

بهبود عملکرد سیستم گرمایش از کف با استفاده از پل های فلزی

رحیم حسن زاده^{۱*}، سمانه آرمان^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

hassanzadeh.rahim@gmail.com

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

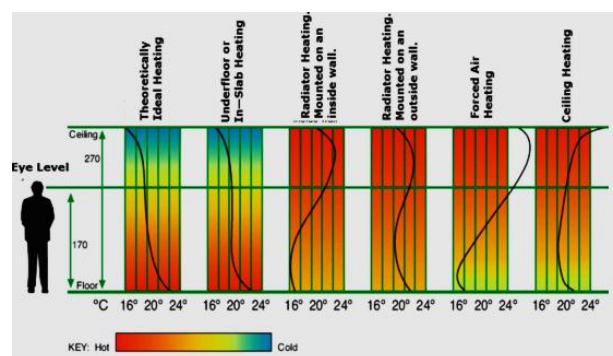
Samaneh.arman@mee.uut.ac.ir

چکیده: این تحقیق به مطالعه عددی بهبود عملکرد سیستم گرمایش از کف با رویکرد مدیریت بهره‌وری انرژی می‌پردازد. برای بهبود عملکرد سیستم گرمایش از کف، از پل های فلزی در دو جنس گالوانیزه و آلومینیوم با ضخامت نیم میلی‌متر استفاده شده است. برای یافتن طول بهینه پل در میان، پل ها با دو طول مختلف برابر با ۱، ۲/۳، ۱/۳ P/S در نظر گرفته شده‌اند که P طول پل و S فضای خالی بین دو لوله مجاور است. برای لوله‌های سیستم گرمایش از کف دو دمای سیال $40^{\circ}C$ و $50^{\circ}C$ بررسی شده‌اند. برای مطالعه بیشتر روی عملکرد سیستم گرمایش از کف، از شرط جابه‌جایی و تشعشع در سطح با ضرایب انتقال گرمای مختلف براساس استاندارد EN 1264 استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده با حالت بدون پل مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه راندمان گرمایی سیستم به میزان حداکثر ۱۲/۸۲٪ و ۶/۴۱٪ در $40^{\circ}C$ و ۱۲/۸۸٪ و ۶/۴۳٪ در $50^{\circ}C$ است. همچنین، شار گرمای خروجی از پنل گرمایشی مجهز به پل آلومینیومی به میزان حداکثر ۶/۰۵٪ بیشتر از آن در حالت پل گالوانیزه است. از سویی دیگر، نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، حکایت از عملکرد بهتر پل ها با طول $P/S=1$ نسبت به پل با طول $P/S=2/3$ به میزان ۷/۰۴٪ دارد.

واژه‌های کلیدی: سیستم گرمایش از کف، پل گرمایی، مدیریت انرژی، انتقال گرما.

۱. مقدمه

امروزه اهمیت سیستم های تأسیساتی بر هیچ کس پوشیده نیست. در این میان، سیستم های گرمایشی و سرمایشی از مهم ترین عوامل مصرف کننده انرژی در ساختمان ها به شمار می روند. لذا بحران انرژی که دامنگیر اکثر کشورها شده، متخصصان را بر آن داشته است که با اتخاذ تدابیر مختلف، مصرف انرژی در ساختمان ها را که عمده ترین بازیگران این عرصه به شمار می روند، کاهش دهند. یکی از این تدابیر، استفاده از روش های نوین در گرمایش و سرمایش ساختمان ها و بهبود مستمر آنهاست. بدون شک سیستم گرمایش از کف تا به امروز یکی از بهترین سیستم های گرمایشی است. دلیل آن افت بسیار کمتر انرژی در مقایسه با سایر سیستم های گرمایشی رایج همچون گرمایش با هوا (سیستم های مبتنی بر هواساز، پکیج یونیت، ابرواشر^۱، زنت^۲) و آب (سیستم مبتنی بر رادیاتور و فن کوئل) است. توزیع دمای بسیار مناسب و همگن در مقایسه با توزیع دمای ایدئال (شکل ۱) نیز از مواردی است که همواره به عنوان مزیت سیستم گرمایش از کف نسبت به سایر سیستم های گرمایشی بیان می شود.



شکل (۱): مقایسه توزیع دمای سیستم های گرمایشی مختلف با توزیع دمای ایدئال [۱]

در دهه گذشته، شاهد مطالعات چشمگیری روی سیستم گرمایش از کف بودیم. در این بخش به چند مقاله ای که به تازگی چاپ شده اند، اشاره می شود. زو و هی [۲] عملکرد گرمایی سیستم گرمایش از کف را با استفاده از مواد مختلف پنل گرمایشی (ماسه و مواد تغییر فازدهنده^۳، و لوله های مختلف به صورت آزمایشگاهی و عددی^۴ بررسی کردند. نتایج مختلفی از این تحقیق به دست آمده است. برای مثال، در مقایسه با شن، برای مواد تغییر فازدهنده به دلیل تغییر فاز، تغییر دمای کمی در پنل گرمایشی مشاهده شد. در عین حال، دو برابر زمان نسبت به پنل ساخته شده از شن نیاز است تا با ماده تغییر فاز دهنده به دمای آسایش رسید. از طرفی، در زمان دشارژ شدن سیستم گرمایش از کف، گرمای انتقال یافته به اتاق

