



## تحلیل یک سیستم کمکی گرمایش از کف و آب گرم خانگی با استفاده انرژی خورشیدی در مناطق سردسیر

مهدی اسدی<sup>۱</sup>، امیرموسی ابادری<sup>۲\*</sup>، امین حسنونند<sup>۳</sup>

۱- دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
۳- گروه مهندسی مکانیک و پلیمر، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰

### کلمات کلیدی:

گرمایش از کف  
انرژی خورشیدی  
سیستم‌های حرارتی خورشیدی  
آبگرمکن‌های خورشیدی  
کلکتورهای خورشیدی

**خلاصه:** امروزه افزایش جمعیت و مصرف انرژی به خصوص تجدیدناپذیرها رشد قابل توجهی دارند. انتظار می‌رود با ارتقا سطح آگاهی مردم درباره ضرورت مصرف بهینه انرژی، انتخاب روش و تجهیزاتی که موجب مصرف کمتر انرژی ساختمان شود، بیشتر مورد استقبال قرار بگیرد. در میان سیستم‌های گرمایشی، سیستم گرمایش از کف می‌تواند با وجود ایجاد گرمای یکنواخت در همه نقاط ساختمان، مصرف سوخت را به سبب پایین‌تر بودن دمای کاری کاهش دهد. از سوی دیگر، در کشور ایران که از پتانسیل بالای انرژی خورشیدی برخوردار است، این امکان وجود دارد با ترکیب سیستم‌های گرمایش از کف و حرارتی خورشیدی بتوان با وجود کاهش مصرف سوخت فسیلی، گرمای مطلوبی در ساختمان، فراهم کرد. از اینرو در تحقیق حاضر، یک سیستم گرمایش از کف ترکیبی شامل یک سیستم حرارتی خورشیدی در کنار یک دیگ آب گرم برای گرمایش یک ساختمان در اقلیم سردسیر ایران طراحی و شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم گرمایش خورشیدی طراحی شده در این تحقیق می‌تواند به تنهایی ۹۸/۵ درصد از کل انرژی لازم برای تهیه آب‌گرم مصرفی ساختمان و ۱۷/۳ درصد از کل انرژی لازم برای گرمایش از کف را تأمین کند. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم گرمایشی ارائه شده برای تأمین انرژی ساختمان در اقلیم سرد ایران بسیار مفید بوده و می‌تواند به مقدار قابل توجهی مصرف سوخت فسیلی را کاهش دهد.

### ۱- مقدمه

انرژی در صنعت، اقتصاد، کشاورزی و حمل و نقل هر کشور نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. اهمیت انکارناپذیر انرژی باعث شده تا مصرف انرژی، شاخص مهمی در توسعه اقتصادی هر کشور محسوب شود. سهم مصرف انرژی در بخش خانگی ایران، حدود ۲۷٪ از کل انرژی مصرفی ایران است که در مقایسه با کل جهان، ۶٪ بیشتر است [۱]. برای کاهش مصرف انرژی در بخش خانگی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به پتانسیل موجود در کشور پیشنهاد می‌شود. انرژی خورشیدی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیری است که در کشور، پتانسیل خوبی برای تولید دارد؛ چرا که ۳۰۰ روز از سال در کشور، آفتابی است [۲]. راهکار دیگری که برای کاهش مصرف انرژی در بخش خانگی می‌توان ارائه داد، بهینه‌سازی ساختمان‌های بخش مسکونی با تنظیم مقررات ساختمانی است. مطالعات [۳] نشان می‌دهد که با وجود شرایط مناسب ساخت و عایق‌کاری ساختمان، باز هم می‌توان مصرف انرژی آن را به میزان قابل توجهی کاهش داد. در تحقیق حاضر، یک سیستم

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: am.abazari@urmia.ac.ir

گرمایش از کف خورشیدی برای گرمایش یک ساختمان در اقلیم سردسیر ایران طراحی شده است.

### ۱-۱- گرمایش از کف

سیستم‌های گرمایش از کف به دلیل مزایای منحصر به فردی که دارند، در صورت‌ها و شکل‌های مختلف در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما استفاده از این سیستم‌ها به دوران معاصر محدود نبوده و گرمایش کفی برای اولین بار حدود ۶۰ سال بعد از میلاد مسیح در روم باستان مورد استفاده قرار گرفته است. رومیان با سوزاندن چوب و ایجاد گازهای مشتعل و عبور دادن این گازها از کانال‌های هوایی موجود در کف ساختمان، اقدام به گرم کردن منازل خود می‌کردند [۴]. امروزه کشورهای اروپایی در صدر استفاده از این سیستم‌ها هستند؛ بطوری که در کشور فرانسه، گرمایش از کف ۴۰ تا ۵۰ درصد از کل سیستم‌های گرمایشی را به خود اختصاص می‌دهد. این رقم برای کشور آلمان بین ۵۰ تا ۶۰ درصد است. حتی در کشورهای سوئیس و سوئد، این رقم به مقادیر بیشتری می‌رسد. در کشورهای

اسکاندیناوی این رقم حدوداً ۸۰ درصد است. در مقابل، این نسبت در بریتانیا برابر ۲ درصد است که به سرعت در حال افزایش می‌باشد [۴].

عملکرد سیستم گرمایش از کف به این صورت است که با گذر سیال عامل (در اکثر مواقع آب یا هوا) از لوله‌های موجود در زیر کف ساختمان، حرارت به داخل ساختمان انتقال می‌یابد. این انتقال حرارت از کف، باعث ایجاد گردش مناسب هوا شده و در نتیجه این امکان را فراهم می‌سازد تا گرمای همگن مطلوبی در تمام محیط ساختمان ایجاد شود [۵]. در این سیستم گرمایشی، عموماً دمای آب گرم موجود در لوله‌های کف بین ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس است که این مقدار برای سایر روش‌های گرمایشی، بین ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس می‌باشد و موجب صرفه‌جویی بسیاری در مصرف انرژی می‌شود [۶]. دمای پایین مورد نیاز سیستم گرمایش از کف، این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان از انرژی‌های پاک مانند انرژی خورشیدی برای گرمایش کف استفاده نمود. عملکرد سیستم گرمایش از کف خورشیدی به این صورت است که سیال (عموماً آب)، ابتدا با گذر از گردآورنده تخت، گرم شده؛ سپس، جهت تبادل حرارت خود به مبدل حرارتی انتقال داده می‌شود. در آنجا حرارت را به سیال عاملی که قرار است عمل گرمایش از کف را انجام دهد، انتقال می‌دهد. برای گردش سیال در چرخه گردآورنده که در بام ساختمان نصب می‌شود، از یک پمپ استفاده می‌شود. مبدل مورد استفاده در این سیستم عموماً یک منبع کوئلی می‌باشد؛ چون در این صورت می‌توان انرژی خورشید را در یک مخزن ذخیره کرده و در طول شب که دیگر خورشید تابشی ندارد، عمل گرمایش را همچنان ادامه داد. در برخی موارد به خصوص مدتی از سال که هوا ابری یا بارانی است، در صورت نیاز به گرمایش بیشتر، دیگ آب گرم یا پمپ حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً جهت اجرای سیستم‌های گرمایش از کف، از لوله‌های پنج لایه در کف ساختمان استفاده می‌شود. این لوله‌ها از دو لایه مواد پکس (پلی‌اتیلن شبکه‌ای شده) در داخل و خارج لوله و یک لایه ورق آلومینیم با ضخامت ۲۰۰-۷۰۰ میکرون تشکیل شده‌اند و به وسیله دو لایه چسب به لایه‌های پکس متصل می‌شوند. پکس نوعی مواد پلیمری هستند که با ایجاد اتصال عرضی پلیمری به دست می‌آید. اتصال عرضی یک فرآیند شیمیایی است که طی آن یک زنجیر بسپار به صورت اشتراکی به زنجیر بسپار دیگر وصل می‌شود [۷].

#### ۱-۲- انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی، یک انرژی پاک تجدیدپذیر است. در میان همه

انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به ساده‌ترین شکل قابل برداشت می‌باشد [۸]. امروزه، انرژی خورشیدی به دو صورت اصلی استخراج می‌شود: ۱- استخراج توان فتوولتائیک و ۲- بکارگیری انرژی گرمایی خورشید [۹]. سیستم‌های فتوولتائیک، انرژی تابشی خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. هدف در گرمایش از کف، گرمایش سیال عامل است؛ نه تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی. بطور کلی، گرمایش خورشیدی به دو صورت اکتیو و پسیو انجام می‌شود. در طراحی پسیو، معماری ساختمان تعیین‌کننده میزان دریافت انرژی از طریق خورشید است. پنجره‌ها، دیوارها و طبقات به گونه‌ای ساخته می‌شوند تا انرژی خورشید را به صورت گرما در زمستان جمع‌آوری، ذخیره و توزیع کنند و گرمای تابستان را نپذیرند. در طراحی پسیو، برخلاف سیستم‌های گرمایشی خورشیدی اکتیو، از ماشین‌ها و دستگاه‌های الکتریکی استفاده نمی‌شود. در مقابل، در طراحی اکتیو، جذب انرژی خورشید نیازمند استفاده از یک منبع انرژی دیگر برای انتقال گرما است. تمام آنچه که سیستم‌های گرمایش خورشیدی اکتیو باید انجام بدهند، جذب انرژی خورشید توسط کلکتورهای خورشیدی، انتقال گرما از کلکتور به سیال عامل، انتقال سیال عامل به مبدل‌های حرارتی و نهایتاً استفاده از گرمای آن است [۱۰].

