



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۷۱۸۸

چاپ اول

اسفند ۱۳۹۲

INSO

17188

1st. Edition

Mar. 2014

فراورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای  
تاسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی -  
عملکرد هیگروترمال - محاسبه نفوذ بخار  
آب - سامانه‌های عایق حرارتی لوله سرد  
- آیین کار

**Thermal insulation products for building  
equipment and industrial installations -  
Hygrothermal performance – Calculation of  
water vapour diffusion – Cold pipe  
insulation systems- Code of practice**

ICS: 91.120.10

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادات در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2 - International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

## کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« فراورده‌های عایق کاری حرارتی برای تاسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی - عملکرد هیگروترمال - محاسبه نفوذ بخار آب - سامانه‌های عایق حرارتی لوله سرد-آیین کار»

### رئیس:

یوسفی، علی اکبر  
(دکترای مهندسی شیمی)

### سمت و / یا نمایندگی

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

### دبیران:

خدابنده، ناهید  
(کارشناس شیمی)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

ویسه، سهراب  
(دکترای مهندسی معدن)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

### اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

باریکانی، مهدی  
(دکترای مهندسی شیمی)

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

حکاکی فرد، حمید رضا  
(کارشناس مهندسی عمران)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

شهرستانی، زهره  
(کارشناس ارشد شیمی)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

کاری، بهروز  
(دکترای عمران - فیزیک ساختمان)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

گنجه‌ای، سپهر  
(دکترای راه و ساختمان)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مظلومی ثانی، مهناز  
(کارشناس شیمی)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مرادی، علیرضا  
(کارشناس ارشد مهندسی انرژی)

شرکت بهینه سازی مصرف سوخت کشور

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مهرگان، سارا  
(کارشناس شیمی)

شرکت بهینه سازی مصرف سوخت کشور

میرزائی، محمد  
(کارشناس ارشد مهندسی مکانیک)

سازمان ملی استاندارد ایران

نوری، نگین  
(کارشناس شیمی)

## فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ج	آشنایی با سازمان استاندارد
د	کمیسیون فنی تدوین استاندارد
و	پیش گفتار
ز	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۲	۳ اصطلاحات و تعاریف، نمادها و یکاها
۴	۴ معادلات محاسبه
۶	۵ شرایط مرزی
۷	۶ روش محاسبه
۱۰	پیوست الف (اطلاعاتی) مثالها
۱۲	پیوست ب (اطلاعاتی) تعیین آزمایشگاهی نرخ تبخیر از سطح یک منسوج فتیله‌ای خیس

## پیش گفتار

استاندارد «فراورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای تاسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی- عملکرد هیگروترمال - محاسبه نفوذ بخار آب - سامانه‌های عایق حرارتی لوله سرد-آیین کار» که پیش نویس آن در کمیسیون های مربوط توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهیه و تدوین شده و در چهار صد و هشتاد و یکمین اجلاس کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فراورده‌های ساختمانی مورخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۰ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات سازمان ملی استاندارد ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارایه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

BS EN 14114:2002, Hygrothermal performance of building equipment and industrial installations – Calculation of water vapour diffusion – Cold pipe insulation systems.

## مقدمه

اگر عایق حرارتی یک سامانه لوله سرد به طور کامل بخار آب بند نباشد هنگامی که دمای سطح لوله سرد زیر نقطه شبنم هوای محیط باشد، جریانی از بخار آب از محیط گرم به سطح لوله وجود خواهد داشت. این جریان بخار آب به میعان بین منفذی در لایه عایق حرارتی و / یا تشکیل شبنم بر روی سطح خود لوله منتهی می شود. میعان بین منفذی ممکن است سبب تخریب عایق حرارتی و تشکیل شبنم بر روی سطح لوله فلزی شود که ممکن است باعث خوردگی در طی زمان شود. اگر دما زیر صفر درجه سلسیوس باشد، یخ تشکیل می شود و روش های این استاندارد کاربرد ندارد.

در دوره هایی که نقطه شبنم هوای محیط بالاتر از دمای سطح بیرونی عایق حرارتی باشد میعان سطحی رخ خواهد داد. این مورد در استاندارد بند ۲-۲ آمده است.

اقدامات متفاوتی برای کنترل انتقال بخار آب و کاهش مقدار میعان قابل انجام است. به طور معمول موارد زیر انجام می شود:

الف) نصب یک کندکننده بخار آب؛

ب) استفاده از مواد عایق حرارتی با مقدار زیاد ضریب مقاومت در برابر بخار آب (تراوایی کم)؛

پ) استفاده از یک کندکننده بخار آب و یک منسوج موئینه فعال<sup>۱</sup> تا به طور مستمر آب میعان شده را از سطح لوله خارج کرده و به محیط باز گرداند.

این که کدام اقدام حفاظتی انتخاب شود به اقلیم منطقه، دمای سیال موجود در لوله و مقاومت در برابر نفوذ لایه عایق حرارتی بستگی دارد. موفقیت هر سامانه به شدت به مهارت کاری و نگهداری بستگی دارد. در هر مورد باید اقدامات مقابله با خوردگی یک لوله فلزی در شرایط سخت انجام شود.

عمر مفید اقتصادی مورد انتظار یک سامانه عایق حرارتی را، با فرض یک حداکثر مجاز مقدار رطوبت جمع شده، می توان با استفاده از روش های این استاندارد محاسبه کرد.

