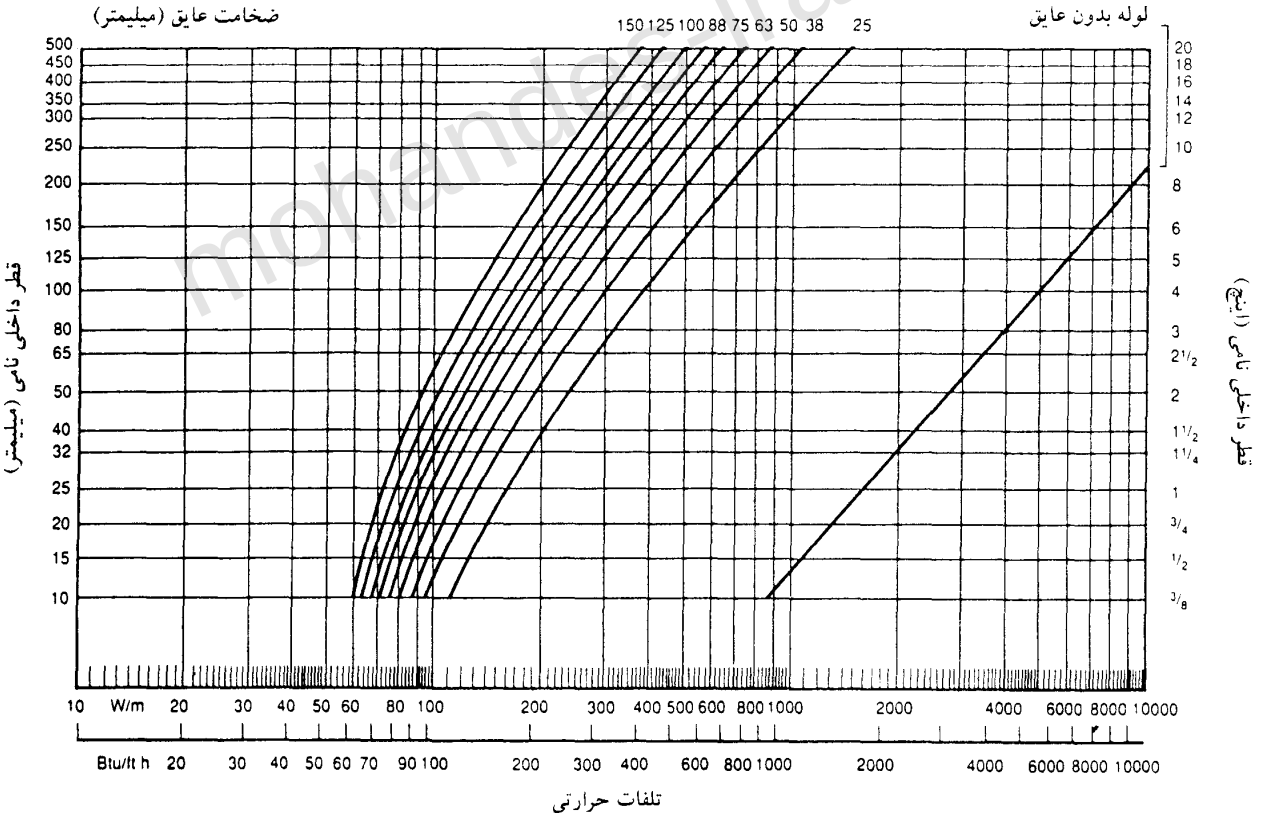


نمودار ١٥: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $200^{\circ}C$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ٨٥٪ اکسید منیزیم)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