گردآورنده‌های خورشیدی تخت، ساده‌ترین و متداول‌ترین وسیله برای تبدیل انرژی تابشی خورشید به گرمای مفید است. با طراحی صحیح یک گردآورنده تخت عادی، می‌توان دمای سیال خروجی از آن را تا حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس رساند [۱۱]. گردآورنده‌های تخت را معمولاً به طور ثابت نصب می‌کنند و به همین جهت دارای مشکلات مربوط به سیستم‌های دنبال‌کننده خورشیدی که در کلکتورهای متمرکزکننده کاربرد بسیاری دارند، نمی‌باشند. در مقابل، نوع دیگر کلکتورهای خورشیدی، کلکتورهای متمرکزکننده هستند که تابش نور خورشید و بخشی از تابش‌های پراکنده را با کمک طراحی‌های هندسی پیشرفته سطوح متمرکزکننده، متمرکز می‌کند تا به درجه حرارت بالایی دست بیابد. این کلکتورها جهت متمرکز کردن هر چه بهتر نور، بر خلاف کلکتورهای تخت، باید در طول روز نور خورشید را دنبال کنند؛ در غیر این صورت، فقط در ساعتی از روز که خورشید مستقیماً به آن‌ها می‌تابد، دارای بهترین عملکرد خواهند بود [۱۲]. از اینرو در تحقیق حاضر، از گرمایش خورشیدی اکتیو با کلکتورهای خورشیدی تخت، برای سیال عامل آب استفاده شده است.

با وجود همه مزیت‌های ذکر شده، پایدار و اشجاری‌ا قدم [۱۳] در مطالعه خود نشان دادند که کلکتورهای تخت، به تنهایی قادر به برطرف کردن نیاز

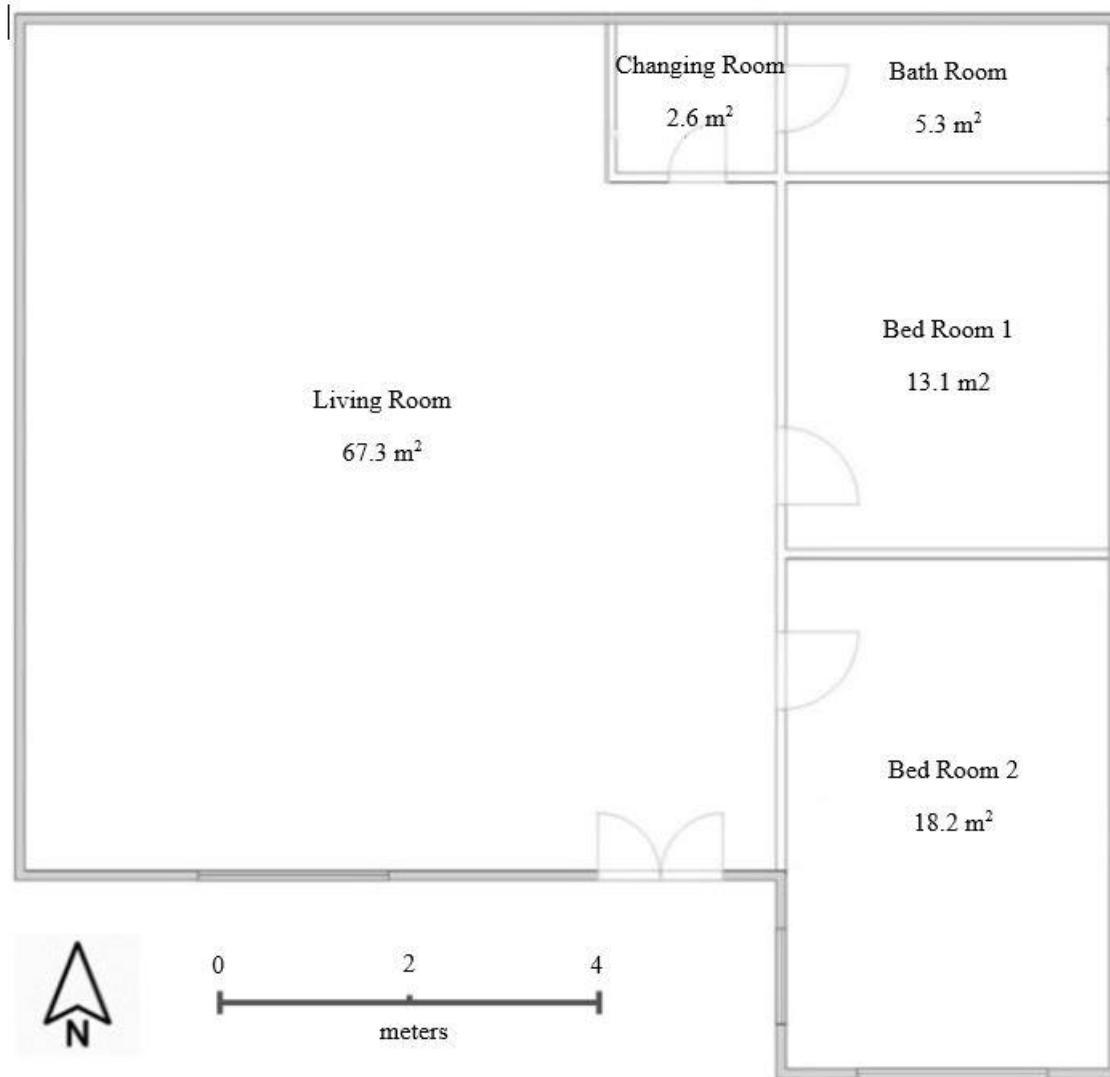
فوتولتاییک را تا ۵۰ درصد کاهش داد و دمای سیال خروجی را تا بیش از دو برابر افزایش داد. البته باید توجه داشت که در استفاده از مواد مختلف، باید جنبه اقتصادی نیز مورد مطالعه قرار بگیرد؛ چرا که بالا بودن قیمت مواد، باعث افزایش هزینه هم‌تراز انرژی تولیدی و کاهش مدت زمان بازگشت سرمایه خواهد شد. علاوه بر این، در مطالعات انجام شده، از انواع مختلف کلکتورهای خورشیدی نیز استفاده شده است. طالبی‌زاده و همکاران [۱۶] در مطالعه‌ای، گردآورنده خورشیدی متمرکزکننده را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج نشان داد که متمرکزکننده، با مساحت تقریبی  $2/7$  مترمربع، قادر خواهد بود تا  $9/82$  برابر تابش دریافتی در سطح افق، در نقطه کانونی انرژی بیشتری بتابد. در مطالعه‌ای دیگر، به مونسو و جعفر کاظمی [۱۷] در سال ۱۴۰۰، به مقایسه عملکرد الکتریکی و حرارتی طرح‌های مختلفی از کلکتور ترکیبی فوتولتاییک حرارتی پرداختند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که طرح ورق و لوله با مقطع گرد، کمترین و مقطع مستطیلی، دارای بیشترین راندمان حرارتی و کل است. بعلاوه، وجود پوشش شیشه‌ای، راندمان الکتریکی را کاهش و راندمان حرارتی و انرژی حرارتی کل را افزایش می‌دهد.

در تحقیق حاضر، یک سیستم گرمایش از کف ترکیبی برای گرمایش یک ساختمان در اقلیم سردسیر ایران (ارومیه) با سیال عامل آب، طراحی و مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. این سیستم گرمایش از کف شامل یک سیستم حرارتی خورشیدی به عنوان کمک‌کننده و یک دیگ آب گرم است. جهت محاسبه بار حرارتی ساختمان، از نرم‌افزار لوپکد<sup>۱</sup> استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار، نقشه و شمای گرافیکی از نحوه پیاده‌سازی نقشه سیستم گرمایش از کف و محاسبات مربوط به دست آورده شده است. این موضوع، دید بصری مناسبی قبل از شروع عملیات واقعی ساخت، به مهندسين می‌دهد [۱۸]. در نهایت، داده‌های مربوط به بار حرارتی ساختمان، بعنوان ورودی در نرم‌افزار تیسول<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده و با استفاده از این نرم‌افزار سیستم پیشنهاد شده برای بخش گرمایش از کف خورشیدی شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که نرم‌افزار تیسول این امکان را فراهم می‌سازد تا عملکرد یک سیستم حرارتی خورشیدی را به صورت کاملاً پویا طی چرخه‌ای یکساله و با دقت بالایی طراحی و بهینه‌سازی کرد.

## ۲- شرایط و فرضیات ساختمان نمونه

ساختمان مفروض در تحقیق حاضر، یک ساختمان مسکونی ۱۱۵ مترمربعی با دو اتاق مطابق با نقشه نشان داده شده در شکل ۱ می‌باشد.