برای پنل شنی بسیار سریع تر از حالت مواد تغییر فاز دهنده است. تحقیق دیگری نیز روی عملکرد حرارتی سیستم گرمایش از کف ساخته شده به صورت دو لایه مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده به صورت آزمایشگاهی توسط یو و زانگ [۳] انجام گرفته است. نتیجه قابل اشاره ای که از این تحقیق به دست آمد، این است که با استفاده از مواد تغییر فازدهنده فرایند گرمایش و سرمایش می توان مقداری انرژی در ماده تغییر فازدهنده در زمان کارکرد غیر پیک سیستم ذخیره کرد و آن را در وضعیت پیک کاری سیستم استفاده کرد که این کار موجب کاهش مصرف انرژی می شود. تحقیق مشابهی نیز توسط هانگ و همکاران [۴] با مواد تغییر فازدهنده انجام گرفته و نتایج مشابهی ارائه شده است. فونتنا [۵] به مطالعه عملکرد حرارتی سیستم گرمایش از کف برای فضاهای مبلی پرداخته است. سطح محصور شده توسط مبلمان در این تحقیق، نسبت به سطح کل فضای مورد مطالعه در محدوده ۲۵ تا ۴۳ درصد بوده است. مشاهده شده است که در فضاهای مبلی، عملکرد سیستم گرمایش از کف به صورت تابعی از میزان مبلمان کاهش می یابد. تحلیل عددی و آزمایشگاهی روی میزان گرمای ذخیره شده و آزاد شده در طول فرایند گرمایش متناوب سیستم گرمایش از کف توسط وانگ و همکاران [۶] انجام گرفته است. نتایج قابل توجهی در این مطالعه به دست آمده است. برای مثال، در طول مدت پیش گرمایش، فاصله لوله ها دارای اثر چشمگیری در کاهش زمان پیش گرمایش است، در حالی که دمای سیال داخل لوله ها و همچنین ضخامت لایه پوشش دهنده روی لوله ها دارای اثرات ضعیف تری هستند. از طرفی، پس از گذشت بیست ساعت از شروع پیش گرمایش، فرایند گرمایش کامل شده و پس از آن فاصله لوله ها و دمای سیال واسطه، نقش قابل توجهی در گرمای خروجی از پنل گرمایشی نخواهد داشت، در حالی که ضخامت پنل گرمایشی نقش بیشتری در این امر ایفا می کند. نکته قابل توجه دیگری که در این تحقیق به دست آمده، این است که پس از گذشت دو ساعت از شروع پیش گرمایش، مکانیزم انتقال حرارت از حالت دوبعدی به حالت یک بعدی در جهت عمودی پنل گرمایش تغییر می کند. مطالعه عددی روی جریان هوا در یک محفظه بسته دوبعدی مجهز به سیستم گرمایش از کف توسط خراسانی زاده و همکاران [۷] انجام گرفت. در این تحقیق که به صورت حجم محدود انجام گرفته است، معادلات حاکم برای جریان غیر قابل تراکم آشفته با تشعشع ترکیب شده اند. نتیجه مهمی که در این تحقیق به دست آمده این است که ۷۴ درصد کل انتقال حرارت انجام یافته توسط سیستم گرمایش از کف به صورت تشعشع و مابقی از طریق جابه جایی است. ذکر این نکته لازم است که در پژوهش اشاره شده، دمای سطح پنل گرمایش ۲۹°C در نظر گرفته شده است. مقایسه عددی بین سیستم گرمایش از کف و سیستم گرمایش از

1. Airwasher
2. Zent
3. Phase Change Materials (PCM)
4. Computational Fluid Dynamics (CFD)

است. جدول (۱) خلاصه‌ای از مشخصات مصالح استفاده شده در پنل گرمایشی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): خلاصه‌ای از مشخصات مواد به کاررفته در پنل گرمایشی

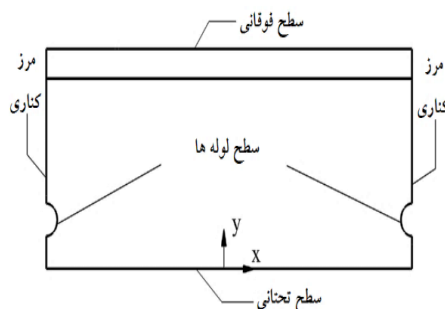
مصالح	ابعاد (mm)	K (W/m°C)
بتن (روی لوله‌ها)	۴۵	۱/۳
بتن (زیر لوله‌ها)	۱۰	۱/۳
ضخامت سرامیک	۱۰	۱/۰
قطر خارجی لوله پکس	۱۶	۰/۳۵
ضخامت پل گالوانیزه	۰/۵	۵۲
ضخامت پل آلومینیومی	۰/۵	۲۰۲/۴

در این جدول، k نشان‌دهنده قابلیت حرارتی است. لوله‌های پکس به کاررفته در این پژوهش، دارای ضخامت ۲ میلی مترند و فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها در این مطالعه عددی برابر مقدار ثابت ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر، مطالعه عددی روی چهار حالت مختلف شامل شرایط بدون پل (حالت اول)، با پل به طول $P/S=1/3$ (حالت دوم)، با پل به طول $P/S=2/3$ (حالت سوم) و با پل به طول $P/S=1$ (حالت چهارم) انجام گرفته که در هر سه حالت پل دارد. پل دقیقاً روی خط مرکزی دو لوله مجاور قرار گرفته است. در اینجا P طول پل فلزی است. مسئله برای چهار حالت ذکر شده با دو دمای مختلف سیال یعنی 40°C و 50°C بررسی شده است. این دو دما را می‌توان به عنوان دماهای رایج در سیستم گرمایش از کف مطابق استاندارد سیستم گرمایش از کف [۱۵] نامید. ذکر این نکته لازم است که به دلیل دبی قابل توجه سیال درون لوله، دمای متوسط سیال ورودی و خروجی به عنوان دمای جدار داخلی لوله مدنظر قرار گرفته است.

معادله حاکم بر مسئله هدایت پایای دوبعدی بدون منبع گرمایی می‌تواند با معادله زیر مدل سازی شود:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

که T ، x و y به ترتیب درجه حرارت، جهت افقی و جهت عمودی هستند. معادله (۱) با معرفی شرایط مرزی زیر در مرزهای سیستم نشان داده شده در شکل (۳) به صورت عددی حل می‌شود:

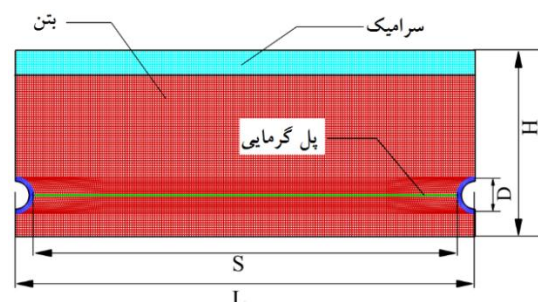


شکل (۳): مرزهای سیستم تحت مطالعه

دیوار توسط کارابای و همکاران [۸] انجام گرفته است. محاسبات که برای یک نقطه خاصی در کشور ترکیه انجام پذیرفته بر مبنای دماهای سیال واسطه (آب) 30°C ، 40°C و 50°C صورت گرفت. نویسندگان در این پژوهش نشان داده‌اند که اگرچه سیستم گرمایش از کف، توزیع دمای مناسب تری از سیستم گرمایش از دیوار دارد، سیستم گرمایش از دیوار نیز می‌بایست مورد توجه مهندسان قرار گیرد، زیرا اختلاف دمای ایجاد شده در این سیستم در فضای مورد مطالعه کمتر از 1°C است. زانگ و همکاران [۹] مطالعه عددی و آزمایشگاهی روی نقش دمای آب، فاصله لوله‌ها و ضخامت پوشش روی لوله‌ها انجام داده‌اند. نتایج به دست آمده مورد جدیدی را نسبت به پژوهش‌های مشابه قبلی ارائه نداده است. مورد مشابهی را در مطالعه انجام گرفته توسط لیو و همکاران [۱۰] مشاهده می‌شود. برخی از پژوهشگران [۱۱-۱۴] در سال‌های اخیر، بر ارائه مدل‌های ریاضی ساده شده برای محاسبات سیستم گرمایش از کف متمرکز شده‌اند که برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مراجع اشاره شده مراجعه کرد. نگاهی هرچند دقیق تر به کارهای انجام شده قبلی، حکایت از این دارد که تأثیر استفاده از پل‌های فلزی در بهبود عملکرد سیستم گرمایش از کف تاکنون بررسی نشده است. استفاده از پل‌های فلزی بسیار نازک با طول‌های محدود در میان فواید قابل توجهی که دارد، هرگز نمی‌تواند روند اجرای سیستم را مختل کرده و هزینه‌های قابل توجهی به سیستم وارد کند. لذا این مقاله با رویکرد بهبود مصرف انرژی و مدیریت آن به مطالعه عددی روی روش جدیدی برای بهبود راندمان سیستم گرمایش از کف می‌پردازد.

۲. هندسه و روش حل مسئله

شکل (۲) هندسه سیستم گرمایش از کف را در حالت دوبعدی نشان می‌دهد. انتخاب چنین هندسه دوبعدی به دلیل تقارن هندسی موجود در سیستم گرمایش از کف است که در اغلب تحقیقات قبلی انجام گرفته نیز مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، چون این پژوهش در حالت پایا بدون بررسی طول دوره پیش گرمایش انجام می‌گیرد می‌توان گفت که در این حالت مکانیزم انتقال حرارت یک بعدی در جهت عمود بر پنل گرمایشی خواهد بود [۶].



شکل (۲): هندسه دوبعدی سیستم گرمایش از کف در این پژوهش

همان طور که دیده می‌شود، پنل گرمایشی از مواد مختلفی تشکیل شده

به همراه شرایط مرزی (۲) تا (۶) برای ناحیه محاسباتی به روش حجم محدود ارزیابی شده است. معیار همگرایی در همه محاسبات براساس متغیر دما به صورت زیر است:

$$|T_{i+1} - T_i| < 10^{-11} \quad (۷)$$

برای راحتی، نتایج به دست آمده از حل معادله حاکم با استفاده از پارامترهای زیر بی بعد شده اند:

$$\theta = \frac{T - T_{conf.}}{T_w - T_{conf.}} \quad (۸)$$

که $X = \frac{x}{L}$ ، $Y = \frac{y}{H}$ ، θ ، H ، L و X و Y به ترتیب دمای بی بعد، فاصله مرکز تا مرکز لوله‌های مجاور (یا طول ناحیه محاسباتی)، ارتفاع پنل گرمایشی، طول بی بعد و ارتفاع بی بعد می باشند.

افزایش در راندمان گرمایی سیستم در حضور پل‌های گرمایی نسبت به حالت معمولی نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$TP(\%) = \frac{q'' - q''_o}{q''_o} \times 100 \quad (۹)$$

در این رابطه، TP ، q'' و q''_o به ترتیب افزایش در راندمان گرمایی پنل گرمایشی، شار خروجی از پنل با حضور پل‌های گرمایی و شار خروجی از پنل بدون حضور پل‌های گرمایی (حالت معمولی) هستند.

۳. استقلال نتایج از شبکه بندی

برای مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی، چهار شبکه بندی مختلف در هر مطالعه عددی بررسی شده است. شبکه بندی‌های انجام یافته به ترتیب دارای ۹۳۹۸، ۱۲۵۳۴، ۱۸۱۹۰ و ۲۸۳۲۳ تعداد حجم کنترل اند. بررسی نتایج نشان می دهد که نتایج به دست آمده از تعداد حجم کنترل به کاررفته در شبکه بندی مستقل اند. لذا برای تمام شبیه سازی‌های انجام یافته در این پژوهش، از شبکه بندی سوم دارای ۱۸۱۹۰ حجم کنترل استفاده شده است. شکل (۴) نمونه ای از استقلال نتایج از شبکه بندی برای حالت بدون پل (حالت اول) در دمای سیال 40°C و 50°C را نشان می دهد.

۴. اعتبارسنجی نتایج

برای اعتباربخشی به نتایج عددی به دست آمده از این پژوهش، نتایج برای حالت بدون پل با تحقیق انجام یافته توسط وانگ و همکاران [۶] مقایسه شده اند. جدول (۲) دمای متوسط سطح پنل گرمایشی و شار متوسط خروجی از آن را در دو دمای سیال 40°C و 50°C مقایسه می کند. مقایسه نتایج به دست آمده از دو پژوهش، حکایت از دقت

الف. در مرزهای کناری (Side surface)، به دلیل تقارن موجود در هندسه، از شرط مرزی نیومن^۱ به صورت زیر استفاده شده است [۶ و ۱۳]:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=-L/2} = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L/2} = 0 \quad (۲)$$

ب. در سطوح داخلی لوله ها (Tube surface) از شرط مرزی دیریکله^۲ به صورت زیر استفاده شده است [۶ و ۱۳]:

$$T_{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=R^2} = T_w \quad (۳)$$

$$T_{(x+x_0)^2+(y-y_0)^2=R^2} = T_w \quad (۴)$$

که $(\pm x_0, y_0)$ مختصات مرکز لوله ها و R و T_w به ترتیب شعاع داخلی لوله و دمای متوسط سیال هستند. ذکر این توضیح لازم است که در اکثر کارهای قبلی، دمای متوسط سیال به عنوان دمای سطح داخلی لوله ها در نظر گرفته شده است. به همین دلیل، از این فرض در این مقاله نیز استفاده شده است.