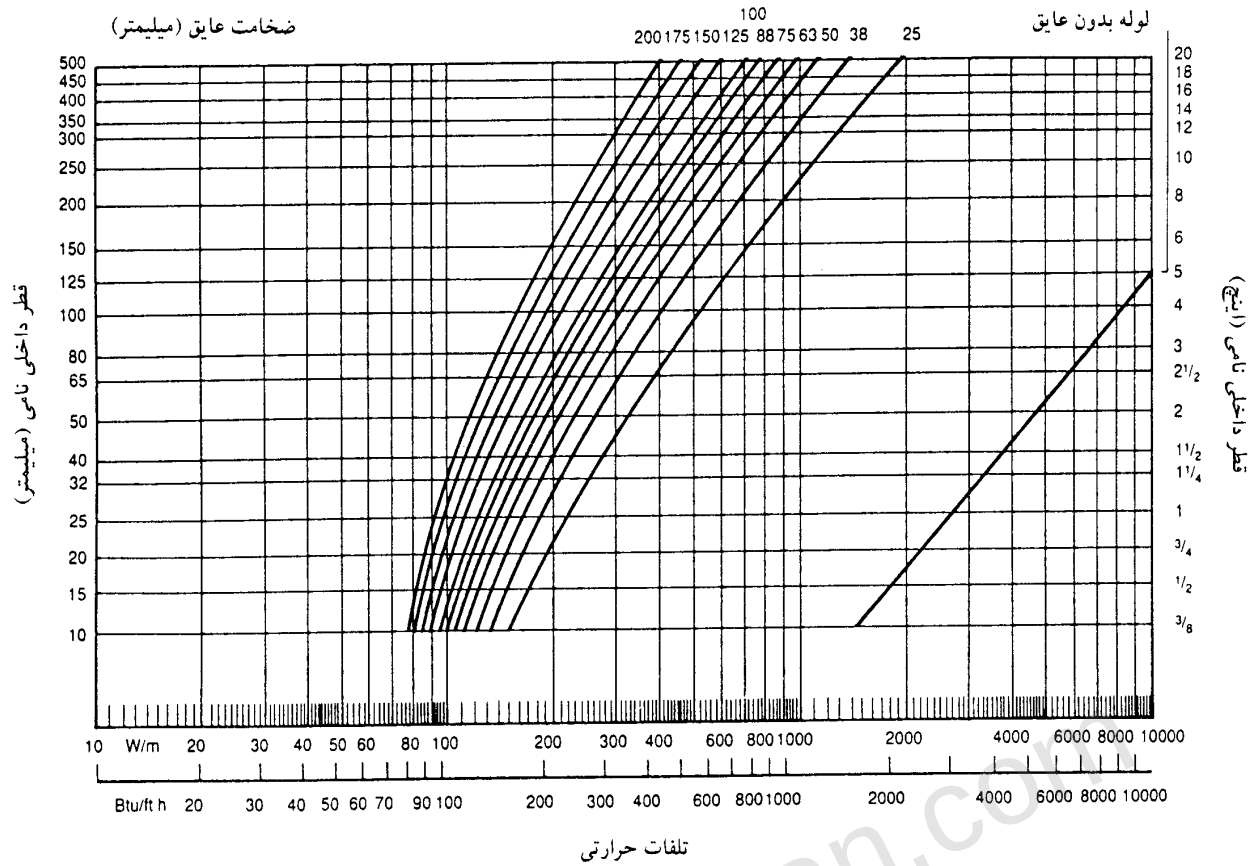


نمودار ۱۶: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $300^{\circ}C$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