گرمایش یک ساختمان به خصوص در اقلیم‌های سردسیر ایران، نخواهند بود. در فصول زمستان و در طول شب که از میزان شدت تابش خورشید کاسته می‌شود، دیگر انرژی خورشیدی نمی‌تواند بار حرارتی ساختمان را تأمین کند؛ به همین دلیل، از سیستم‌های گرمایش از کف خورشیدی به عنوان یک کمک‌کننده برای کاهش مصرف سوخت، باید استفاده شود. به طوری که این سیستم‌ها می‌توانند با یک دیگ آب گرم و یا یک پمپ حرارتی، همراه شده تا دمای ورودی آب به کویل‌ها را به دمای مطلوب برای آسایش حرارتی برسانند. سیستم گرمایش از کف، به دلیل گسترش تفکر بهینه‌سازی مصرف انرژی، توزیع یکسان گرما در تمامی سطح [۵] و فضا و دوری از مشکلات موجود در روش‌های گرمایشی رادیاتور و فن کویل (به عنوان مثال سیاه شدن دیوارها، عمر محدود لوله‌های داخل رادیاتور و فن کویل و ...) هم اکنون بسیار مورد استقبال است؛ در حالی که در سیستم گرمایش از کف، به دلیل استفاده از لوله‌هایی از جنس پکس پوسیدگی اتفاق نمی‌افتد [۱۴]. این در حالیست که در سیستم‌های رادیاتور و فن کویل عمدتاً از لوله‌های فلزی استفاده می‌شود که به مرور زمان زنگ‌زدگی، خوردگی و پوسیدگی جنس لوله، باعث ایجاد رسوبات شده و منجر به گرفتگی لوله‌های سیستم می‌شوند. وانگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، یک سیستم گرمایش خورشیدی را برای استفاده در فصل زمستان، مورد مطالعه قرار دادند. این سیستم شامل یک گردآورنده خورشیدی، یک هواساز و یک داکت هوای ذخیره‌کننده حرارت بود که برای گرم کردن اتاق در زمستان استفاده می‌شود. نتایج حاصل از تحقیق مذکور نشان می‌دهد که با وجود رعایت استانداردهای گرمایش زمستانی، سیستم ارائه شده نیاز به اضافه کردن یک مولد حرارتی برای گرمایش در شب یا روز بارانی دارد. سوزی و الربایه [۴] در سال ۲۰۱۲، یک تحلیل اقتصادی برای استفاده از سیستم گرمایش خورشیدی در قبرس شمالی انجام دادند. مطابق با نتایج به دست آمده، یک ساعت کار با سیستم آبگرمکن خورشیدی، گرمایش الکتریکی را کاهش می‌دهد و صورت‌حساب‌های ماهانه را به حداقل می‌رساند. در سال‌های اخیر، استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سیستم‌های گرمایش خورشیدی برای ذخیره حرارت اتلافی سیستم در طول روز و پس دادن آن در طول شب، مطالعات بسیاری انجام شده است. افزون بر این، استفاده از نانوسیال برای انتقال حرارت بهتر، مورد توجه واقع شده است. یزدانی‌فرد و همکاران [۱۵] در سال ۱۴۰۰، استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده را در سیستم ترکیبی فوتولتاییک حرارتی، مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج حاصل از این بررسی، با استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی می‌توان دمای پنل



شکل ۱. نمایی از ساختمان مطالعه شده در تحقیق حاضر

Fig. 1. A drawing of the building studied in the present study

نظر گرفته می‌شود [۱۹]. در محاسبات بار حرارتی ساختمان، مقدار بیشینه بار در نظر گرفته می‌شود تا مطابق با آن، تجهیزات لازم برای گرمایش ساختمان انتخاب شوند. اتلاف حرارتی ساختمان‌ها از دو طریق رخ می‌دهد: ۱- اتلاف حرارتی از طریق هدایت و ۲- اتلاف حرارت از طریق نفوذ هوا. مقدار حرارت تلف شده از طریق هدایت، از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$Q_T = KA(t_2 - t_1) \quad (1)$$

که  $Q_T$  مقدار حرارت انتقال یافته،  $A$  سطح عبور جریان حرارت،  $K$

ارتفاع سقف ساختمان، ۳ متر است.

در جدول ۱، مشخصات حرارتی دیوارها، کف، سقف، پنجره‌ها و درب‌های ساختمان مورد مطالعه، آمده است.

### ۳- محاسبات انتقال حرارت

۳-۱- محاسبه بار حرارتی ساختمان

بار گرمایی، میزان تقاضای حرارت برای گرم کردن ساختمان در فصل زمستان است. بار گرمایی برای هر فضا جداگانه محاسبه شده؛ سپس، بار گرمایی کل ساختمان از مجموع بار گرمایی فضاها به دست می‌آید. ضمناً، برای هر فضا یک ضریب اطمینان برای جبران تلفات از پیش تعیین نشده، در

جدول ۱. مشخصات حرارتی دیوارها، پنجره ها و سقف ساختمان

Table 1. The thermal properties of the walls, windows and the roof of the building

| نام هر لایه  | جنس   | ضخامت (mm) | مقاومت گرمایی ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ) |
|--|---|------------|---|
| دیوارها  | بلوک بتنی ۴ اینچی با نمای آجری و عایق پلی استایرن | ۱۰۱/۶      | ۲/۲۶  |
| کف   | بتن با عایق                                       | ۱۵۲/۴      | ۱/۷۶  |
| دربها<br>(۱/۲۲×۱/۳۲) مترمربع هال<br>(۱/۲۲×۰/۸۱) مترمربع اتاق ۲<br>(۱/۲۲×۰/۸۱) مترمربع اتاق ۱<br>(۱/۲۲×۰/۶) مترمربع رختکن<br>(۱/۲۲×۰/۷) مترمربع حمام-دستشویی) | چوب   | ۱۲/۷       | ۰/۴۲  |
| پنجره‌ها<br>(۱/۲۲×۲) مترمربع هال<br>(۱/۲۲×۲) مترمربع پنجره اول اتاق ۲<br>(۱/۲۲×۱) مترمربع پنجره دوم اتاق ۲)  | فلز با شیشه مضاعف به فاصله ۶/۴ میلی‌متر           | ۵۰/۸       | ۰/۳۲  |
| سقف  | بتن با آسفالت، عایق و اندود                       | ۱۰۱/۶      | ۱/۸۷  |

که با نماد " $q$ " نشان داده شده است. با استفاده از مقدار شار بار حرارتی مورد نیاز می‌توان پارامتر فواصل مناسب بین لوله‌ها را انتخاب کرد. با داشتن شار بار گرمایی و قطر لوله‌ها، می‌توان با مراجعه به جدولی در [۲۰]، فاصله مناسب بین لوله‌ها را انتخاب کرد.