# فراورده‌های عایق کاری حرارتی برای تاسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی - عملکرد هیگروترمال<sup>۱</sup> - محاسبه نفوذ بخار آب - سامانه‌های عایق حرارتی لوله سرد - آیین کار

## ۱ هدف و دامنه کاربرد

۱-۱ هدف از تدوین این استاندارد تعیین روشی برای محاسبه چگالی نرخ بخار آب در سامانه‌های عایق حرارتی لوله سرد و مقدار کل آب نفوذ کرده به داخل عایق با گذشت زمان است. در این روش محاسبه از پیش فرض شده است که بخار آب تنها با نفوذ و بدون مشارکت جریان هوا می‌تواند به داخل سامانه عایق حرارتی مهاجرت کند. همچنین فرض می‌شود که از مصالح عایق حرارتی همسانگرد<sup>۲</sup> و همگن استفاده گردد به این ترتیب در همه نقاط با فاصله یکسان از محور لوله فشار جزئی بخار آب ثابت است.

۲-۱ این استاندارد هنگامی که دمای سیال در لوله بالای صفر درجه سلسیوس است، کاربرد دارد.

۳-۱ این استاندارد برای لوله‌های داخل ساختمان و همچنین لوله‌های فضای باز قابل کاربرد است.

## ۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود. در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها مورد نظر است. استفاده از مراجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

1. EN ISO 9346, Thermal insulation-Mass transfer- Physical quantities and definitions.
2. EN ISO 12241, Thermal insulation for building equipment and industrial installations – Calculation rules.
3. EN ISO 12572, Hygrothermal performance of building materials and products- Determination of water vapour transmission properties.
4. EN ISO 13788, Hygrothermal performance of building components and building elements-Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation- Calculation methods.

---

1- Hygrothermal

2 -Isotropic



### ۳ اصطلاحات و تعاریف، نمادها و یگاها

#### ۱-۳ تعاریف و اصطلاحات

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف داده شده در استانداردهای بند ۱-۲، ۳-۲ و ۴-۲ و موارد زیر به کار می‌رود:

#### ۱-۱-۳

#### سطح مرطوب نمایان (Exposed moist area)

مساحت منسوج فعال موئینه که در معرض شرایط محیطی است.

#### ۲-۱-۳

#### کندکننده بخار آب (Vapour retarder)

موادی با مقاومت زیاد در برابر جریان بخار آب

#### ۳-۱-۳

#### نفوذ بخار آب تصحیح شده معادل ضخامت لایه هوا

#### (Corrected water vapour diffusion equivalent air layer thickness)

ضخامت یک لایه مسطح فرضی با  $\mu=1$  و سطحی برابر  $z_{TTD}$  است که دارای همان مقاومت در برابر نفوذ لایه  $z$  با  $\mu=\mu_z$  است.

یادآوری - به معادله ۱۸ مراجعه کنید.

#### ۲-۳ نمادها و یگاها

در این استاندارد نمادها و یگاهاى ارابه شده در زیر به کار می‌رود.

$A'_e$	مساحت سطحی که از آن تبخیر بر متر طولی لوله رخ می‌دهد	$m^2/m$
$D_j$	قطر بیرونی لایه زام یک سامانه عایق حرارتی	$m$
$D_0$	قطر بیرونی لوله سرد	$m$
$G'$	رطوبت کل جذب شده در یک دوره بر متر طولی لوله	$kg/m$
$P$	فشار واقعی جو	$Pa$
$P_0$	فشار استاندارد جو معادل ۱۰۱۳۲۵	$Pa$
$R_v$	ثابت گاز برای بخار آب معادل ۴۶۱/۵	$J/(kg.K)$
$T$	دمای ترمو دینامیکی (مطلق)	$K$
$Z'_p$	مقاومت در برابر بخار آب سامانه عایق حرارتی بر متر طولی لوله	$m.s.Pa/kg$

$m.s.Pa/kg$	مقاومت در برابر بخار آب لایه زام یک سامانه عایق حرارتی بر متر طولی لوله	$Z'_j$
$m.s.Pa/kg$	مقاومت در برابر بخار آب یک ورقه نازک، پوشش یا رویه بر متر طولی لوله	$Z'_{fl}$
$m$	ضخامت یک لایه عایق حرارتی	$d$
$kg/(m^2.s.Pa)$	ضریب تبخیر	$f_e$
$kg/(m.s)$	نرخ جریان بخار آب در عایق حرارتی بر متر طولی لوله	$g'$
$kg/(m.s)$	نرخ چگالش بر متر طولی لوله	$g'_c$
$kg/(m.s)$	نرخ تبخیر بر متر طولی لوله	$g'_e$
$W/(m^2.K)$	ضریب انتقال حرارتی همرفت	$h_c$
$Pa$	فشار جزئی بخار آب	$p$
$Pa$	فشار جزئی بخار آب هوا	$p_a$
$Pa$	فشار بخار آب اشباع	$p_{sat}$
$m$	ضخامت لایه هوای معادل نفوذ بخار آب	$S_d$
$m$	ضخامت لایه هوای معادل نفوذ بخار آب فویل‌ها	$S_{df}$
ماه، سال	دوره محاسبه (ماه یا سال)	$t$
$m$	فاصله	$x$
$kg/(m.s.Pa)$	نفوذ پذیری بخار آب	$\delta$
$kg/(m.s.Pa)$	نفوذ پذیری بخار آب هوا	$\delta_0$
-	ضریب مقاومت در برابر بخار آب	$\mu$
$m$	ضخامت لایه هوای معادل نفوذ بخار آب تصحیح شده لایه زام	$\sigma_{dj}$
$m$	ضخامت لایه هوای معادل نفوذ بخار آب تصحیح شده کل از سطح لوله سرد تا بیرون لایه ز	$\tilde{\sigma}_{dj}$
$^{\circ}C$	دمای سیال درون لوله	$\theta_0$

یادآوری - به دلایل عملی، ساعت یا روز اغلب به جای ثانیه به عنوان واحدهای زمان استفاده می‌شوند.