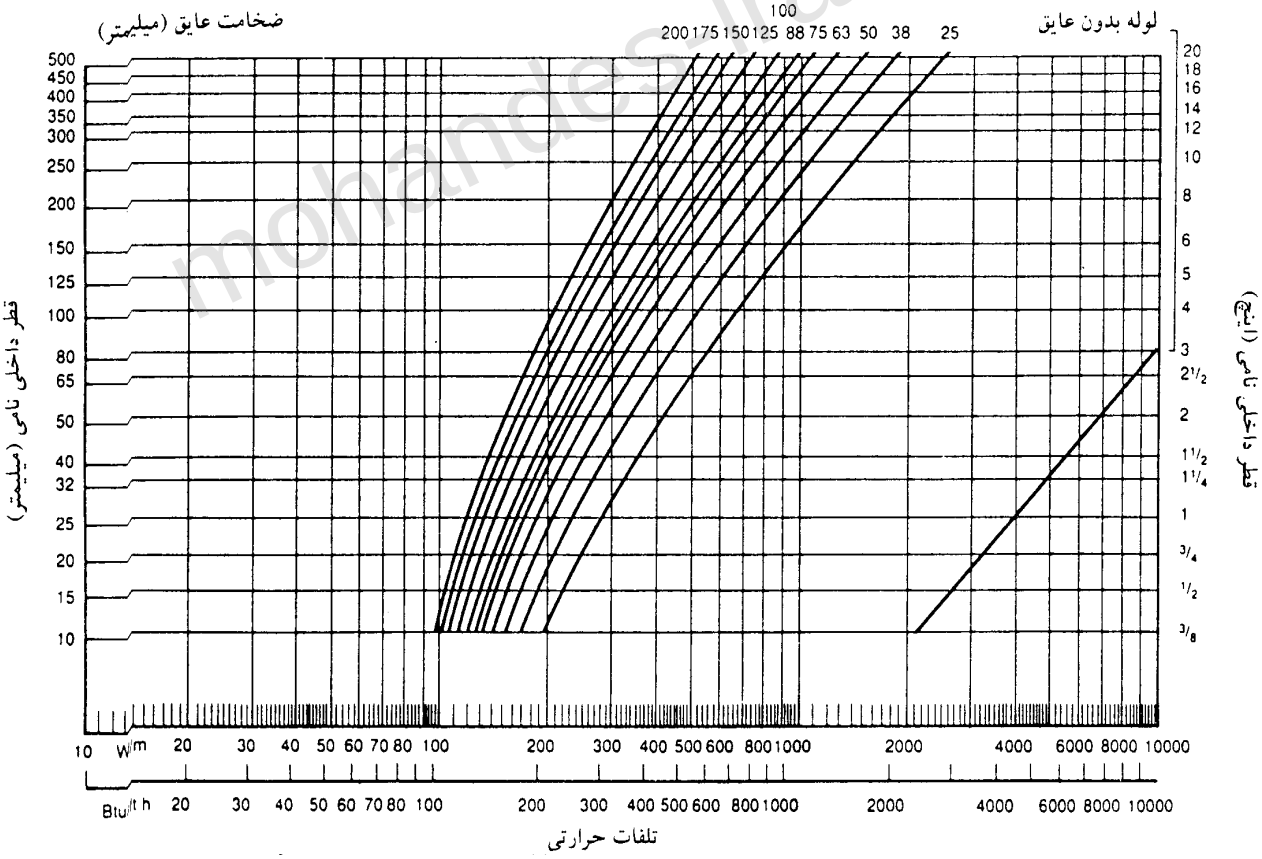


نمودار ۱۷: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $400^{\circ}C$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

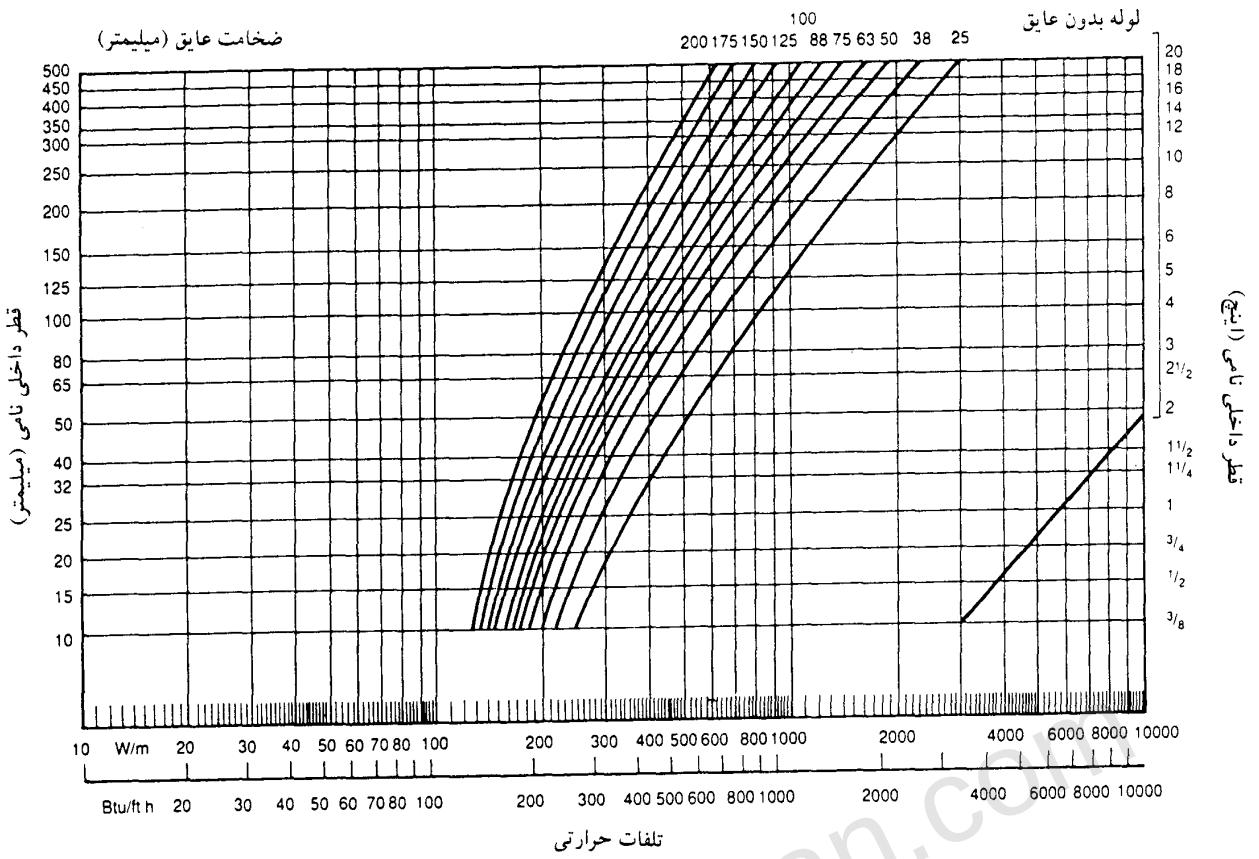


نمودار ۱۸: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $500^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