$$q'' = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

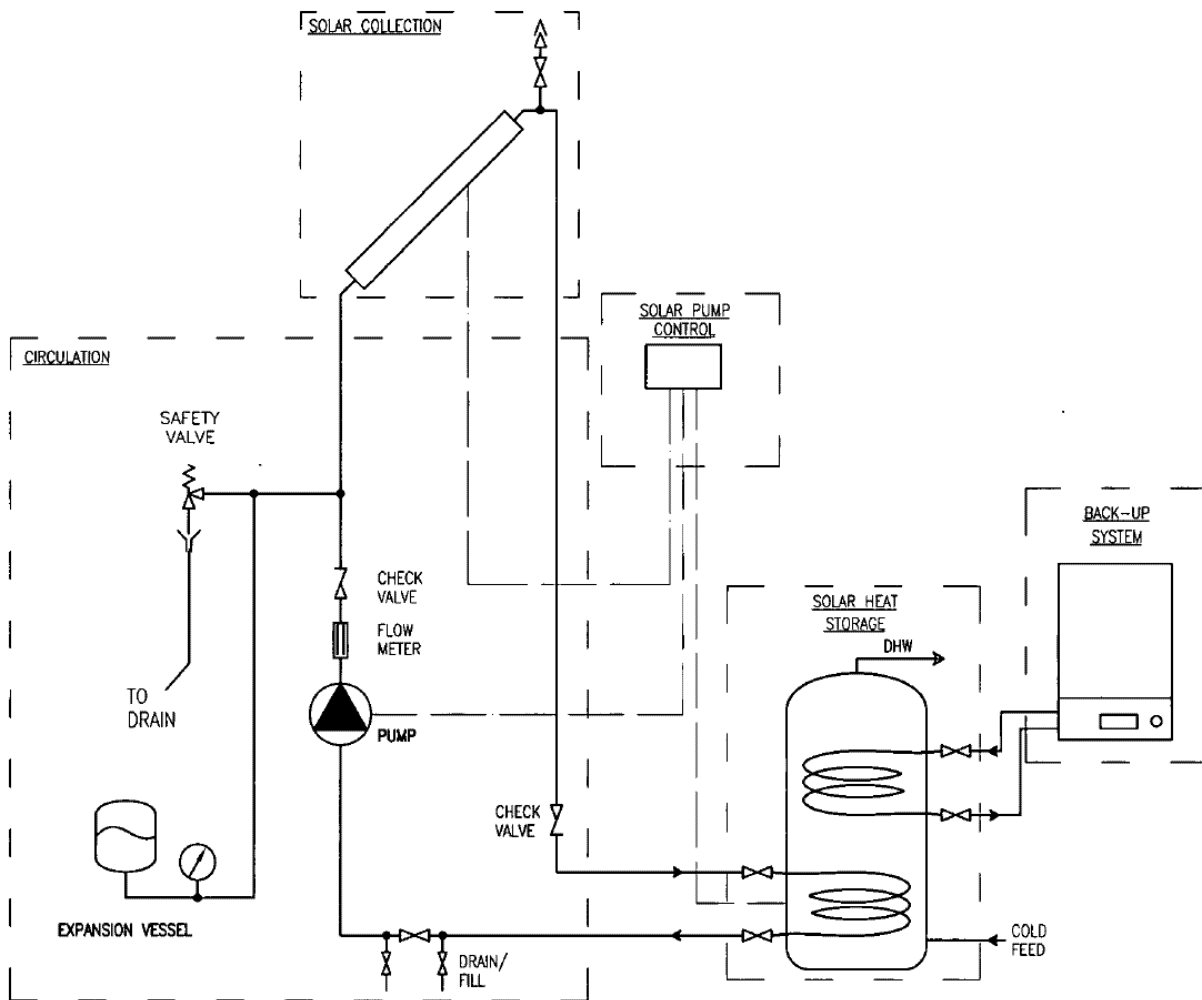
۳-۲- محاسبات سیستم حرارتی

شکل ۲، سیستم گرمایش خورشیدی پیشنهادی برای گرمایش خورشیدی همراه با سیستم کمکی پکیج دیگ آب گرم را نمایش می‌دهد. در این شکل بخش‌های مختلف سیستم با خط‌چین جدا شده‌اند که عبارتند از: بخش خورشیدی، بخش سیرکولاسیون، کنترل پمپ خورشیدی، منبع کویلی و بخش سیستم کمکی. بخش خورشیدی، همان گردآورنده‌های خورشیدی هستند که با چرخش آب در لوله‌های کویلی آن در مواجهه با تابش خورشید، گرما را به آب منتقل می‌کنند. چرخش آب در لوله‌ها نیز توسط کنترل پمپ خورشیدی انجام می‌شود. منبع کویلی با استفاده از کویل‌هایی که داخل آن وجود دارد، انتقال حرارت به آب لوله‌کشی را انجام می‌دهد. سیستم کمکی نیز می‌تواند یک پکیج باشد که انرژی آن توسط گاز شهری تأمین می‌شود

ضریب انتقال حرارت کل (با در نظر گرفتن ضریب رسانش و ضریب جابجایی در دو سمت داخل و خارج دیوار) است. مقدار این پارامتر برای انواع دیوار، کف، سقف، در، پنجره و سایر اجزای ساختمان را می‌توان از مرجع [۱۹] استخراج نمود.  $t_1$  و  $t_2$  به ترتیب درجه حرارت خارج و داخل ساختمان است. لازم به ذکر است، درجه حرارت خارج از ساختمان، میانگین حداقل دمای هوای خارج در زمستان است که برای شهر ارومیه  $-۸/۶$  درجه است. محاسبه اتلاف حرارتی از راه نفوذ هوا نیز از معادله (۲) به دست می‌آید [۱۹]:

$$Q_r = 0.348aV(t_2 - t_1) \quad (2)$$

که  $Q_r$  میزان تلفات از راه تجدید هوا بر حسب وات،  $a$  تعداد دفعات تهویه در ساعت،  $V$  حجم محل بر حسب مترمکعب،  $t_1 - t_2$  اختلاف درجه حرارت داخل و خارج بر حسب درجه سلسیوس و  $0/۳۴۸$  ضریبی است که با در نظر گرفتن گرمای ویژه حجمی به دست می‌آید. تعداد دفعات تهویه در ساعت برای انواع ساختمان، از جدولی در [۱۹] به دست می‌آید. میزان بار حرارتی هر اتاق از جمع اتلاف حرارتی از راه هدایت و تجدید هوا به دست می‌آید و با نماد  $Q$  نمایش داده می‌شود. شار بار حرارتی هر اتاق نیز، مطابق با معادله (۳)، از تقسیم بار حرارتی آن به مساحت کف اتاق به دست می‌آید



شکل ۲. نمونه سیستم پیشنهادی برای گرمایش خورشیدی با دیگ آب گرم کمکی

Fig. 2. The sample proposed system for solar heating with auxiliary hot water boiler

$$V = \frac{2716}{X - Y} \quad (4)$$

$V$  حجم به دست آمده مخزن ذخیره بر حسب لیتر برای هر متر مربع از گردآورنده خورشیدی،  $X$  دمای تنظیم شده برای گرمایش سیستم موردنظر بر حسب درجه سلسیوس و  $Y$  دمای آب در موقعیت مکانی بکارگیری سیستم بر حسب درجه سلسیوس است. بر اساس مشاهدات و تجربیات به دست آمده، بطور کلی می‌توان مقدار  $V$  از معادله (۴) را مطابق با جدول ۲ تفسیر نمود [۱۳].

عملکرد سیستم گرمایش از کف خورشیدی، تحت تاثیر پارامترهای

و زمانی به کار خواهد آمد که سیستم گرمایش خورشیدی، قادر به تأمین انرژی مورد نیاز ساختمان نباشد. حجم منبع کویلی، پارامتری بسیار مهم در ذخیره‌سازی انرژی است تا آب گرم را برای مصرف و گرمایش، در زمان‌های کمبود انرژی تابشی خورشید، فراهم آورد. اگر حجم منبع کم باشد، آب کمتری را ذخیره خواهد کرد. در مقابل، اگر حجم منبع زیاد باشد، ممکن است دمای آب به دمای لازم نرسد و در نتیجه برای گرمایش ملزم به استفاده از دیگ آب گرم شویم که در نتیجه، هزینه‌های اضافی به سیستم تحمیل شود. بعلاوه در دماهای ۲۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس، امکان رشد میکروارگانیسم‌هایی وجود دارد که سبب آلودگی آب و کاهش عمر تجهیزات می‌شود.

برای محاسبه ظرفیت مناسب منبع کویلی از معادله (۴) استفاده شده

است [۱۳]:

جدول ۲. محاسبه حجم منبع کویلی

Table 2. The volume calculations of coiled tank

| حجم منبع کویلی به ازای هر مترمربع گردآورنده (l) |               |                    |
|---|---------------|--------------------|
| گردآورنده تحت خلاء                              | گردآورنده تخت | بار حرارتی ساختمان |
| ۸۱/۵۰۰  | ۴۰/۷۵۰        | بالا               |
| ۱۰۱/۸۷۵   | ۶۱/۱۲۵        | متوسط              |
| ۱۲۲/۲۵۰   | ۱۲۲/۲۵۰       | پایین              |

انعکاس تابش خورشید نیز از معادله (۷) قابل محاسبه خواهد بود.

$$I_{\text{reflection}} = \rho \frac{1 - \cos \theta}{2} I_0 P^{\frac{1}{\sinh}} \sinh + 0.5 I_0 \sinh \frac{1 - P^{\frac{1}{\sinh}}}{1 - 1.4 \ln P} \quad (7)$$

که در آن،  $\rho$  ضریب انعکاس زمین است. مقدار ضریب انعکاس زمین بستگی به جنس سطح زمین دارد که برای زمین خشک برابر ۰/۲ است [۲۱]. در نهایت شدت تابش کل خورشید را می‌توان با استفاده از مجموع روابط (۵) تا (۷) به صورت رابطه زیر ارائه کرد:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{direct}} + I_{\text{scattering}} + I_{\text{reflection}} \quad (8)$$

برای مثال، در روز یکم فروردین (۲۱ مارس) ساعت ۱۵:۰۰ در شهر ارومیه، زاویه ارتفاع خورشیدی ۳۳/۲۸ درجه و زاویه سمت خورشیدی ۱۱۹/۵۲ درجه است. ضریب صافی هوا نیز برای ماه مارس برابر با ۰/۵ است. شدت تابش خورشیدی خارج از اتمسفر نیز در روز ذکر شده، ۱۳۹۷/۶ وات بر مترمربع است. اگر زاویه گردآورنده با زمین ۴۵ درجه فرض شود، مقدار تابش مستقیم، پخش تابش و انعکاس تابش خورشید در تاریخ و ساعت اعلامی به ترتیب برابر ۳۸/۲۳، ۱۱۹/۱۴ و ۱۴۵/۹۳ وات بر مترمربع محاسبه می‌شود.