#### ۴ معادلات محاسبه

##### ۱-۴ کلیات

چگالی نرخ جریان بخار آب،  $g$ ، از میان یک ماده با معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$g = -\delta \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

که در آن:

$\delta$  نفوذپذیری بخار آب ماده است.

کل جذب رطوبت در طی یک دوره،  $G$ ، با معادله (۲) به دست می‌آید:

$$G = \int_0^t g dt \quad (2)$$

در محاسبات ضریب مقاومت در برابر نفوذ،  $\mu$ ، عموماً به جای تراوایی به کار می‌رود (معادله ۳):

$$\mu = \frac{\delta_0}{\delta} \quad (3)$$

که در آن:

$\delta_0$  نفوذپذیری بخار آب هوای ساکن است که از معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$\delta_0 = \frac{0.083P_0}{R_v TP} \left( \frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (4)$$

برای محاسبات تقریبی،  $\delta_0$  را می‌توان در محدوده دمایی مورد نظر ثابت فرض کرد. بنابراین از مقدار معادله (۵) می‌توان استفاده کرد:

$$\delta_0 = 2.0 \times 10^{-10} \quad (5)$$

##### ۲-۴ عایق حرارتی همگن

در مورد لوله سرد با یک لایه منفرد همگن عایق حرارتی، چگالی جریان بخار آب بر متر یک لوله سرد عایقکاری حرارتی شده با جایگزین کردن عبارت دیفرانسیلی در معادله (۱) از تفاضل فشار بخار آب به دست می‌آید:

$$g' = \frac{P_a - P_{sat}(\theta_0)}{Z'_p} \quad (6)$$

که در آن:

$P_a$  فشار بخار آب هوای محیط بر حسب Pa؛

$P_{sat}(\theta_a)$  فشار بخار آب اشباع در سطح بیرونی لوله بر حسب Pa؛

$Z'_p$  مقاومت در برابر بخار آب بر متر طولی عایق حرارتی لوله بر حسب m.s.Pa/kg که در معادله (۷) تعریف شده است:

$$Z'_p = \frac{\ln \frac{D_1}{D_0}}{2\pi\pi} \quad (7)$$

هنگامی که فشار بخار آب هوای محیط بیش تر از فشار بخار آب اشباع در سطح سرد لوله باشد تنها یک جریان بخار آب وجود خواهد داشت و بنابراین میعان در سطح لوله سرد صورت می گیرد. بنابراین کل جذب آب در طی یک دوره t با معادله (۸) داده می شود:

$$G' = \int_0^t \frac{P_a(t) - P_{sat}(\theta_0(t))}{Z'_p} dt \quad (8)$$

#### ۳-۴ سامانه های عایق کاری حرارتی چندلایه

مقاومت در برابر بخار آب،  $Z'_p$ ، یک سامانه عایق حرارتی با n لایه مختلف با معادله (۹) به دست می آید:

$$Z'_p = \sum_{j=1}^n \frac{\ln \frac{D_j}{D_{j-1}}}{2\pi\delta_j} \quad (9)$$

که معادله زیر را به دست می دهد:

$$Z'_p = \frac{1}{2\pi\pi_0} \sum_{j=1}^n \mu_j \ln \frac{D_j}{D_{j-1}} \quad (10)$$

که در آن:

$$\mu_j = \frac{\delta_0}{\delta_j}$$

z مساوی ۱ تا n، که لایه ها را از لوله سرد به طرف بیرون تعریف می کند.

معادله (۱۰) را هم چنین می توان برای مواد عایق حرارتی همگن با مقاومت در برابر بخار آب که به شدت وابسته به دما است استفاده کرد.

یادآوری - به مثال الف-۲ مراجعه کنید.

اگر لایه بیرونی تر، n، روکش کندکننده بخار آب، فویل یا پوسته با ضخامت قابل چشم پوشی اما با ضخامت زیاد لایه هوای معادل - نفوذ بخار آب  $S_{df}$ ، باشد، مقاومت در برابر بخار آب کندکننده با معادله (۱۱) به دست می آید:

$$Z'_n = \frac{1}{\pi\delta_0 D_n} S_{df} = \frac{1}{2\pi\delta_0} \frac{2S_{df}}{D_n} \quad (11)$$

بنابراین مقاومت در برابر بخار آب کل سامانه به صورت معادله (۱۲) محاسبه می شود:

$$Z'_p = \frac{1}{2\pi\delta_0} \left( \sum_{j=1}^{n-1} \mu_j \ln \frac{D_j}{D_{j-1}} + \frac{2S_{df}}{D_n} \right) \quad (12)$$

پس کل جذب آب در طی یک دوره t با معادله (۸) به دست می آید.

#### ۴-۴ سامانه‌های با ظرفیت خشک شدن

برای سامانه‌های لوله سرد با ظرفیت‌های خشک شدن، کل جذب آب  $G'$  در سامانه با معادله (۱۳) داده می‌شود:

$$G' = \int_0^t (g' - g'_e) dt \quad (13)$$

که در آن:

$g'_e$  ظرفیت خشک شدن بر متر طولی لوله بر حسب  $kg/(m.s)$ .