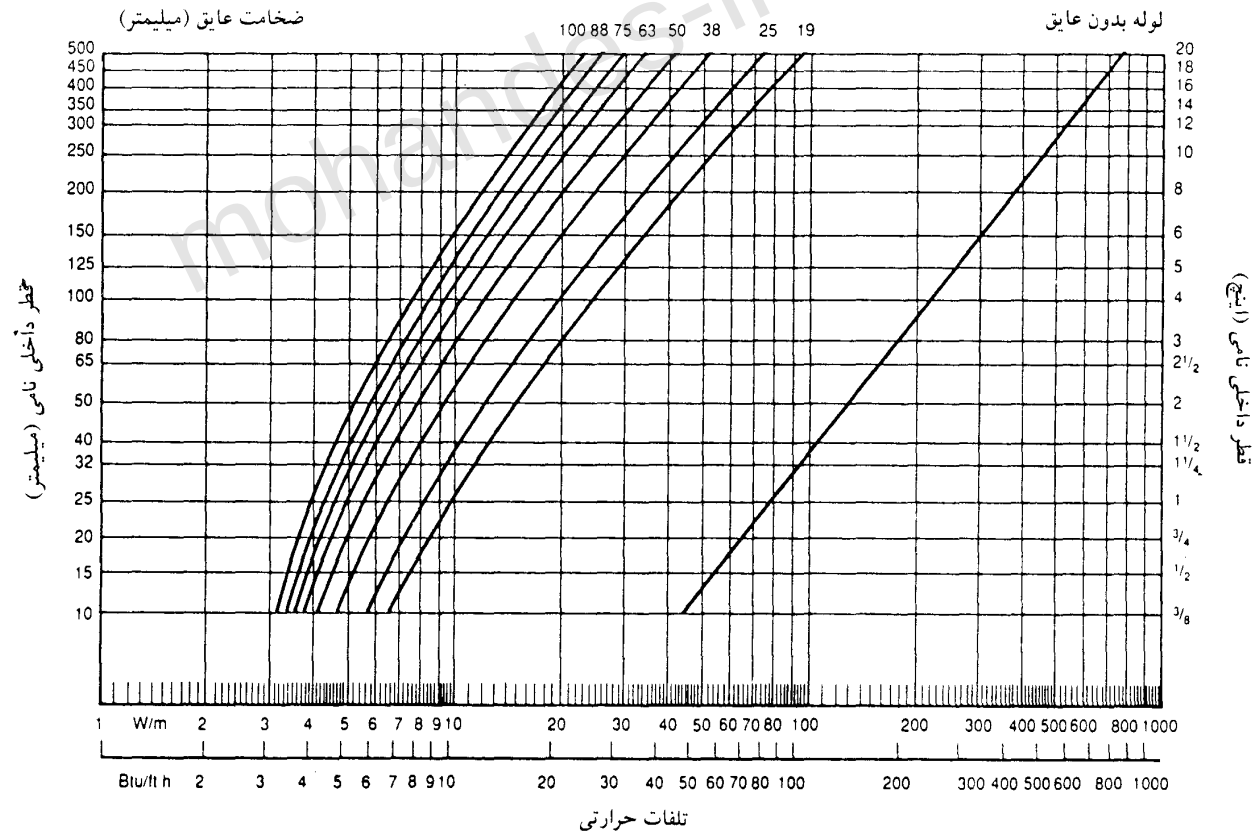


نمودار ۱۹: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $600^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