پ. در سطح پایینی پنل گرمایشی (Lower surface) نیز که می بایست در اجرا عایق گذاری شود، از شرط مرزی نوع دوم به صورت زیر استفاده شده است [۴، ۶ و ۱۳]:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = 0 \quad (۵)$$

ت. در نهایت، در سطح فوقانی (Upper surface) از شرط مرزی نوع سوم به صورت زیر استفاده شده است [۴، ۶ و ۱۳]:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{y=H} = h_t \cdot (T - T_{conf.}) \quad (۶)$$

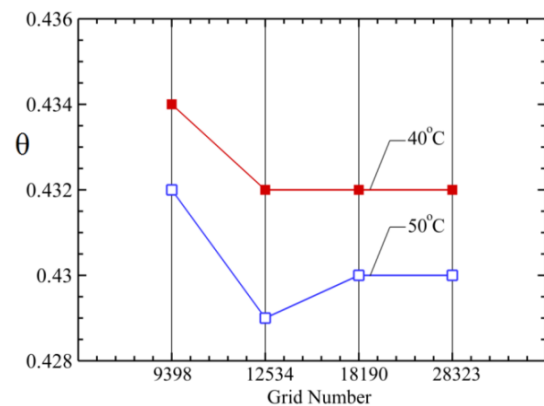
که h_t و $T_{conf.}$ به ترتیب مجموع ضرایب انتقال گرمای جابه جایی و تشعشع و دمای آسایش فضا هستند. دمای آسایش فضا ($T_{conf.}$) در این مطالعه برابر مقدار ثابت 20°C در نظر گرفته شده است [۱۶] و برای ضریب انتقال گرمای معادل در سطح فوقانی از اطلاعات استاندارد سیستم های گرمایش از کف استفاده شده که عددی مابین 6 و $10/8 \text{ W/m}^2\text{C}$ است [۱۵].

نکته قابل ذکر این است که شرایط مرزی در نظر گرفته شده در این مقاله، دقیقاً مطابق بر شرایط مرزی لحاظ شده در پژوهش های قبلی است. به عبارت دیگر، در این پژوهش در ارتباط با شرایط مرزی موجود در سیستم های گرمایش از کف هیچ تغییری داده نشده است.

ث. در محل اتصال پل های فلزی به لوله ها (در حالت $P/S=1$) فرض تعادل دمایی لحاظ شده است.

معادله (۱) با استفاده از روش بالادست مرتبه دوم گسسته شده و

بالای حل عددی در این پژوهش دارد.



شکل (۴): نمونه‌ای از استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای حالت بدون پل در دو دمای سیال 40°C و 50°C

جدول (۲): مقایسه نتایج عددی حاصل از این پژوهش با نتایج کار وانگ و همکاران [۶]

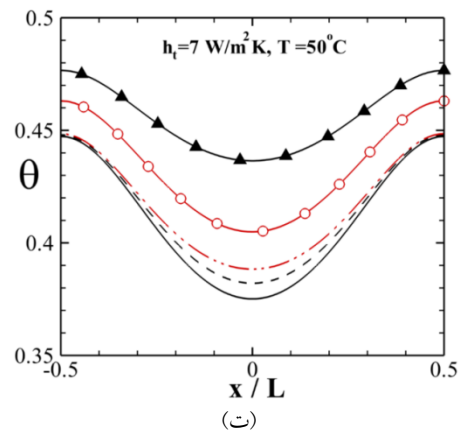
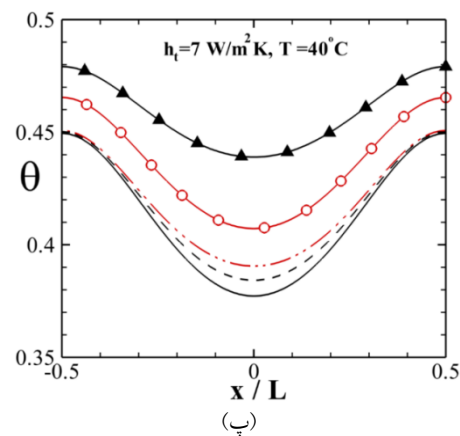
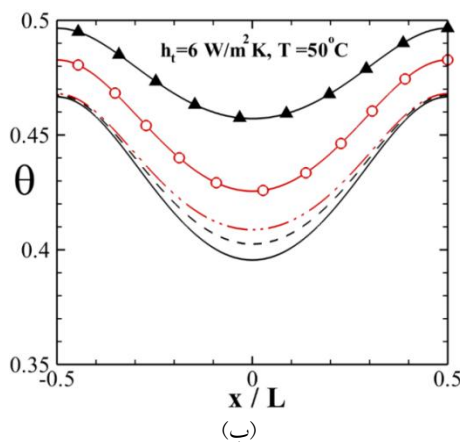
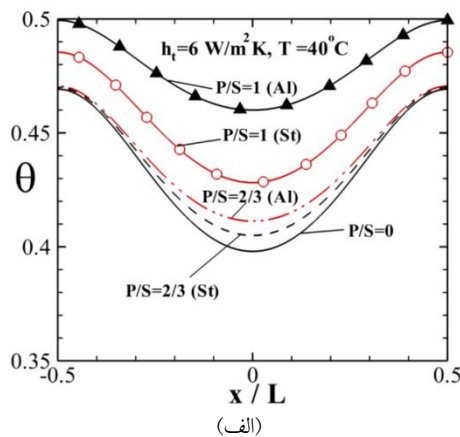
دمای سیال ($^{\circ}\text{C}$)	دمای متوسط سطح پنل ($^{\circ}\text{C}$)		شار خروجی از پنل (W/m^2)	
	۴۰	۵۰	۴۰	۵۰
وانگ و همکاران [۶]	۳۵/۴	۲۹/۷	۱۸۴/۳	۱۳۰/۱
پژوهش حاضر	۳۵/۴	۳۰/۰	۱۸۹/۵	۱۲۹/۴

۵. نتایج و بحث

هدف اصلی از به‌کارگیری پل‌های فلزی درون پنل گرمایشی بهبود توزیع دما از نظر مقدار و نحوه توزیع آن روی سطح پنل است. برای این منظور شکل‌های (۵) و (۶) برای بررسی موارد ذکر شده استخراج شده‌اند. درواقع این شکل‌ها توزیع دمای بی‌بعد در طول سطح پنل گرمایشی را با استفاده از پل‌های فلزی با طول‌های مختلف ارائه کرده و با حالت بدون پل مقایسه می‌کنند.