برای سامانه‌های عایق کاری حرارتی که در آن‌ها ظرفیت خشک شدن با استفاده از عمل فتیله برای یک منسوج موئینه فعال به دست می‌آید و ظرفیت به وسیله تبخیر از سطح مرطوب نمایان آزاد منسوج بر طول متر لوله،  $A'_e$  با معادله (۱۴) تعیین می‌شود:

$$g'_e = f_e (P_{sat}(\theta_a) - P_a) A'_e \quad (14)$$

که در آن:

$P_{sat}(\theta_a)$  فشار بخار آب اشباع در دمای محیط بر حسب Pa است؛

ضریب تبخیر،  $f_e$ ، را می‌توان با اندازه‌گیری یا محاسبه با معادله (۱۵) تعیین کرد:

$$f_e = \frac{h_c}{R_v T \rho c_p} \quad (15)$$

که در آن:

$h_c$  ضریب انتقال حرارت همرفتی، بر حسب  $W/(m^2.K)$ ؛

$R_v$  ثابت گاز برای بخار آب برابر  $461.5 J/(kg.K)$ ؛

$\rho$  چگالی هوا برابر  $1.205 kg/m^3$  در  $20^\circ C$ ؛

$c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت هوا برابر  $1005 J/(kg.K)$  در  $20^\circ C$ .

یادآوری - روش اندازه‌گیری در پیوست ب ارائه شده است. اطلاعات بیش‌تر در مورد معادله (۱۵) را می‌توان در پیوست پ (مرجع [۵] کتاب نامه) یافت.

برای لوله‌های افقی و قائم در هوای ساکن  $h_c$  برابر  $10 W/(m^2.K)$  است که:

$$f_e = 6 \times 10^{-8} kg/(m^2.s.pa)$$

بنابراین کل جذب آب در طی زمان،  $t$ ، با معادله (۱۶) به دست می‌آید:

$$G' = \int_0^t \left[ \frac{P_a - P_{sat}(\theta_0)}{Z_p} - f_e (P_{sat}(\theta_a) - P_a) A'_e \right] dt \quad (16)$$

#### ۵ شرایط مرزی

شرایط مرزی زیر برای دما و فشار بخار آب باید در ارزیابی معادلات داده شده در بند ۴ استفاده شود.

##### ۱-۵ در سطح لوله سرد

دمای سطح لوله سرد باید به عنوان دمای سیال درون لوله در نظر گرفته شود. فشار بخار آب در سطح باید به

عنوان فشار بخار آب اشباع در آن دما، یعنی رطوبت نسبی ۱۰٪ محسوب شود.

## ۲-۵ هوای محیط

برای بیرون ساختمان‌ها، دما و فشار بخار متوسط سالیانه یا دما و فشار بخار متوسط ماهیانه گرم‌ترین ماه سال را استفاده کنید.

برای داخل ساختمان‌ها، دما و فشار بخار نماینده بهره‌برداری از ساختمان را در گرم‌ترین ماه سال استفاده کنید. روش‌های به دست آوردن شرایط داخلی در استاندارد بند ۲-۴ داده شده است.

یادآوری - فشار بخار آب متوسط ماهیانه نتایجی به دست می‌دهد که در جهت اطمینان قرار دارد.

## ۶ روش محاسبه

### ۱-۶ کلیات

معادلات داده شده در بند ۴ محاسبه مقدار کل آب میعان شده درون عایق حرارتی لوله سرد و تعیین این که آیا میعان درون عایق حرارتی یا تنها بر روی سطح لوله رخ می‌دهد، را امکان‌پذیر می‌سازد.

برای ارزیابی مقدار بخار آب انتقال یافته به داخل سامانه لوله سرد عایق کاری حرارتی شده روش‌های زیر باید قدم به قدم پیروی شود.

### ۲-۶ محاسبه نرخ میعان در یک لایه منفرد عایق حرارتی همگن

۱-۲-۶ دمای کاربرد سیال سرمایشی و دما و رطوبت نسبی محیط را معین کنید.

۲-۲-۶ فشار بخار مربوط به شرایط اقلیمی مورد نظر را تعیین کنید.

۳-۲-۶ مقدار جذب آب را با استفاده از معادله (۸) محاسبه کنید.

### ۳-۶ محاسبه نرخ میعان در یک سامانه عایق حرارتی چندلایه

۱-۳-۶ دمای کاربرد سیال سرمایشی و دما و رطوبت نسبی محیط را معین کنید.

۲-۳-۶ توزیع دما را درون عایق حرارتی مطابق استاندارد بند ۲-۲ محاسبه کنید.

۳-۳-۶ توزیع فشار اشباع را به عنوان تابعی از دما مطابق استاندارد بند ۲-۴ محاسبه کنید.

۴-۳-۶ مقدار نفوذ بخار آب تصحیح شده معادل ضخامت لایه هوا،  $\sigma_{d,j}$ ، را برای مرزهای بین هر لایه  $j$  عایق محاسبه کنید.  $\sigma_{d,j}$  به عنوان ضخامت یک لایه مسطح فرضی با  $\mu=1$  و سطح  $\pi D_j$  که دارای همان مقاومت در برابر نفوذ به عنوان لایه  $j$  با  $\mu=\mu_j$  تعریف می‌شود.

$$\frac{\sigma_{d,j}}{\delta_0 \pi D_j} = \frac{\ln \frac{D_j}{D_{j-1}}}{2\pi \mu_j} \quad (17)$$

که به دست می‌دهد:

$$\sigma_{d,j} = \mu_j \frac{D_j}{2} \ln \frac{D_j}{D_{j-1}} \quad (18)$$

۵-۳-۶ نفوذ بخار آب تصحیح شده معادل ضخامت لایه هوا،  $\tilde{\sigma}_{d,j}$ ، از سطح بیرونی لوله سرد را برای هر حد فاصل بین مواد با معادله (۱۹) محاسبه کنید.

$$\bar{\sigma}_{d,j} = \sum_{i=1}^j \sigma_{d,i} \quad (19)$$

۶-۳-۶ فشار بخار آب اشباع را به عنوان تابعی از  $\bar{\sigma}_{d,j}$ ، برای هر لایه از عناصر سامانه لوله سرد رسم کنید. سپس پروفیل فشار بخار واقعی را به صورت خط مستقیمی بین فشار بخار محیط و فشار بخار سطح بیرونی لوله رسم کنید.