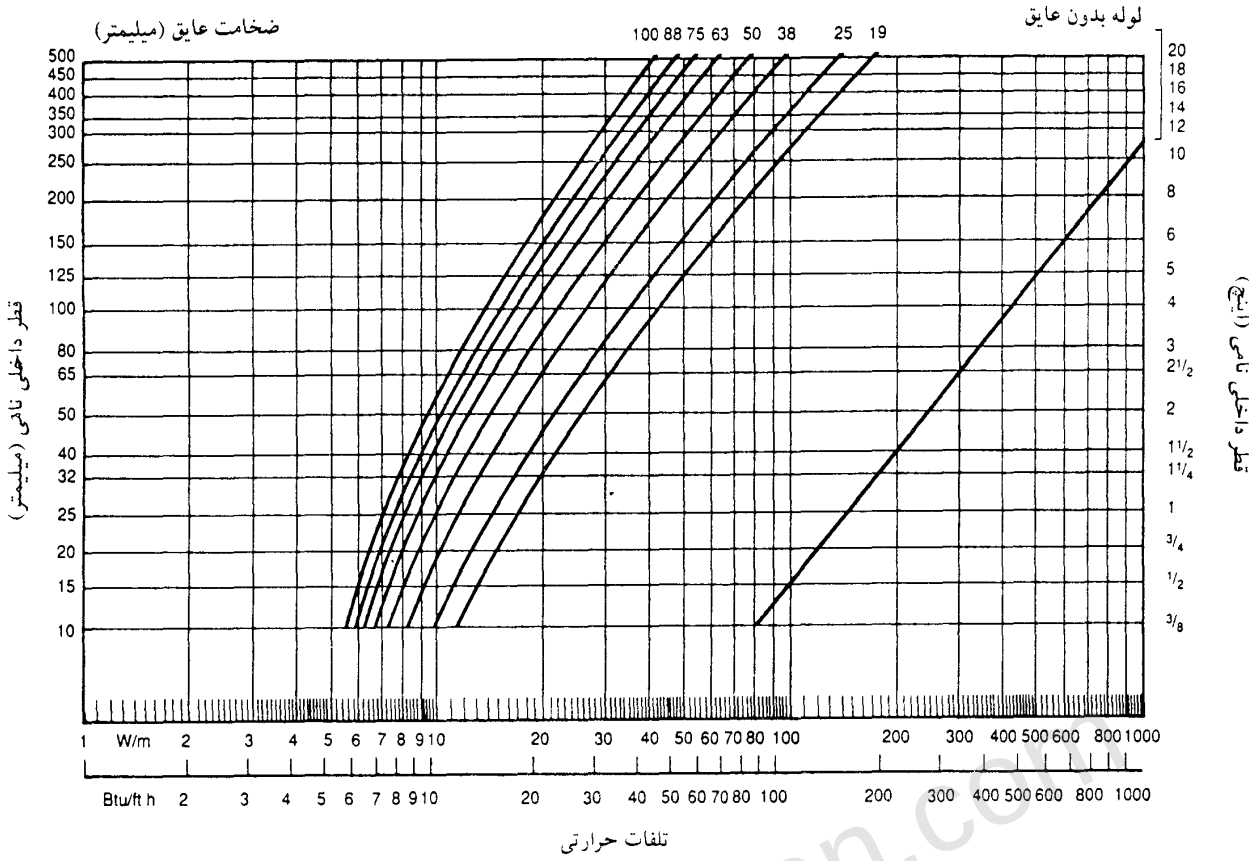


نمودار ۲۰: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $۷۰۰^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده سیلیکات کلسیم یا ۸۵٪ اکسید منیزیم)