همان‌طوری که مشاهده می‌شود استفاده از پل‌های فلزی چه گالوانیزه و چه آلومینیوم، منجر به افزایش دمای سطح پنل در حالت کلی نسبت به حالت ساده بدون پل می‌شود. دلیل این رخداد قابلیت هدایتی بالای آلومینیوم و گالوانیزه نسبت به بتن است که منجر به نفوذ گرمای بیشتری به فضای بین دو لوله می‌شود.

افزایش طول پل از $P/S=2/3$ تا $P/S=1$ منجر به افزایش دما به مقدار بیشتر روی سطح پنل می‌شود. اساساً استفاده از پل به طول $P/S=1/3$ چه گالوانیزه و چه آلومینیوم، تأثیر کمی روی بهبود عملکرد سیستم گرمایش از کف خواهد داشت. به همین دلیل، این مقدار در نمودارهای شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده نشده است. بنابراین، می‌توان گفت که عملکرد پنل گرمایی با طول پل‌های قرارگرفته در میان فضای خالی بین لوله‌ها نسبت مستقیم دارد.



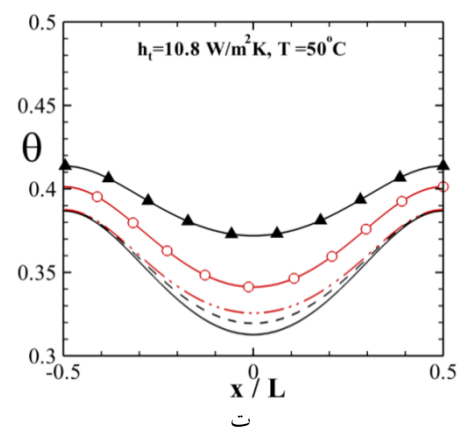
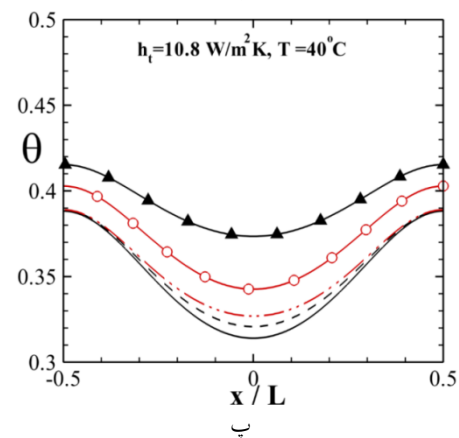
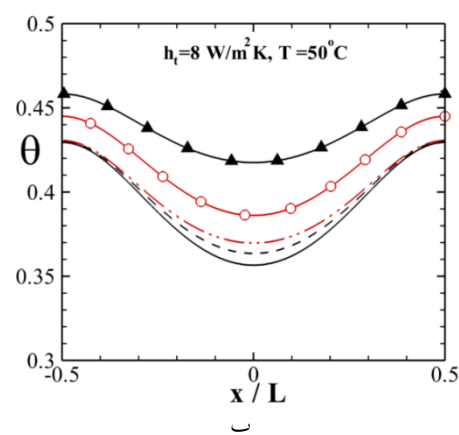
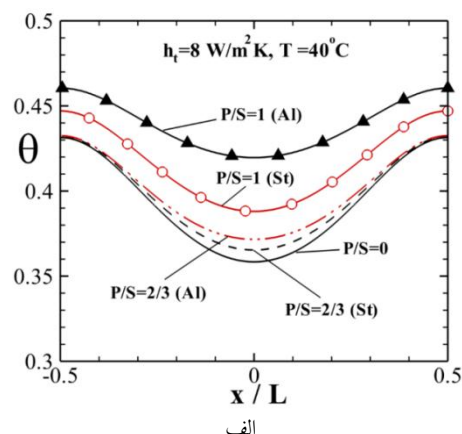
شکل (۵): توزیع دما بی‌بعد سطح پنل گرمایشی با حضور پل‌های گالوانیزه (St) و آلومینیوم (Al)

در مقایسه با حالت بدون پل (حالت اول)، به ازای طول پل فلزی و دمای سیال مشخصی، پل آلومینیوم به دلیل قابلیت هدایت حرارتی بالاتر نسبت به پل گالوانیزه مقدار بیشتری از دمای سطح پنل را به خود اختصاص داده است و موجب بهبود بیشتر عملکرد سیستم گرمایش از کف می شود. از طرف دیگر، میزان نوسان دمایی بین دو لوله با به کارگیری پل های فلزی متناسب با طول پل کاهش می یابد که موجب توزیع دمای بهتر در فضای مورد نظر بالای پل می شود. به عبارت دیگر، کاهش نوسانات دمایی بین دو لوله باعث یکنواخت تر شدن دمای بین دو لوله می شود که این میزان یکنواختی دما در فضای بین دو لوله، با توجه به شکل های (۵) و (۶) مشاهده می شود، با افزایش طول پل فلزی بیشتر می شود.