زیادی است؛ مثل شدت تابش خورشید، مساحت کلکتورهای تخت، زاویه نصب کلکتورهای تخت، حجم منبع حرارتی، نحوه قرارگیری کویل‌ها و بسیاری عوامل دیگر. بررسی هر یک از پارامترهای ذکر شده می‌تواند در عملکرد کلی سیستم گرمایش از کف خورشیدی موثر واقع شود و موجب ذخیره انرژی شود. اقلیم منطقه، وضعیت جوی، میزان آلودگی هوا، تاریخ روز و مختصات جغرافیایی همگی می‌توانند در شدت تابش خورشید موثر باشند. شدت تابش کل خورشید شامل تابش مستقیم، پخش تابش و انعکاس تابش می‌باشد. تابش مستقیم خورشید با استفاده از معادله (۵) به دست می‌آید.

$$I_{\text{direct}} = I_0 P^{\frac{1}{\sinh}} (\cos \theta \sinh + \sin \theta \cosh \cos \gamma) \quad (5)$$

که در آن  $I$  شدت تابش خورشید در خارج از اتمسفر به واحد وات بر مترمربع است. شدت تابش خورشید در خارج از اتمسفر، تابعی از زمان و تاریخ است. موقعیت مکانی خورشید توسط زوایای اصلی، یعنی زاویه ارتفاع خورشیدی ( $h$ ) و زاویه سمت خورشیدی ( $\gamma$ ) در معادلات اعمال می‌شوند. زاویه نصب کلکتورهای خورشیدی ( $\theta$ ) هم ثابت در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. همچنین، برای محاسبه شدت تابش خورشید، متوسط ضریب صافی هوا ( $P$ ) نیاز است که مقادیر آن در ماه‌های مختلف سال، برای شهر ارومیه در [۲۲] ذکر شده‌اند. پخش تابش خورشید، از معادله (۶) محاسبه می‌شود.

$$I_{\text{scattering}} = 0.5 I_0 \sin h \frac{(1 - P^{\frac{1}{\sinh}})}{1 - 1.4 \ln P} \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (6)$$



جدول ۳. محاسبات بار حرارتی ساختمان با در نظر گرفتن دمای خارج ۸/۶- درجه سلسیوس، با استفاده از نرم‌افزار لویکد

Table 3. The building thermal load calculations taking into account the outside temperature of -8.6 degrees Celsius, using LoopCAD software

| مجموع | اتاق نشیمن | رختکن | اتاق ۲ | اتاق ۱ | حمام-دستشویی |                                     |
|-------|------------|-------|--------|--------|--------------|-------------------------------------|
| -     | ۲۱/۱       | ۲۲/۰  | ۲۱/۱   | ۲۱/۱   | ۲۲/۰         | دما (°C)                            |
| -     | ۵۱/۵       | ۶۵/۹  | ۷۶/۱   | ۴۶/۴   | ۷۹/۶         | شار بار حرارتی ( $W \cdot m^{-2}$ ) |
| ۷۰۴۱  | ۴۰۷۴       | ۱۹۸   | ۱۵۹۱   | ۶۹۱    | ۴۸۱          | بار حرارتی (W)                      |

در نهایت، نقشه لوله‌گذاری گرمایش از کف برای ساختمان مفروض، بصورت شکل ۳ بدست می‌آید. مشخصات مربوط به خطوط لوله نیز در جدول ۴ ذکر شده‌اند.

در جدول ۵، اطلاعات مربوط به مانیفولد سیستم (با رنگ قرمز در شکل ۳ نشان داده شده است)، درج شده است. آب گرم، برای گرمایش خانه به مانیفولد، وارد شده و در آنجا بوسیله ترموستات، دمای هر اتاق قابل کنترل است. در سیستم گرمایش از کف، با استفاده از شیرآلات قطع و وصل متصل شده به خروجی‌های کلکتور، امکان کنترل منطقه‌های حرارتی، به صورت دستی، با تغییر دبی آب امکان‌پذیر است. همچنین، با استفاده از ترموستات می‌توان به طور اتوماتیک اقدام به باز و بسته کردن شیرهای خطوط لوله کرد. برای مثال، اگر دمای ۲۳ درجه سلسیوس برای یک اتاق مدنظر باشد، با استفاده از یک حسگر سنجش دما، می‌توان به گونه‌ای برنامه‌ریزی کرد که اگر دما به یک مقدار معینی بیشتر از ۲۳ درجه سلسیوس برسد، ترموستات شیر را بسته و اگر دما به یک مقدار معینی کمتر از ۲۳ درجه سلسیوس برسد، شیر را باز کند. همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد، پنج مسیر لوله‌کشی به مانیفولد متصل است. در تحلیل فشار، خط لوله‌ای که بیشترین افت فشار را دارد، مد نظر قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن بیشترین افت فشار، می‌توان دریافت که فشار مانیفولد باید ۸/۶ کیلو پاسکال باشد. دمایی که در تحقیق حاضر، برای گرمایش از کف محاسبه شده است، ۵۹ درجه سلسیوس می‌باشد. دبی آب نیز برای تأمین بار حرارتی ساختمان محاسبه شده است و در جدول ۵ ذکر شده است.

بر اساس بار حرارتی ساختمان که قبلاً محاسبه شده است، نرم افزار دمای مورد نیاز، دبی، افت فشار در لوله‌ها و دمای مانیفولد و تغییرات دما

#### ۴- شبیه‌سازی گرمایش از کف ساختمان

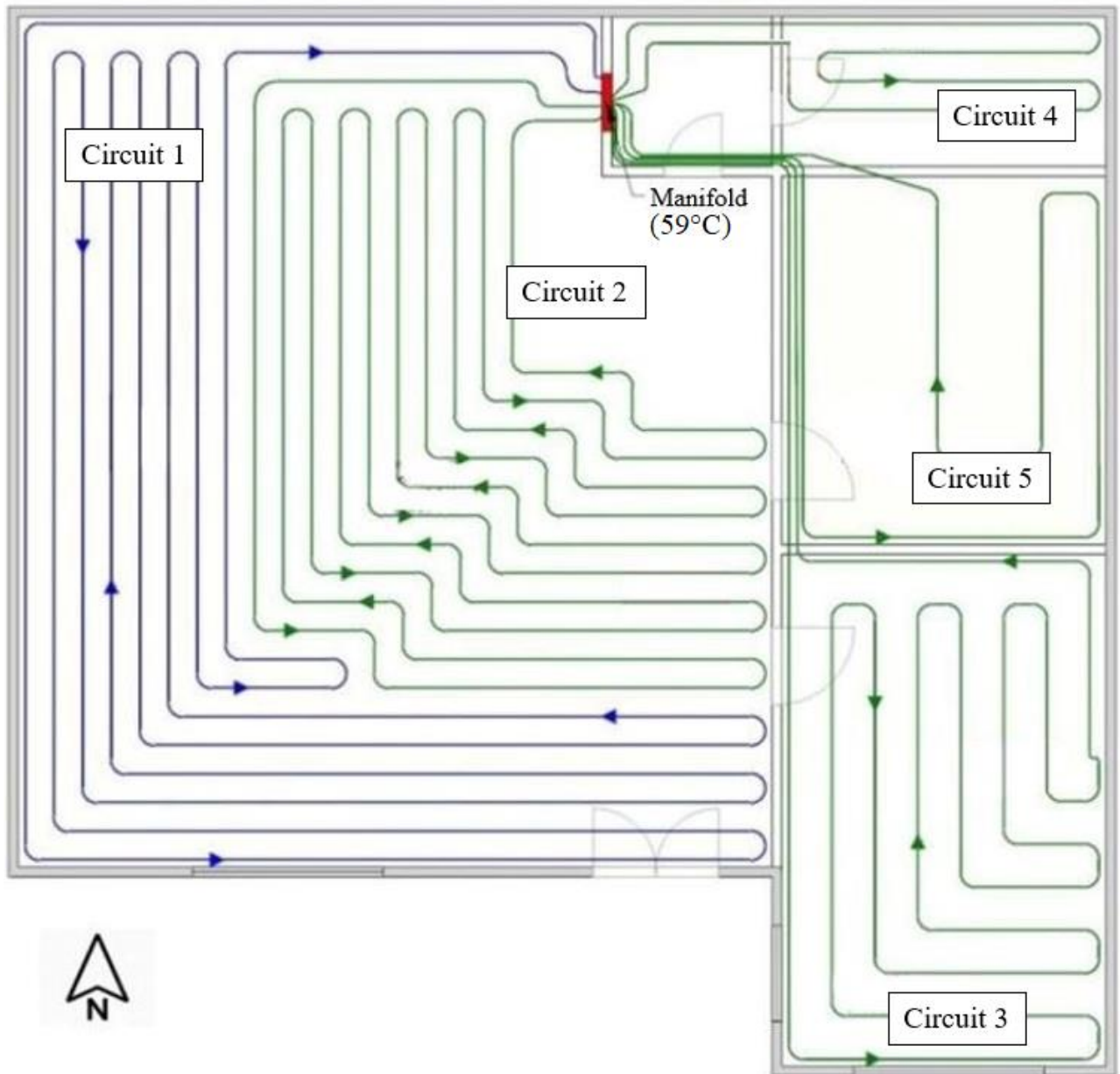
بر مبنای نقشه ساختمان (شکل ۱)، اطلاعات مربوط به جدول ۱ و همچنین دمای طرح زمستانی خارجی شهر ارومیه، با استفاده از نرم‌افزار لویکد، شار بار گرمایی و بار حرارتی فضاهای مختلف ساختمان را محاسبه نموده و در جدول ۳ آورده شده‌اند. دمای طرح زمستانی خارجی به معنی میانگین حداقل دمای هوای خارج در زمستان است که در کتابخانه نرم‌افزار، برای شهر ارومیه ۸/۶- درجه سلسیوس است.