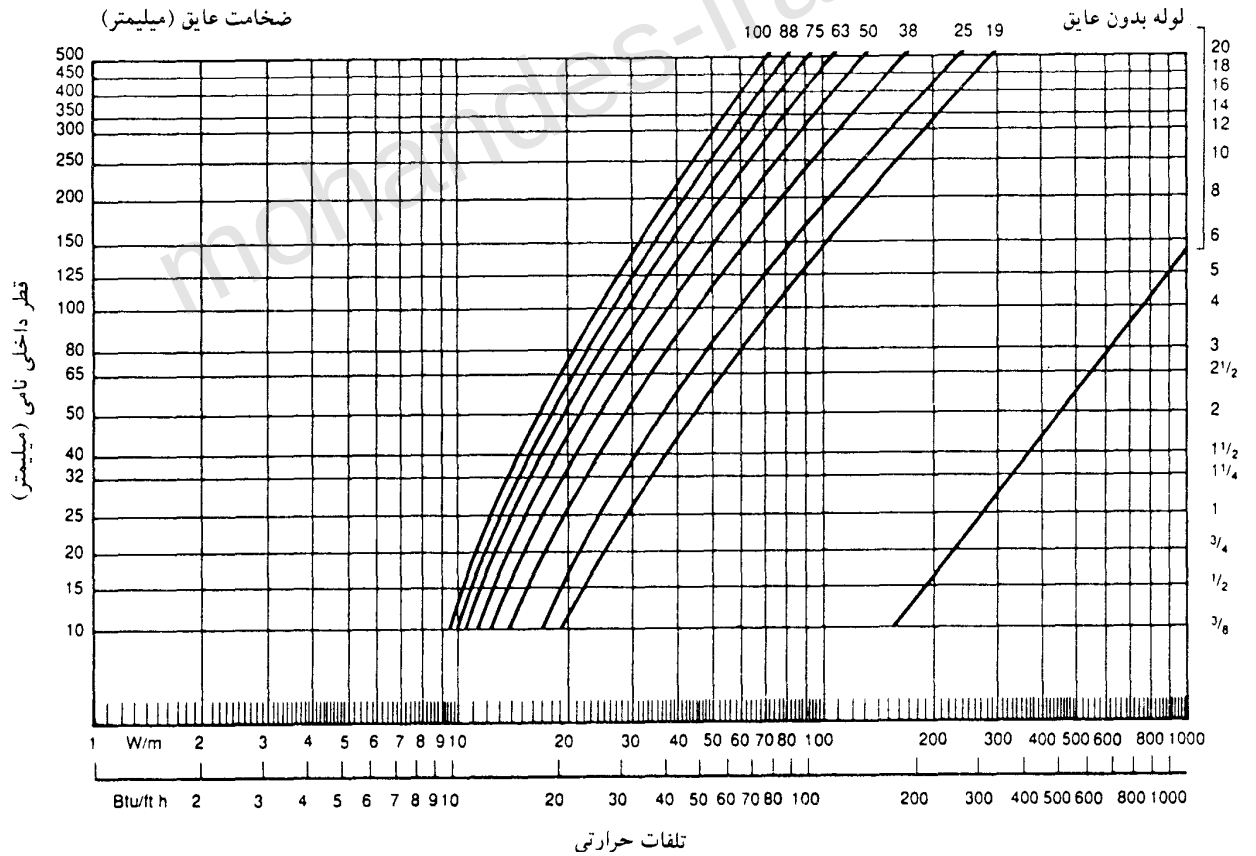


نمودار ۲۱: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح $۷۰^{\circ}c$ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده پلی‌ایزوسیانورات یا پلی‌اورتان)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