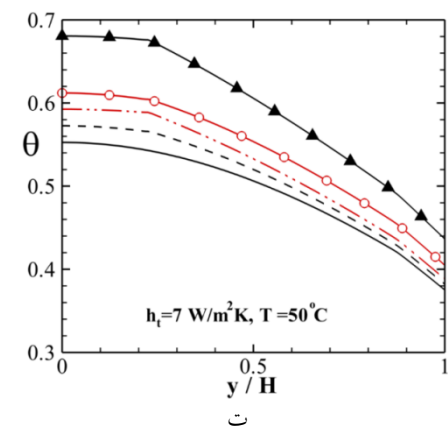
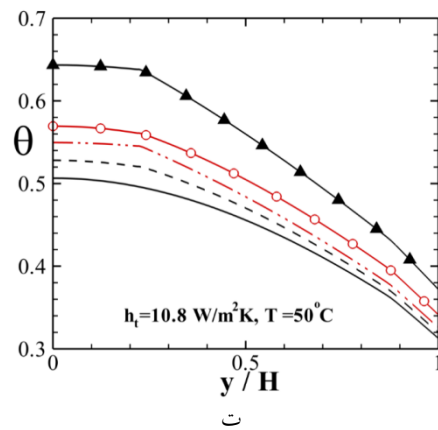
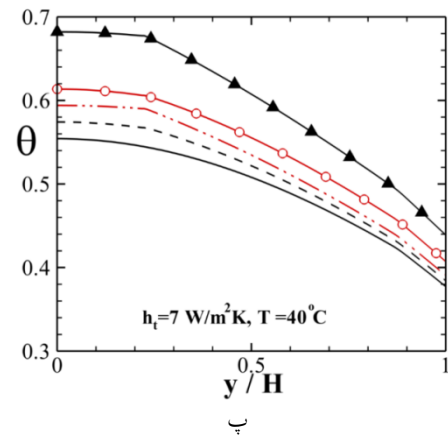
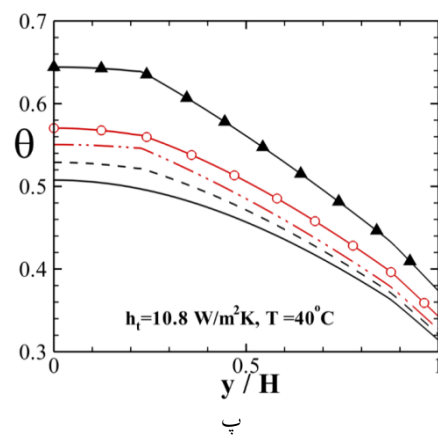
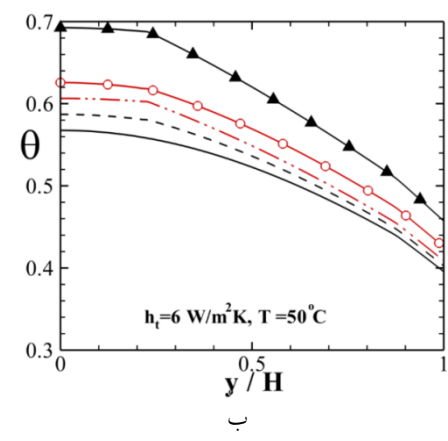
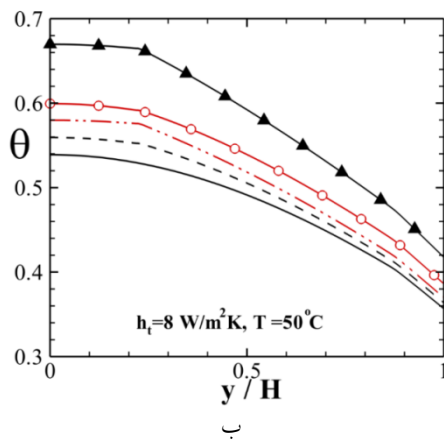
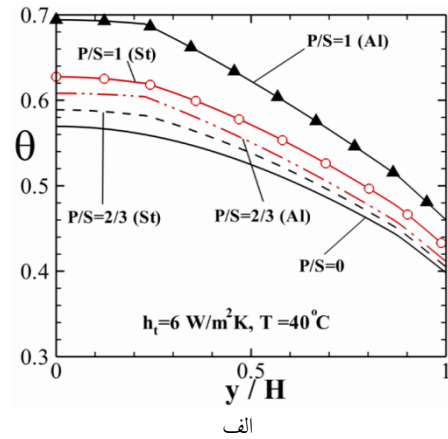
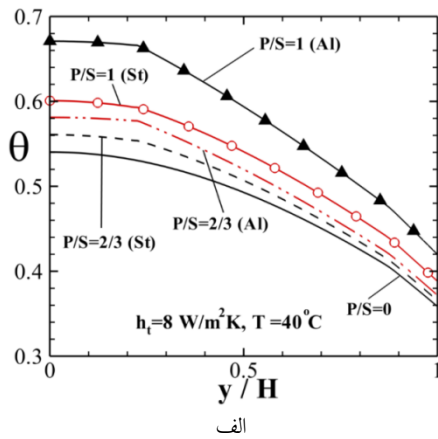
نکته دیگری که از شکل های (۵) و (۶) به دست می آید، این است که با افزایش ضریب تبادل گرمایی بین پنل گرمایشی و هوای بالای آن، از میزان دمای سطح پنل کاسته می شود. دلیل چنین اتفاقی را می توان از قانون سرمایش نیوتن و قانون استفان - بولتزمن جستجو کرد به این معنی که به ازای مقدار معینی از تبادل گرمایی بین پنل گرمایشی و هوای بالای آن، در صورت افزایش ضریب تبادل گرمایی کل جابه جایی و تشعشعی مقدار اختلاف دمای بین سطح پنل و هوای فوقانی آن کاهش می یابد.

شکل های (۷) و (۸) توزیع دمای بی بعد درون پنل گرمایشی روی خط عمودی گذرنده از مرکز پنل برای دو حالت بدون پل و با پل گالوانیزه و آلومینیوم به طول های $P/S=1$ و $P/S=2/3$ به ازای دو دمای سیال 40°C و 50°C را نشان می دهند.