۱-۶-۳-۶ اگر فشار بخار واقعی P فشار اشباع  $p_{sat}$  را قطع نکند، میعان تنها در سطح بیرونی لوله رخ خواهد داد. سپس نرخ میعان به وسیله معادله (۶) به دست می‌آید.

۲-۶-۳-۶ اگر P فشار اشباع  $p_{sat}$  را قطع کند میعان درون عایق حرارتی و همچنین بر روی سطح بیرونی لوله رخ می‌دهد. مماس بر نقطه میعان را تعیین کنید و نرخ میعان را در عایق حرارتی و در سطح لوله از معادله (۲۰) محاسبه کنید.

$$g'_c = \delta_0 \left[ \frac{P_a - P_{sat}(\theta_C)}{\bar{\sigma}_{d,T} - \bar{\sigma}_{d,c}} - \frac{P_{sat}(\theta_C) - P_{sat}(\theta_0)}{\bar{\sigma}_{d,c}} \right] \quad (20)$$

که در آن:

$\theta_C$  دمای در حد فاصل که در آن میعان رخ می‌دهد، بر حسب °C؛

$\bar{\sigma}_{d,c}$  مجموع مقادیر  $\sigma_{d,j}$  از لوله به حد فاصل بین مواد که در آن جا میعان رخ می‌دهد؛

$\bar{\sigma}_{d,T}$  مجموع مقادیر  $\sigma_{d,j}$  از لوله به طرف خارج عایق.

۳-۶-۳-۶ اگر  $p_{sat}$ ، P را در دو محل قطع کند، میعان در این دو محل درون عایق و همچنین بر روی لوله سرد رخ می‌دهد، به شکل ۱ مراجعه کنید:

$$g'_{c1} = \delta_0 \left[ \frac{P_{sat}(\theta_{C2}) - P_{sat}(\theta_{C1})}{\bar{\sigma}_{d,c2} - \bar{\sigma}_{d,c1}} - \frac{P_{sat}(\theta_{C1}) - P_{sat}(\theta_0)}{\bar{\sigma}_{d,c1}} \right] \quad (21)$$

$$g'_{c2} = \delta_0 \left[ \frac{P_a - P_{sat}(\theta_{C2})}{\bar{\sigma}_{d,t} - \bar{\sigma}_{d,c2}} - \frac{P_{sat}(\theta_{C2}) - P_{sat}(\theta_{C1})}{\bar{\sigma}_{d,c2} - \bar{\sigma}_{d,c1}} \right] \quad (22)$$

که در آن:

$\theta_{C1}$  دما در حد فاصل میعان نزدیک‌تر به لوله سرد، بر حسب °C؛

$\theta_{C2}$  دما در حد فاصل میعان نزدیک به هوای بیرونی، بر حسب °C؛

$\bar{\sigma}_{d,c1}$  مجموع مقادیر  $\sigma_{d,j}$  از لوله به حد فاصل میعان نزدیک‌تر به لوله سرد؛

$\bar{\sigma}_{d,c2}$  مجموع مقادیر  $\sigma_{d,j}$  از لوله به حد فاصل میعان نزدیک به هوای بیرونی.