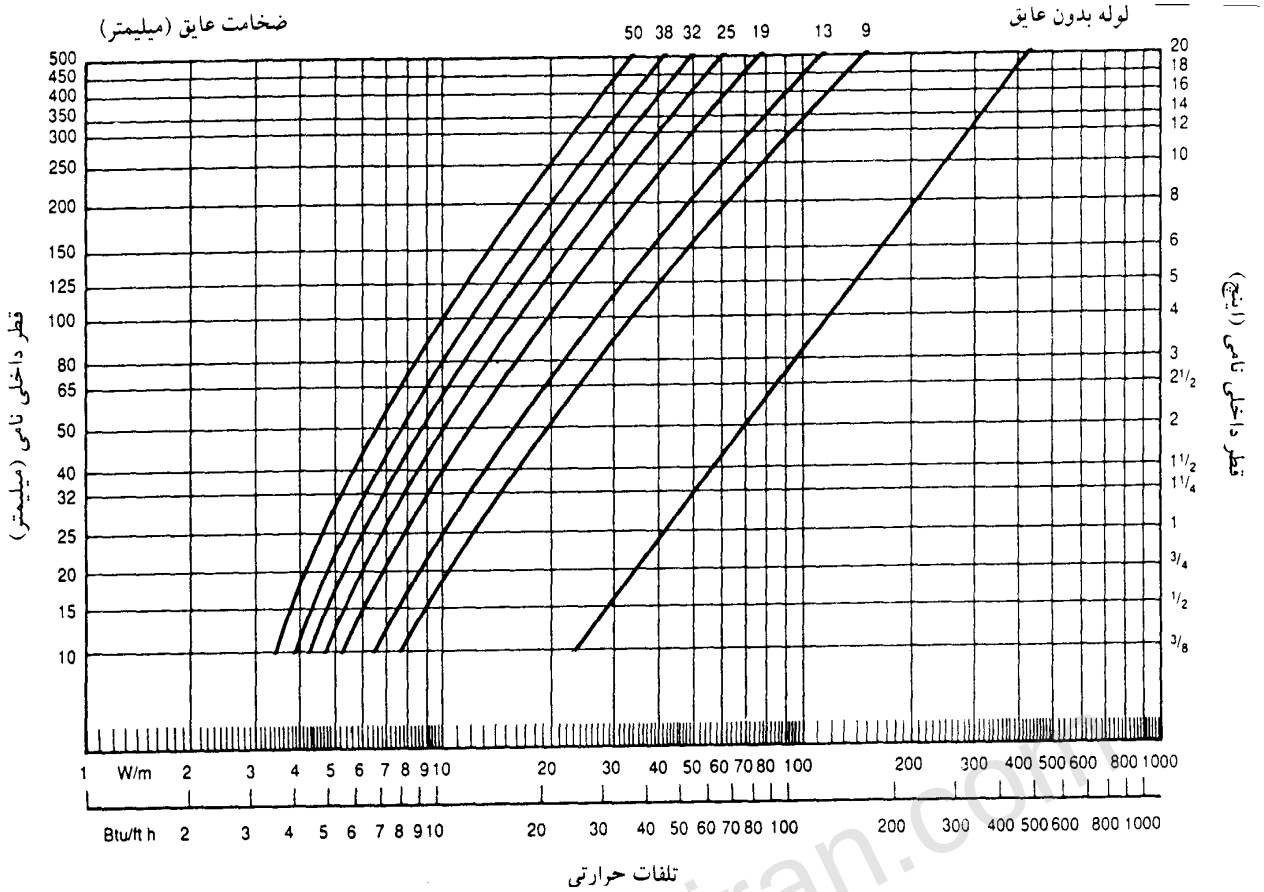


نمودار ۲۲: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح c ° ۱۰۰ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده پلی‌ایزوسیانورات یا پلی‌اورتان)

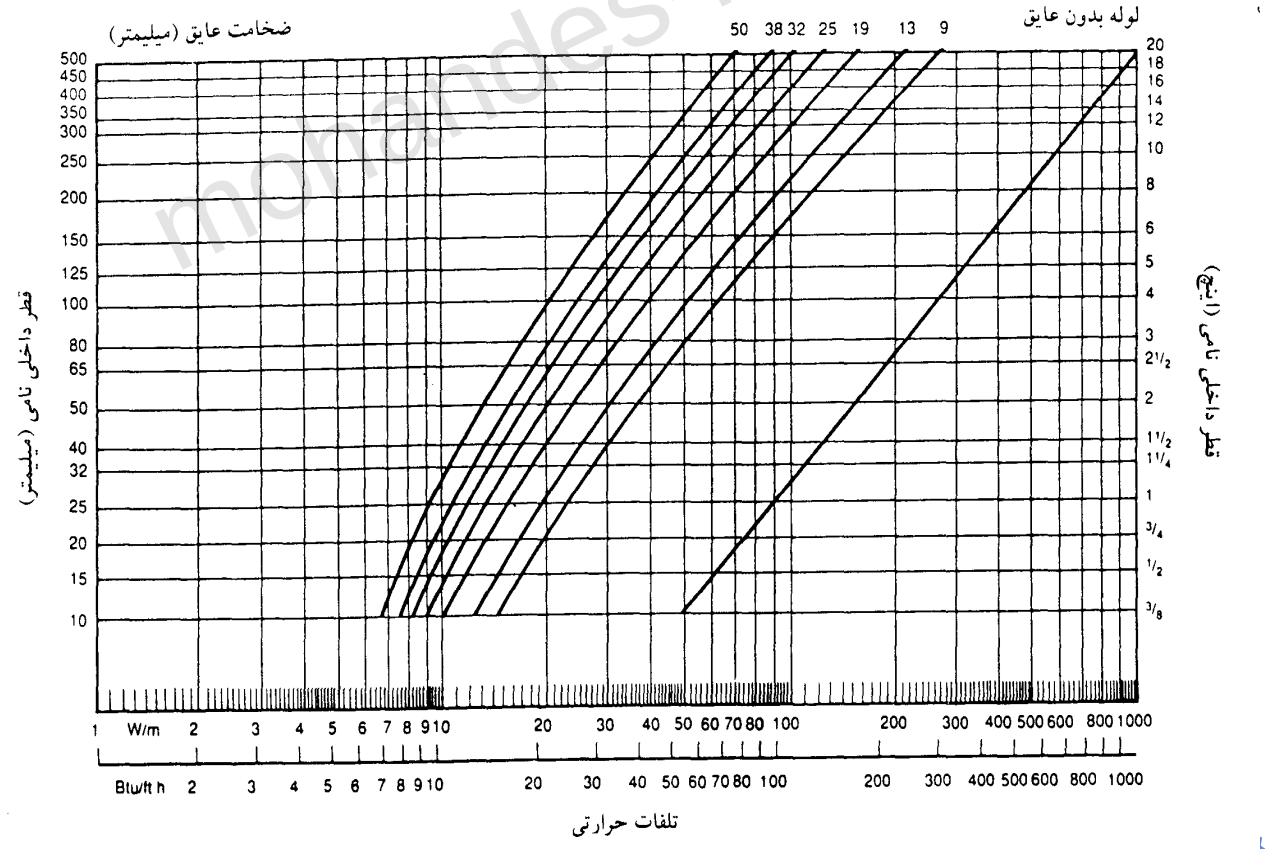


نمودار ۲۳: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح c ° ۱۴۵ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات سخت شکل داده شده پلی‌ایزوسیانورات یا پلی‌اورتان)