جهت توضیح بیشتر، به عنوان مثال بار حرارتی اتاق ۱ بدین طریق محاسبه می‌شود. برای اتاق خواب، به طور متوسط تعداد دفعات تهویه هوا ۰/۲ در ساعت در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= 0.44 \times 10.8 \times (21.1 - (-22)) = -4.28 && \text{دیوار شمالی} \\
 Q_2 &= 0.44 \times 12.1 \times (21.1 - (-8.6)) = 154.93 && \text{دیوار شرقی} \\
 Q_3 &= 0.57 \times 13.1 \times (21.1 - (-8.6)) = 221.78 && \text{کف} \\
 Q_4 &= 0.53 \times 13.1 \times (21.1 - (-8.6)) = 206.21 && \text{سقف} \\
 Q_5 &= 0.348 \times 0.2 \times (13.1 \times 3) \times (21.1 - (-8.6)) = 81.24 && \text{تلفات تجدید هوا} \\
 Q_t &= \sum Q = 659.88 && \text{مجموع}
 \end{aligned}$$

با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان تقریباً پنج درصدی، برای جبران تلفات از پیش تعیین نشده، مقدار بار حرارتی اتاق ۱، مطابق با جدول ۳ بدست می‌آید. بار حرارتی برای قسمت‌های مختلف، حمام-دستشویی، اتاق ۲، رختکن و اتاق نشیمن به طریق ذکر شده محاسبه شده و در جدول ۳ آورده شده است. در نهایت مجموع بار حرارتی ساختمان، از مجموع بار حرارتی قسمت‌های مختلف به میزان ۷۰۴۱ بدست می‌آید.





شکل ۳. نقشه لوله‌گذاری گرمایش از کف حاصل از نرم‌افزار لوپکد

Fig. 3. The floor heating pipe layout obtained from LoopCAD software

جدول ۴. جزئیات هر یک از خطوط لوله ساختمان حاصل از نرم افزار لوپکد

Table 4. The properties of pipe circuits from LoopCAD software

| مجموع | لوله ۵   | لوله ۴                 | لوله ۳   | لوله ۲   | لوله ۱   |                         |
|-------|----------|------------------------|----------|----------|----------|-------------------------|
| -     | اتاق ۱   | حمام - دستشویی و رختکن | اتاق ۲   | هال      | هال      | مکان                    |
| -     | پنج لایه | پنج لایه               | پنج لایه | پنج لایه | پنج لایه | جنس لوله                |
| -     | ۱۶       | ۱۶                     | ۱۶       | ۱۶       | ۱۶       | قطر لوله (mm)           |
| ۹۴/۹  | ۸/۳      | ۵/۷                    | ۱۸/۷     | ۲۹/۱     | ۳۳/۰     | سطح پوشش ( $m^2$ )      |
| ۳۱۲/۴ | ۲۵/۰     | ۲۰/۱                   | ۵۸/۵     | ۹۲/۴     | ۱۱۶/۴    | طول لوله (m)            |
| -     | -        | ۳۰.۵                   | ۴۵۷      | ۳۰۰      | ۳۰۰      | فاصله لوله ها (cm)      |
| -     | ۰/۷      | ۰/۵                    | ۵/۶      | ۲/۸      | ۴/۱      | افت فشار (kPa)          |
| ۵/۱۲  | ۰/۸۶     | ۰/۷۶                   | ۱/۷۱     | ۰/۸۶     | ۰/۹۴     | دبی ( $l.min^{-1}$ )    |
| -     | ۱۳       | ۱۱                     | ۱۴       | ۳۲       | ۳۳       | افت دما ( $^{\circ}C$ ) |

افت دما: اختلاف دمای سیال در دو سر هر یک از لوله‌ها

جدول ۵. جزئیات مانیفولد

Table 5. The properties of manifold

| بیشترین تغییرات دما ( $^{\circ}C$ ) | افت فشار مانیفولد (kPa) | بیشترین افت فشار خط لوله (kPa) | دبی ( $l.min^{-1}$ ) | دمای مورد نیاز ( $^{\circ}C$ ) |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| ۳۳                                  | ۳                       | ۵/۶                            | ۵/۱۲                 | ۵۹                             |

جدول ۶. مشخصات آب تغذیه سیستم گرمایش از کف

Table 6. The feed water properties of underfloor heating system

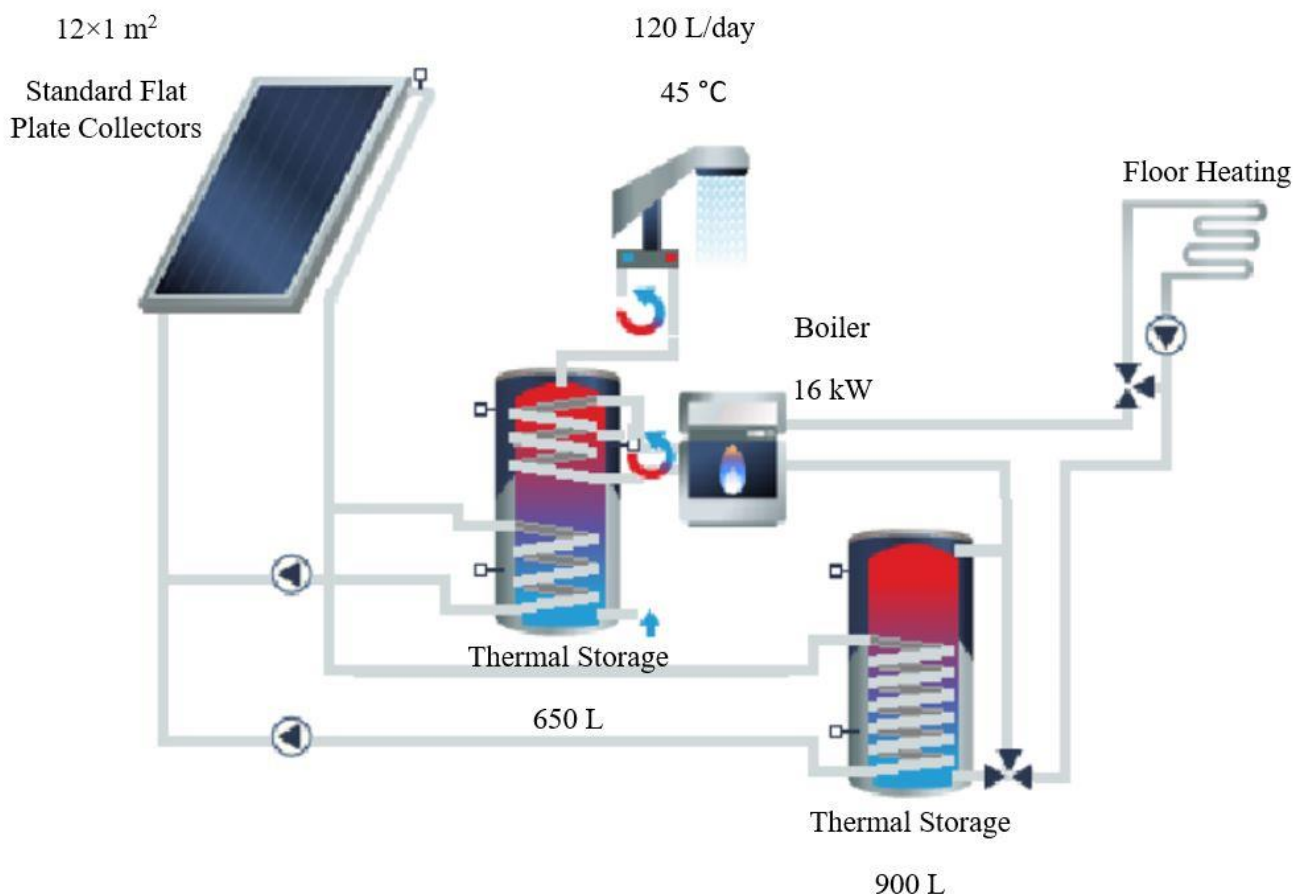
| افت فشار (kPa) | دبی ( $l.min^{-1}$ ) | دمای ( $^{\circ}C$ ) |
|----------------|----------------------|----------------------|
| ۸/۶            | ۵/۱۲                 | ۵۹                   |

است، برای طراحی سیستم گرمایش خورشیدی به نرم افزار تیسول، منتقل شده است. جدول ۶ مشخصات آب تغذیه سیستم گرمایش از کف را نشان می‌دهد. شکل ۴، سیستم گرمایش خورشیدی کمکی طراحی شده، در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. این سیستم شامل دو مخزن حرارتی است که در مخزن ۶۵۰ لیتر آب تا ۴۵ درجه سلسیوس گرم شده و برای تأمین آب گرم مصرفی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. مخزن ۹۰۰ لیتر آب گرم مورد نیاز برای تأمین گرمایش ساختمان را ذخیره می‌کند. جهت دستیابی به این مهم، آب گرم شده توسط کلکتورهای خورشیدی، با دو انشعاب به مخازن ذکر شده، منتقل می‌شود. همانند کلکتورهای خورشیدی، دیگ آب

را محاسبه می‌کند. با بررسی نتایج بدست آمده، بیشترین تغییرات دما و بیشترین افت فشار که پارامترهای مهم برای ما هستند، براحتی قابل محاسبه هستند که در جدول ۵ آورده شده است. قابل ذکر است که برای تعیین فشار آب تغذیه و پمپ مورد نیاز، لازم است تا مقدار افت فشار را در خط لوله‌ای که بیشترین افت فشار در آن اتفاق می‌افتد را محاسبه کرد. همچنین، دبی کل برابر با مجموع دبی هر یک از انشعابات خواهد بود.