جای گذاری ورق های بسیار نازک (0.5 میلی متر) درون پل گرمایی در حد فاصل بین لوله ها تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد سیستم گرمایش از کف و گرمای خروجی از آن دارد. همان گونه که در شکل (۹) دیده می شود، سیستم گرمایش از کف دارای گرمای خروجی بسیار بیشتری در حضور پل های فلزی نسبت به حالت بدون پل دارد. این نتیجه می تواند طراحی سیستم گرمایش از کف را دگرگون سازد؛ زیرا با قرارگیری پل ها درون پنل به ازای یک شار گرمای خروجی مشخص، مقدار لوله به کاررفته در سیستم و دمای سیال کاری درون لوله ها می تواند کاهش یابد. کاهش لوله ها کاهش هزینه های اجرای سیستم و کاهش دمای سیال کاری افزایش عمر منبع گرمایی و کاهش هزینه سوخت مصرفی را نتیجه خواهد داد. نکته دیگر رابطه بین شار گرمای خروجی از پنل گرمایی با طول پل فلزی است. همان طوری که قابل مشاهده است، با افزایش طول پل (چه آلومینیوم و چه گالوانیزه)، شار گرمای خروجی از سیستم به طور تدریجی کاهش می یابد، اما در $P/S=1$ شاهد پرش ناگهانی در میزان شار گرمای خروجی از پنل خواهیم بود. از سوی دیگر، تفاوت چشمگیری در شار گرمای خروجی در طول های کوچک تر پل های فلزی بین پل آلومینیوم و پل فلزی مشاهده نمی شود. اما در حالت $P/S=1$ تفاوتی برابر با 6.05% در شار گرمای به دست آمده از این دو نوع پل مشاهده می شود.

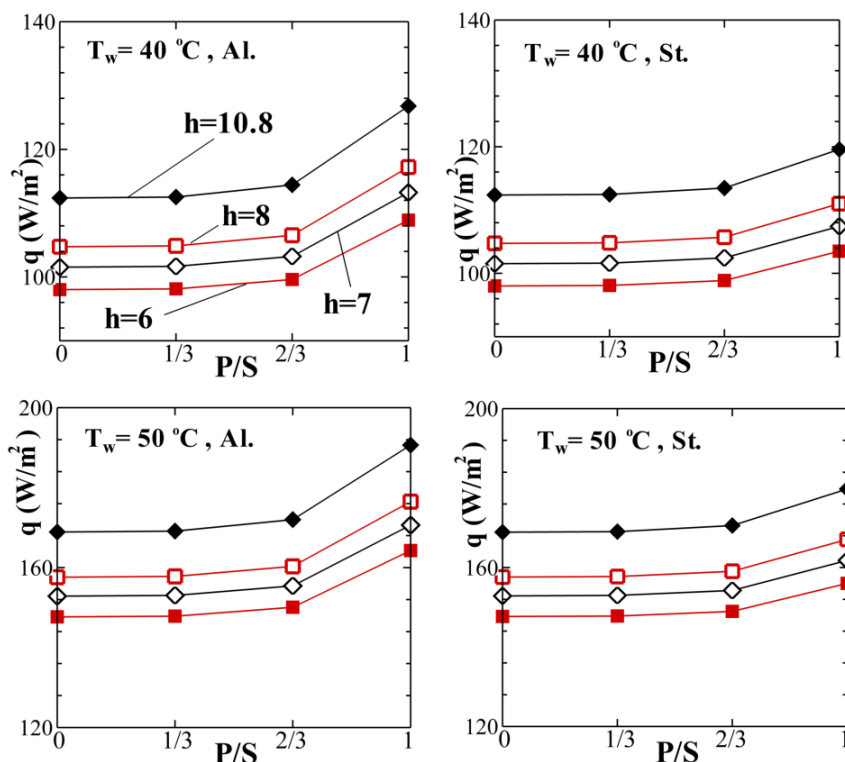


شکل (۶): توزیع دما بی بعدی بعد سطح پنل گرمایشی با حضور پل های گالوانیزه (St) و آلومینیوم (Al)

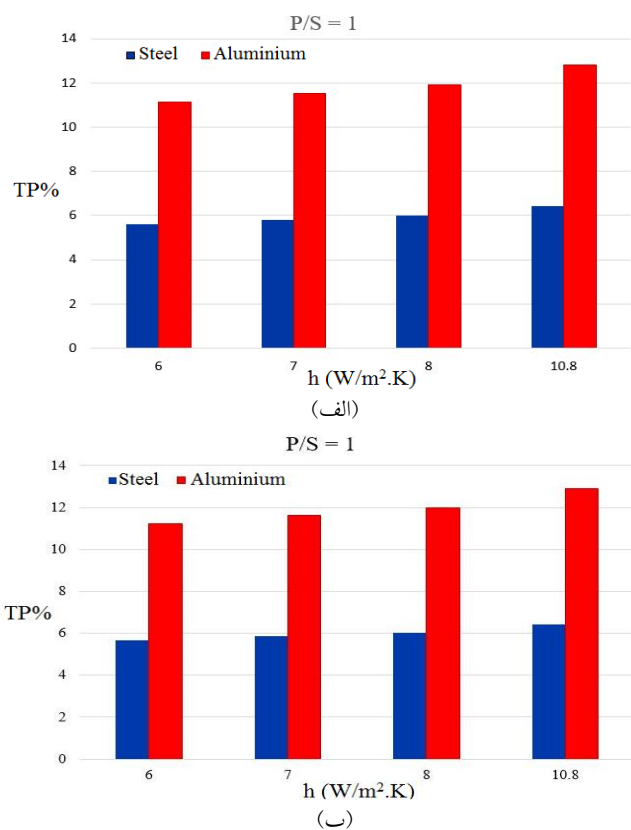


شکل (۸): توزیع دمای بی‌بعد روی خط عمودی گذرنده از مرکز پیل گرمایشی با حضور پل‌های گالوانیزه (St) و آلومینیوم (Al)

شکل (۷): توزیع دمای بی‌بعد روی خط عمودی گذرنده از مرکز پیل گرمایشی با حضور پل‌های گالوانیزه (St) و آلومینیوم (Al)



شکل (۹): مقایسه شار گرمای خروجی از پنل گرمایشی با حضور پل‌های گالوانیزه (St) و آلومینیوم (Al) با حالت بدون پل به‌ازای ضریب تبادل گرمای کل مختلف در دمای سیال $T_w = 40^\circ\text{C}$ و $T_w = 50^\circ\text{C}$



شکل (۱۰): افزایش راندمان گرمایی سیستم گرمایش از کف با حضور پل‌های گرمایی به طول $P/S=1$ نسبت به حالت بدون پل
(الف) $T_w = 40^\circ\text{C}$ و (ب) $T_w = 50^\circ\text{C}$