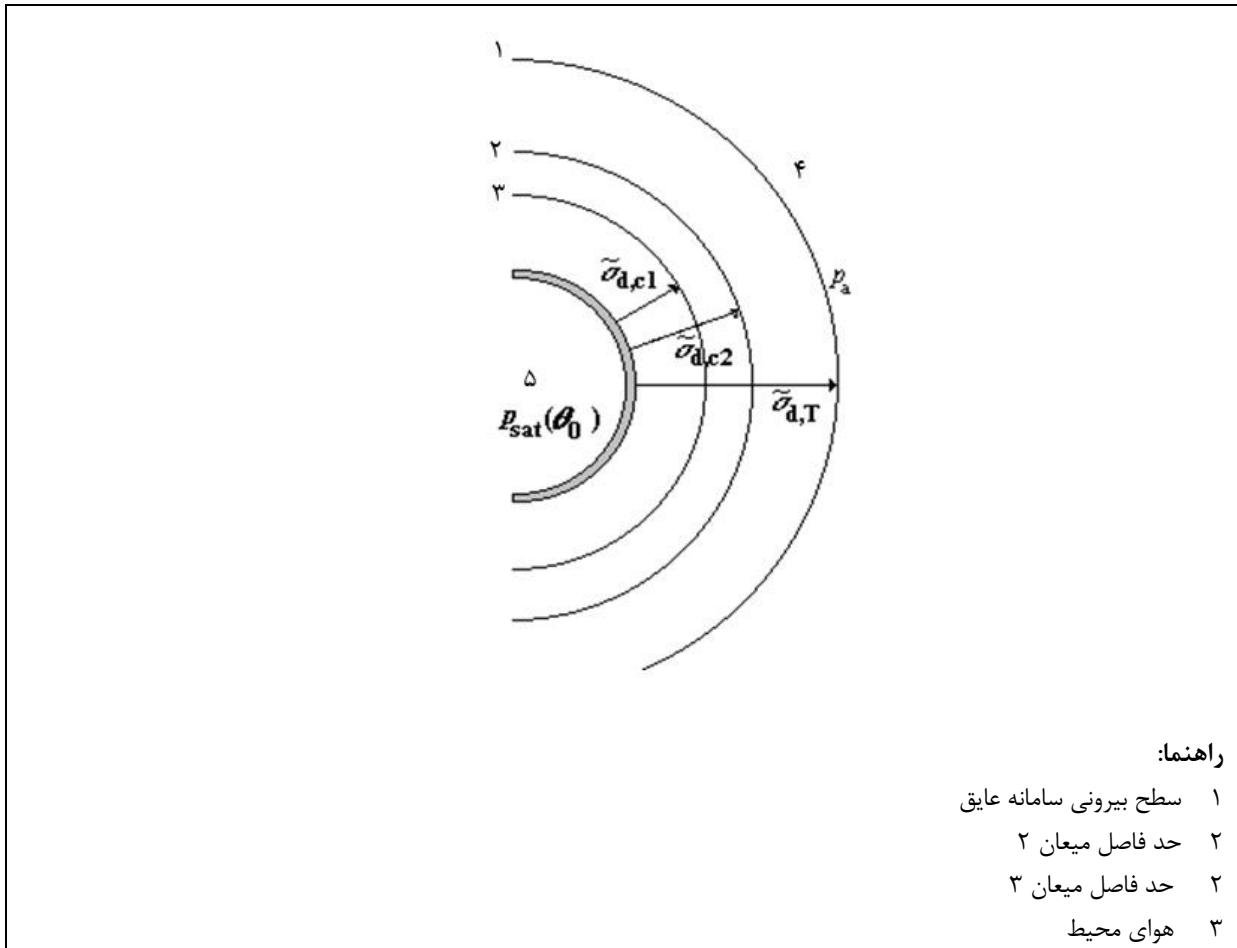
۴-۶-۳-۶ اگر ضریب مقاومت در برابر بخار آب یک عایق حرارتی شدیداً وابسته به دما باشد، لایه عایق باید به زیر لایه‌هایی با ضرایب مقاومت بخار آب متفاوت تقسیم شود.

یادآوری - مثالی از محاسبه در پیوست الف ارائه شده است.

۵-۶-۳-۶ تجمع کل میعان بر روی لوله و در درون سامانه عایق حرارتی را با انتگرال گیری نرخ‌های میعان جداگانه در طی زمان با معادله (۲۳) محاسبه کنید:

$$G' = \int_0^t \sum_{i=0}^{N_p} g'_i(t) dt \quad (23)$$

که در آن  $N_p$  تعداد حد فاصل‌های میعان درون سامانه عایق حرارتی است.



شکل ۱- مقطع عرضی لوله سرد عایق کاری حرارتی شده با دو حد فاصل میعان درون سامانه عایق



## پیوست الف

### (اطلاعاتی)

#### مثال‌ها

الف-۱ جذب آب در یک لوله سرد عایق حرارتی شده با یک کندکننده بخار بر روی سطح بیرونی

ضریب مقاومت در برابر بخار آب عایق حرارتی  $\mu_1=50$ ؛

ضخامت عایق حرارتی  $d_1=0.05m$ ؛

قطر لوله بدون عایق حرارتی  $D_0=0.1m$ ؛

بخار آب معادل ضخامت لایه هوای کندکننده بخار آب  $s_{df}=100m$ ؛

شرایط اقلیمی:

دمای محیط  $20^\circ C$ ، رطوبت نسبی  $0.7$  به دست می‌دهد  $P_a=1638Pa$ ؛

دمای سیال لوله  $5^\circ C$ ، به دست می‌دهد  $P_{sat}(\theta_0)=872Pa$

مقاومت بخار آب کل سامانه عایق حرارتی از معادله (۱۲) به دست می‌آید.

$$Z'_p = \frac{1}{2\pi \times 2 \times 10^{-10}} \left[ 50 \ln \frac{0.2}{0.1} + \frac{2 \times 100}{0.2} \right] = 8.23 \times 10^{11} \text{ m.Pa.s/kg} \quad (\text{الف-۱})$$

چگالی نرخ جریان بخار آب با معادله (۶) محاسبه می‌شود.

$$g' = \frac{1638 - 872}{8.23 \times 10^{11}} = 9.31 \times 10^{-10} \text{ kg/(m.s)} \quad (\text{الف-۲})$$

جرم تجمعی در طی یک سال معادل است با  $G'_a=0.029 \text{ kg/m}$

الف-۲ لوله سرد عایق شده با یک لایه از ماده‌ای با ضریب مقاومت در برابر بخار آب به شدت وابسته به دما

در این مثال فرض می‌شود که یک لوله سرد توسط ماده‌ای با ضخامت  $30 \text{ mm}$  با ضریب مقاومت در برابر بخار آب که به طور خطی از  $2000$  در  $0^\circ C$  تا  $500$  در  $25^\circ C$  تغییر می‌کند. این مورد با سه لایه با ضخامت مساوی با ضرایب مقاومت  $1750$ ،  $1250$  و  $750$  عمل می‌شود.