۵- شبیه‌سازی سیستم حرارتی خورشیدی

نهایتاً، اطلاعاتی که از نرم افزار لوپکد در مورد آب تغذیه به دست آمده



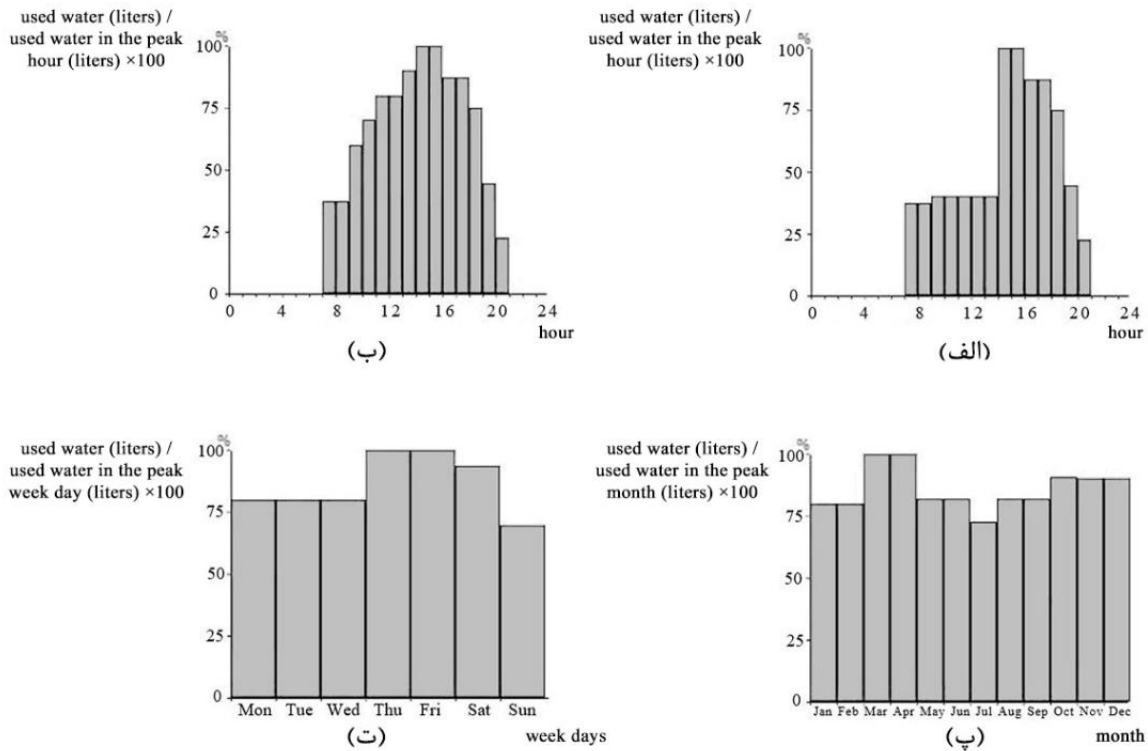
شکل ۴. سیستم طراحی شده در نرم‌افزار تیسول

Fig. 4. The designed system in T\*SOL software

در نظر گرفته شده است. در بخش خورشیدی، سیستم ارائه شده، از ۱۲ مترمربع گردآورنده (۱۲ گردآورنده ۱ مترمربعی) تخت استاندارد، بدون سیستم دنبال‌کننده نور خورشید استفاده شده است. هر یک از کلکتورها از طریق ۲۰ سانتی‌متر لوله، به هم وصل شده‌اند. بخش خورشیدی سیستم، به وسیله لوله به طول ۲ متر در خارج از ساختمان و ۱۶ متر در داخل ساختمان به مخزن حرارتی سیستم متصل است. زاویه کلکتورها با پایه‌شان ۴۵ درجه فرض شده است؛ این در حالی است که پایه گردآورنده با زمین زاویه‌ای ندارد. دبی جریان داخل گردآورنده، ۱۵۰ لیتر در ساعت فرض شده است. برنامه بخش خورشیدی به گونه‌ای تنظیم شده است تا در زمان‌های عدم استفاده از آب گرم، در صورتی که اختلاف دمای آب خروجی کلکتورها و مخزن کمتر از ۴ درجه سلسیوس باشد، بخش خورشیدی از مدار خارج شود. همچنین

گرم دارای انشعاباتی است که به هر دو مخزن وارد می‌شود. بین دیگ آب گرم و سیستم گرمایش از کف یا سیستم آب گرم مصرفی از شیرهای اختلاط استفاده شده است، تا چرخش آب، کنترل شده و فقط در مواقع لزوم، از دیگ آب گرم برای گرمایش استفاده شود. لازم به ذکر است که در فصول گرم سال که نیازی به گرمایش ساختمان نیست، خطوط مربوط به سیستم گرمایش خانه بسته می‌شوند.

لازم به ذکر است، اطلاعات مورد نیاز در مورد منطقه جغرافیایی مطالعه شده، از کتابخانه نرم‌افزار تیسول استخراج شده است. میزان آب گرم مصرف شده ساختمان به صورت روزانه ۱۲۰ لیتر در دمای ۴۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. همچنین، دمای آب شهری ورودی به ساختمان در ماه فوریه، ۱۲ درجه سلسیوس و در ماه آگوست ۱۵ درجه سلسیوس



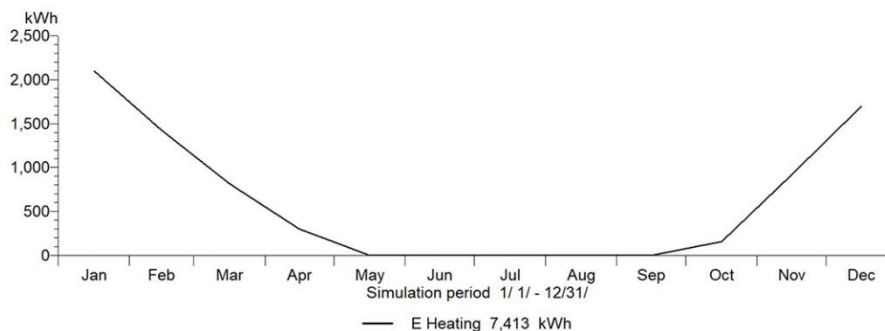
شکل ۵. الف- توزیع نسبی میزان مصرف آب گرم در طول روزهای غیر تعطیل ب- توزیع نسبی میزان مصرف آب گرم در طول روزهای تعطیل پ- توزیع نسبی میزان مصرف آب گرم در طول سال ت- توزیع نسبی میزان مصرف آب گرم در طول هفته

Fig. 5. a. The relative distribution of domestic hot water consumption during working days. b. The relative distribution of domestic hot water consumption during holidays. c. The relative distribution of domestic hot water consumption during the year. d. The relative distribution of domestic hot water consumption during the week

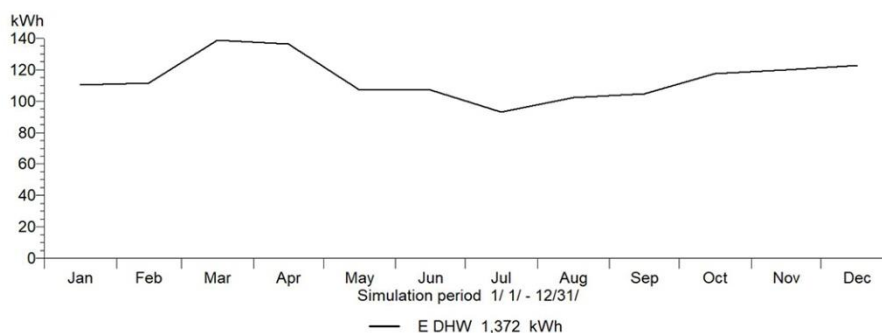
### ۶- نتایج

با اعمال همه قیده‌های ذکر شده، میزان انرژی لازم جهت تأمین گرمایش منزل و آب گرم مصرفی، در طول سال محاسبه شده و در شکل ۶ ترسیم شده است. شکل ۷ میزان انرژی مصرفی در مقایسه با انرژی تولیدی از خورشید در طول سال را نشان می‌دهد. این اطلاعات با در نظر گرفتن میزان انرژی تابیده شده از طرف خورشید در واحد سطح به دست آمده است که برابر با ۱۹۶۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال است. شکل‌های ۸-الف و ۸-ب، میزان انرژی تأمین شده توسط کلکتورهای خورشیدی جهت گرمایش کف و آب گرم مصرفی را در طول سال نشان می‌دهند. شکل‌های ۸-پ و ۸-ت نیز، میزان انرژی تأمین شده توسط دیگ آب گرم جهت گرمایش از کف و آب گرم مصرفی را نشان می‌دهند. نکته لازم به ذکر این است که انرژی تأمین شده، انرژی خروجی از گردآورنده‌ها است؛ نه انرژی خروجی برای مصرف. آبی که در مخازن ذخیره می‌شود، به تدریج دمایش کاهش پیدا می‌کند؛ لذا، اگر آب مخازن به صورت پیوسته مصرف نشود، اتلاف