شکل‌های (۱۰ الف) و (ب)) درصد افزایش راندمان گرمایی سیستم گرمایش از کف را با حضور پل‌های گرمایی نسبت به حالت معمولی در دو حالت دمای سیال 40°C و 50°C و طول پل $P/S=1$ نشان می‌دهد. به‌طور واضح مشاهده می‌شود که تفاوت فاحشی بین پل‌های گالوانیزه و آلومینیومی به‌میزان حداکثر $6/45\%$ درصد وجود دارد. اگرچه حضور هر دو نوع پل آلومینیومی و گالوانیزه منجر به افزایش راندمان گرمایی سیستم گرمایش از کف می‌شود، لیکن پل آلومینیومی به‌دلیل داشتن قابلیت هدایت حرارتی بیشتر نسبت به پل گالوانیزه، منجر به نفوذ گرمای بیشتری در فواصل بین لوله‌ها شده و موجبات افزایش راندمان گرمایی بیشتری می‌شود. همان‌طور که از شکل‌های (۱۰ الف) و (ب)) مشخص است، قرار دادن پل‌های گرمایی از جنس آلومینیومی و گالوانیزه به‌ترتیب منجر به افزایش راندمان گرمایی حداکثر $12/82\%$ درصد و $6/41\%$ درصد در 40°C و $12/88\%$ درصد و $6/43\%$ درصد در 50°C می‌شود.

۶. نتیجه گیری

سطح پنل و هوای بالای آن با افزایش طول پل، افزایش می یابد. از طرف دیگر، پنل گرمایشی مجهز به پل فلزی دارای دمای متوسط حجمی بالاتری است که زمان دشارژ شدن بیشتری نسبت به پنل بدون پل فلزی خواهد داشت. به علاوه، استفاده از پل آلومینیوم بهبود سیستم گرمایش از کف بیشتری را نسبت به پل گالوانیزه نتیجه می دهد. لذا می توان با نصب پل های فلزی بسیار نازک در میان لوله ها عملکرد سیستم گرمایش از کف را به میزان حداکثر ۱۲/۸۲ درصد و ۶/۴۱ درصد در 40°C و ۱۲/۸۸ درصد و ۶/۴۳ درصد در 50°C بهبود بخشید.

در این پژوهش، عملکرد سیستم گرمایش از کف در حضور پل های فلزی از جنس گالوانیزه و آلومینیوم به طول های مختلف ۱ و ۲/۳، $P/S=1/3$ به ازای مقادیر ضرایب تبادل گرمای کل ۶، ۷، ۸ و $10/8 \text{ W/m}^2\text{C}$ بررسی و با حالت بدون پل مقایسه شدند. نتایج مختلفی از این پژوهش به دست آمد. برای مثال، با جایگذاری پل های فلزی در حد فاصل بین دو لوله مجاور، دمای سطح پنل گرمایشی و به تبع آن میزان گرمای خروجی از سیستم گرمایش از کف به میزان قابل توجهی افزایش می یابد؛ این افزایش در فرایند تبادل گرما بین

مراجع

- [1] The COUTA group. Heat Pex Radiant Heating Systems, <http://www.heatpex.com.au>.
- [2] Zhou, G., He, J., "Thermal Performance of a Radiant Floor Heating System with Different Heat Storage Materials and Heating Pipes", Applied Energy, Vol. 138, pp. 648-660, 2016.
- [3] Xia, Y., Zhang, X., "Experimental Research on a Double-layer Radiant Floor System with Phase Change Material under Heating Mode", Applied Thermal Engineering, Vol. 15, pp. 1359-4311, 2015.
- [4] Huang, K., Feng, G., Zhang, J., "Experimental and Numerical Study on Phase Change Material Floor in Solar Water Heating System with a New Design", Solar Energy, Vol. 105, pp.126-138, 2014.
- [5] Fontana, L., "Thermal Performance of Radiant Heating Floors in Furnished Enclosed Spaces", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, pp.1547-1555, 2011.
- [6] Wang, D., Liu, Y., Wang, Y., Liu, J., "Numerical and Experimental Analysis of Floor Heat Storage and Release during an Intermittent In-Slab Floor Heating Process", Applied Thermal Engineering, Vol. 62, pp. 398-406, 2014.
- [7] Khorasanizadeh, H., Sheikhzadeh, G.A., Azemati, A.A., Shirkavand Hadavand, B., "Numerical Study of Air Flow and Heat Transfer in a Two-Dimensional Enclosure with Floor Heating", Energy and Buildings, Vol. 78, pp. 98-104, 2014.
- [8] Karabay, H., Arici, M., Sandik, M., "A Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer inside a Room for Floor Heating and Wall Heating Systems", Energy and Buildings, Vol. 67, pp. 471-478, 2013.
- [9] Zhang, D., Cai, N., Wang, Z., "Experimental and Numerical Analysis of Lightweight Radiant Floor Heating System", Energy and Buildings, Vol. 61, pp 260-266, 2013.
- [10] Liu, Y., Wang, D., Liu, J., "Study on Heat Transfer Process for In-Slab Heating Floor", Building and Environment, Vol. 54, pp.77-85, 2012.
- [11] Wu, X., Olesen, B., Fang, L., Zhao, J., "A Nodal Model to Predict Vertical Temperature Distribution in a Room with Floor Heating and Displacement Ventilation", Building and Environment, Vol. 59, pp. 626-634, 2013.
- [12] Shin, M., Rhee, K., Ryu, S., Yeo, M., Kim, K., "Design of Radiant Floor Heating Panel in View of Floor Surface Temperatures", Building and Environment, Vol. 92, pp. 559-577, 2015.
- [13] Zhang, L., Liu, X., Jiang, Y., "Simplified Calculation for Cooling/Heating Capacity, Surface Temperature Distribution of Radiant Floor", Energy and Buildings, Vol. 55, pp. 397-404, 2012.
- [14] Wu, X., Zhao, J., Olesen, B., Fang, L., Wang, F., "A new Simplified Model to Calculate Surface Temperature and Heat Transfer of Radiant Floor Heating and Cooling Systems", Energy and Buildings, Vol. 105, pp. 285-293, 2015.
- [15] European Standard, "EUROPÄISCHE NORM Heating Systems in Buildings - Design of Embedded Water based Surface Heating and Cooling Systems - Part 1 :

Determination of the Design Heating and Cooling Capacity", pp. 1–70, 2005. [16] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta GA, 2009.