قطر لوله بدون عایق حرارتی  $D_0=0.088m$ ؛

لایه عایق ۱:  $\mu_1=1750m$ ،  $d_1=0.010m$ ،  $D_1=0.088m$ ؛

لایه عایق ۲:  $\mu_2=1250m$ ،  $d_2=0.010m$ ،  $D_2=0.088m$ ؛

لایه عایق ۳:  $\mu_3=750m$ ،  $d_3=0.010m$ ،  $D_3=0.088m$ ؛

شرایط اقلیمی:

دمای محیط  $25^\circ C$ ، رطوبت نسبی  $0.7$  به دست می‌دهد  $P_a=2060Pa$ ؛

دمای محیط لوله  $0^\circ C$  به دست می‌دهد.  $P_{sat}(\theta_0)=611Pa$ .

کل مقاومت در برابر بخار آب با استفاده از معادله (۱۰) به صورت معادله (الف-۳) به دست می‌آید:

(الف-۳)

$$Z'_p = \frac{1}{2\pi \times 2 \times 10^{-10}} \left[ 1750 \ln \frac{0.108}{0.088} + 1250 \ln \frac{0.128}{0.108} + 750 \ln \frac{0.148}{0.128} \right]$$
$$= 5.41 \times 10^{11} \text{ m.Pa.s/kg}$$

بنابراین چگالی نرخ جریان بخار آب با معادله (۶) به صورت معادله (الف-۴) محاسبه می‌شود.

$$g' = \frac{(2060 - 611)}{5.41 \times 10^{11}} = 2.68 \times 10^{-9} \text{ kg/(m.s)} \quad (\text{الف-۴})$$

جرم تجمعی در طی یک سال برابر است با  $G'_a = 0.0845 \text{ kg/m}$

## پیوست ب (اطلاعاتی)

### تعیین آزمایشگاهی نرخ تبخیر از سطح یک منسوج فتیله‌ای خیس

#### ب-۱ اصول

یک آزمونه خیس منسوج فتیله‌ای بر روی یک لایه زیرین افقی از فوم پلاستیک درون یک محیط با دما و رطوبت کنترل شده قرار داده می‌شود. به دلیل اختلاف بین فشار جزئی بخار آب در سطح خیس منسوج فتیله‌ای و اتمسفر، رطوبت در اثر تبخیر به اتمسفر منتقل می‌شود. مجموعه آزمون به طور دوره‌ای وزن می‌شود تا نرخ تبخیر تعیین شود.

#### ب-۲ وسایل

ب-۱-۲-۱ محفظه با قابلیت نگهداری رطوبت نسبی ویژه با محدوده رطوبت نسبی از ۰/۵ تا ۰/۷، تا دقتی برابر  $\pm 0.2\%$  درصد رطوبت نسبی و دمای ویژه درون محدوده  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $25^{\circ}\text{C}$  با دقتی برابر  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

ب-۱-۲-۲ ترازو با قابلیت وزن کردن مجموعه آزمون تا دقتی برابر  $0.01\text{g}$ .

ب-۱-۲-۳ مجموعه آزمون. مجموعه آزمون در شکل ب-۱ نشان داده می‌شود.

دو عدد ظرف دهانه گشاد با اندازه یکسان با درپوش‌های پیچی بر روی یک سینی قرار داده می‌شوند و در فاصله‌ای حدود  $100\text{mm}$  توسط یک قطعه شکل داده شده فوم پلاستیک با ضخامت مساوی با ارتفاع ظرف شیشه‌ای دهانه گشاد شامل درپوش‌ها محکم می‌شوند. یک شکاف در هر درپوش با عرض کمی بزرگ‌تر از ضخامت آزمونه منسوج و طولی برابر  $50\text{mm}$  بریده می‌شود. آزمونه منسوج دارای عرض  $50\text{mm}$  و طولی برابر فاصله بین شکاف‌ها به اضافه  $100\text{mm}$  است.

آزمونه بر روی صفحه فوم پلاستیک قرار داده می‌شود تا شرایط مشابه آن‌چه در عمل وقتی باریکه‌های فتیله منسوج در عایق لوله با نوار چسب بسته می‌شود، باشد. این به معنی آن است که گرمای نهان تبخیر تنها از هوای محیط می‌آید. برای رسیدن به اندازه‌گیری محافظه کارانه نرخ تبخیر در هوای ساکن، مجموعه آزمون باید در برابر کوران محافظت شود.

#### ب-۳ روش انجام کار

سینی با دو ظرف شیشه‌ای دهانه گشاد به صورت افقی بر روی یک میز قرار داده می‌شود و دو ظرف شیشه‌ای تا چند میلی‌متری لبه با آب مقطر پر می‌شوند، سپس درها بسته می‌گردد. انتهای باریکه منسوج از میان شکاف در هر ظرف شیشه‌ای به طرف پائین فشار داده می‌شود به طوری که حدود  $50\text{mm}$  باریکه در داخل آب هر ظرف شیشه‌ای باشد. نوار خودچسب بر روی شکاف‌ها و بخش‌هایی از باریکه قرار داده می‌شود به طوری که طول نمایان آزاد هر باریکه آزمون  $100\text{mm}$  باشد.

پس از آن که باریکه آزمون به دلیل خواص مکش مویینه فتیله خیس شد، آن را به طرف پائین بر روی لایه زیرین فوم پلاستیکی فشار دهید به طوری که تبخیر تنها از بالا صورت گیرد. سپس سینی با مجموعه آزمون در فواصل منظم حدود یک ساعت وزن می‌شود.