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com



نمودار ۲٤: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح c ° ۵۰ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات لاستیک نیتریل گسترده فوم‌پلی‌اتیلن)



نمودار ۲۵: تلفات حرارتی برای لوله‌هایی بادمای سطح c ° ۷۵ با ضخامتهای مختلف عایق (قطعات لاستیک نیتریل گسترده فوم‌پلی‌اتیلن)

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

ضمیمهٔ ٤

بعضی فرمولهای اساسی انتقال حرارت

روشهای مختلف محاسبهٔ ضخامت اقتصادی عایق‌کاری براساس فرضیات مناسبی در خصوص شرایط محیطی انجام می‌گیرند. چون این فرضیات می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر میزان تلفات حرارتی داشته باشند لذا هر تفاوت قابل توجه از این شرایط مفروض باید بصورت یک حالت خاص منفرد بررسی شود. این موضوع نیازمند استفاده از معادلات اساسی انتقال حرارت است. متون استاندارد زیادی درباره انتقال حرارت وجود دارند که جزئیات را بطور کامل ارائه می‌دهند ولی معادلات اساسی بصورت زیر هستند:

$$Q = U(t_1 - t_m).....A_1$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{3/142 d_i h} + \frac{Ln(r_i / r_o)}{6/286 k}.....A_2$$

که: Q = تلفات حرارتی در هر متر از طول لوله (وات)

U = ضریب عمومی انتقال حرارت (وات بر متر)

t_1 = دمای سطح لوله ($^\circ c$) (تقریباً برابر با دمای جریان فرآیند)

t_m = دمای محیط ($^\circ c$)

r_i = شعاع سطح خارجی عایق (متر)

r_o = شعاع خارجی لوله (متر)

d_i = قطر سطح خارجی عایق (متر)

h = ضریب انتقال حرارتی سطحی (W/m^2k)

k = هدایت حرارتی عایق $(W/m.k)$

این معادلات جهت یافتن تلفات حرارتی در هر متر از طول لوله بکار می‌روند. ضریب عمومی انتقال حرارت U ابتدا توسط حل معادلهٔ A_2 تعیین می‌شود سپس معادلهٔ A_1 مقدار لازم را می‌دهد. مسئله عبارتست از تعیین یک مقدار مناسب برای ضریب انتقال حرارت سطح h است. این کار می‌تواند با استفاده از اصول اولیه انجام گیرد (به متون استاندارد مراجعه شود). یا جدول ۲۲ می‌تواند جهت ارائهٔ یک مقدار تقریبی بکارگرفته شود.

mohandes-iran.com
http://www.mohandes-iran.com
مهندس ایران
mohandes-iran.com

جدول ۲۲: تغییرات ضریب سطح خارجی با اختلاف دمای بین سطح و هوا برای مقادیر مختلف ابعاد خارجی عایق

قطر خارجی عایق (mm)	سطح با خاصیت انتشار زیاد				سطح با خاصیت انتشار کم			
	اختلاف دما ($t_m - t_2$) (برحسب درجه کلوین)							
	۱	۲	۵	۱۰	۱	۲	۵	۱۰
	ضریب سطح خارجی (W/m^2k)							
۴۰	۸	۸/۴	۹/۱	۹/۷	۳/۴	۳/۹	۴/۷	۵/۴
۶۰	۷/۶	۸	۸/۷	۹/۳	۳/۱	۳/۵	۴/۲	۴/۹
۱۰۰	۷/۳	۷/۷	۸/۳	۸/۸	۲/۷	۳/۱	۳/۸	۴/۴
۲۰۰	۷	۷/۴	۷/۹	۸/۴	۲/۴	۲/۸	۳/۴	۴
سطح مسطح عمودی	۶/۶	۷	۷/۵	۸	۲	۲/۴	۳	۳/۶

نکته: اعداد بالا بر سطح خارجی عایق دلالت دارند.

mohandes-iran.com

http://www.mohandes-iran.com