#### ب-۴ محاسبات

نمودار جرم مجموعه در برابر زمان رسم می‌شود و نرخ تبخیر از شیب،  $\alpha$  بر حسب گرم بر ثانیه از خط رگرسیون به دست آمده از حداقل ۸ قرائت تعیین می‌گردد. ضریب تبخیر،  $f_e$ ، از معادله (ب-۱) محاسبه می‌شود.

$$f_e = \frac{\alpha}{3.6 \times 10^6 (p_{sat}(\theta_a) - p_a) A} \quad \text{(ب-۱)}$$

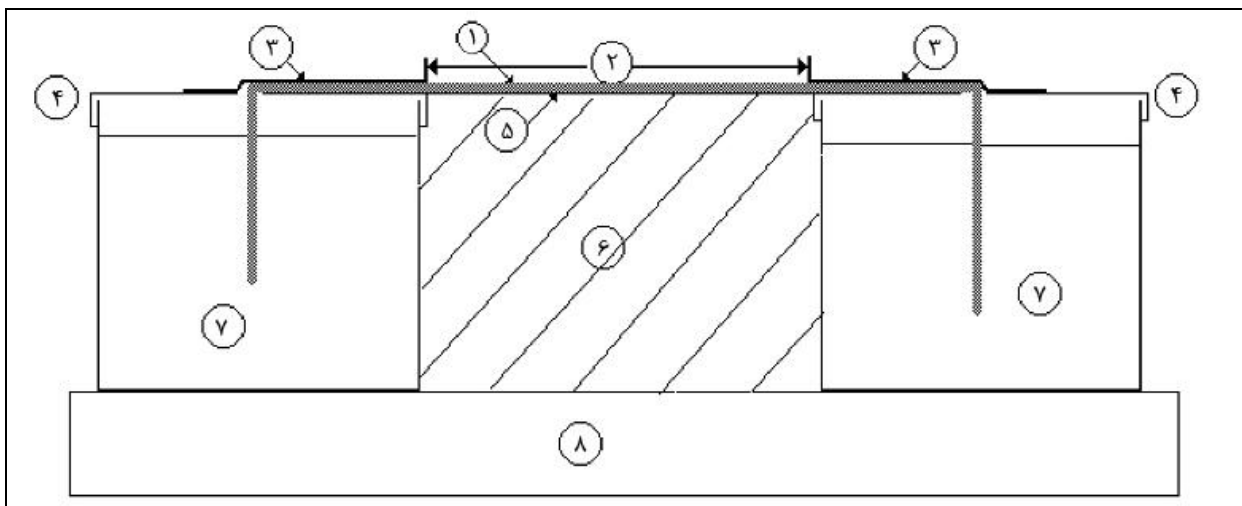
که در آن:

$A$  مساحت سطح تبخیر فعال مجموعه آزمون، بر حسب  $m^2$ ؛

$P_a$  فشار بخار هوا در محفظه آزمون، بر حسب Pa؛

$P_{sat}(\theta_a)$  فشار بخار اشباع در دمای محفظه آزمون، بر حسب Pa.

تبخیر از لبه‌های آزمون قابل چشم‌پوشی است چون ضخامت فتیله معمولاً کم‌تر از ۰.۵mm است. دمای سطح فتیله به دلیل تبخیر قدری کم‌تر از دمای محفظه آزمون است اما از آنجا که این مورد در تأسیسات لوله‌کشی تجاری نیز وجود دارد، روش آزمون مقادیر واقع‌بینانه‌ای به دست می‌دهد.



راهنما:

- |              |               |
|--------------|---------------|
| ۱ آزمون      | ۵ ورق پلاستیک |
| ۲ سطح تبخیر  | ۶ فوم پلاستیک |
| ۳ نوار       | ۷ ظرف شیشه‌ای |
| ۴ درپوش پیچی | ۸ سینی        |

شکل ب ۱- مجموعه آزمون

پوست پ  
(اطلاعاتی)  
کتاب نامہ

- [1] GLASER, H., *Water vapour diffusion in pipe insulations*. Z. Kältetechnik 19 (1967) No.5, pp.129-133
- [2] DIN 4140:1996-11, November 1996, *insulation work on industrial installations and building equipment – Execution of thermal and cold insulation*
- [3] KORSGAARD, V., *Novel innovative concept for self-drying of the insulation of cold piping*. Journal of thermal Insulation and Building Envelopes, Volume 17/1994
- [4] KORSGAARD, V., *innovative self-drying concept for thermal insulation of cold piping insulation materials: Testing and Applications*. Third volume, ASTM STP 1320, R.S. Graves and R.R. Zarr, Eds., American Society for Testing and Materials, 1997
- [5] CIBSE Guide A10, Chartered Institute of Building Services Engineers, London 1986
- [6] GLASER, H., *Feuchtigkeitsscheidung Rouhrisolierungen durch Dampfdiffusion*. Zeitschrift Kältetechnik-Klimatisierung, 20. Janrgang, Heft 1/1968
- [7] AGI-Arbeitsblatt Q 112:1980-10, *Dämmarbeiten an betriebstechnischen Anlagen – Dampfbremsen*
- [8] ZEHENDNER, H., ALBRECHT, W., *Untersuchung der Durchfeuchtung von Dämmschichten bei Kälteleitungen durch Dampfdiffusion*. Zeitschrift Dämmtechnik, Heft 1/1987
- [9] BEHRENS, SIRDESHPANDE, WÖSS: *Geschlossenzellige Elastomerschäume als Dämmstoffe und Wasserdampfbremsen für Kälteleitungen*. Zeitschrift Isoliertechnik, Heft 5 (1990), Seiten 36/37