مخازن حرارتی با یک لایه ۱۰۰ میلی‌متری با ثابت انتقال حرارت ۰/۰۶۵ وات بر مترمربع بر درجه سلسیوس عایق شده‌اند و در ارتفاع ۱/۸ متری از زمین قرار گرفته است. توزیع نسبی تقاضا برای آب گرم مصرفی در بازه‌های زمانی مختلف مطابق با شکل ۵ نشان داده شده است. این نمودار آماری، برگرفته از پرسشنامه‌هایی است که به چندین خانوار ارائه شد. مصرف آب گرم ساختمان، در طول شب به مدت ۷ ساعت، صفر در نظر گرفته شده است. همچنین در پنج ماه می، ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر که از ماه‌های گرم سال‌اند، سیستم گرمایش، بدون استفاده فرض شده است. فرضیات فوق به این دلیل مطرح شده‌اند که اوج بار مصرف آب گرم در هر روز در محاسبه توان گرمایش سیستم و نسبت ذخیره خورشیدی، تعیین‌کننده است. در تحقیق حاضر، مصرف ۴ الی ۵ روز از هر ماه، صفر فرض شده است تا اوج بار در روزهای دیگر ماه، بیشتر شود. در این صورت، استفاده از دیگ آب گرم و سوخت گاز شهری بیشتر محاسبه خواهد شد ولی قابلیت اطمینان محاسبات انجام گرفته، بالاتر می‌رود.



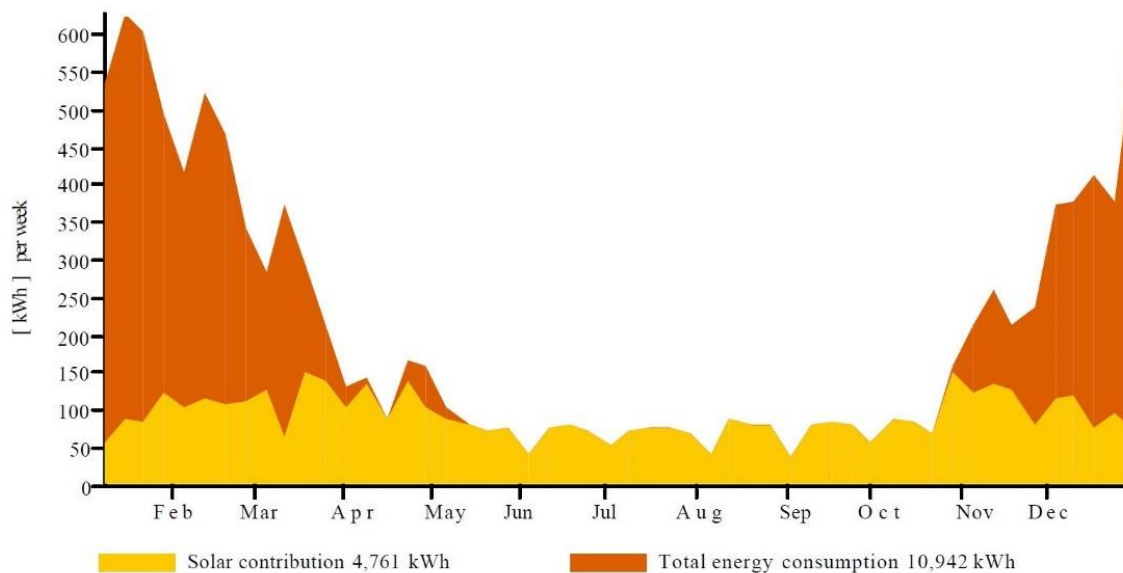
(الف)



(ب)

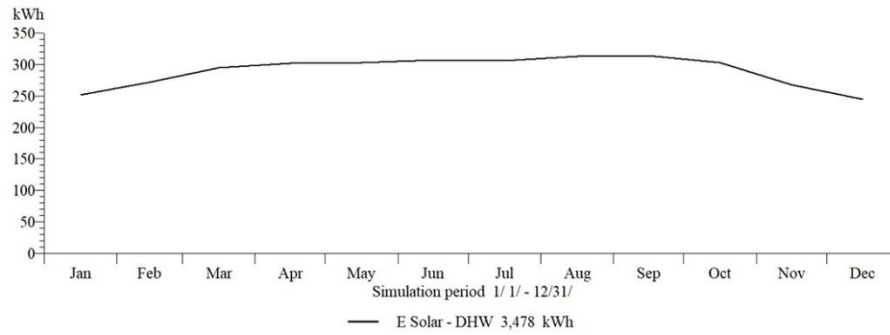
شکل ۶. الف- انرژی لازم برای گرمایش از کف (۷۴۱۳ کیلووات ساعت در سال) ب- انرژی لازم برای آب گرم مصرفی (۱۳۷۲ کیلووات ساعت در سال)

Fig. 6. a. The energy requirement for underfloor heating (7413 kWh per year). b. The energy requirement for domestic hot water (1372 kWh per year)

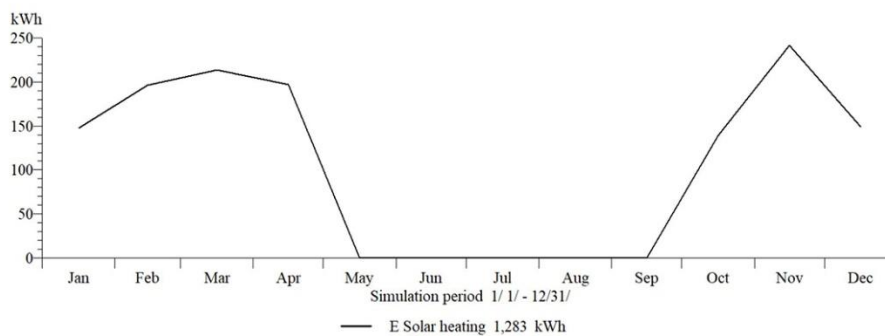


شکل ۷. انرژی مصرفی کل برای گرمایش و آب گرم مصرفی و سهم تولید انرژی از خورشید (۱۰۹۴۳ کیلووات ساعت در هفته کل انرژی مصرفی در سال بوده که ۴۷۶۱ سهم خورشیدی آن می باشد)

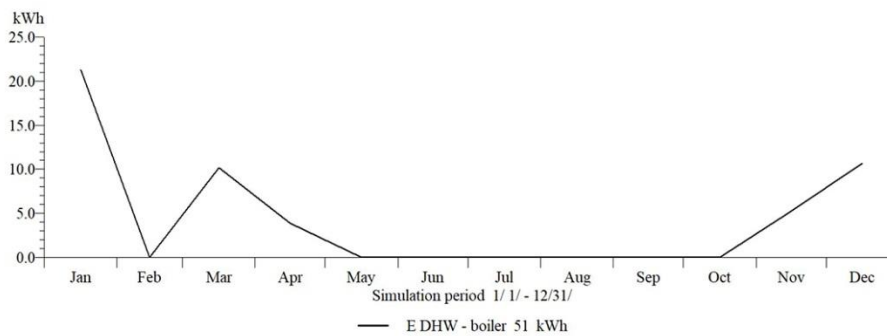
Fig. 7. The total energy consumption for heating and domestic hot water and solar contribution (10943 kWh per week is the total energy consumption per year, of which 4761 are solar shares.)



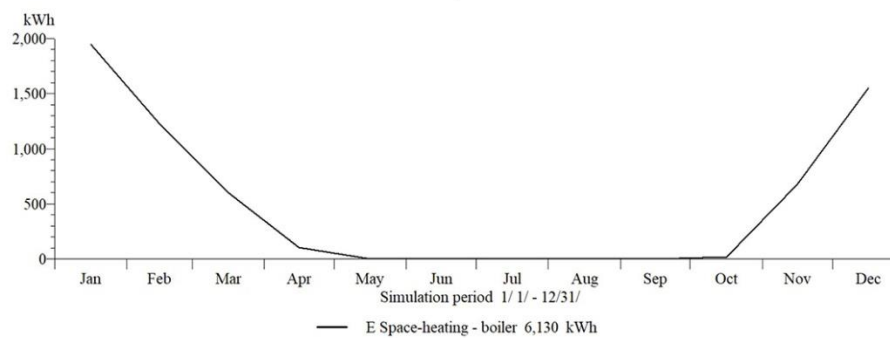
(الف)



(ب)



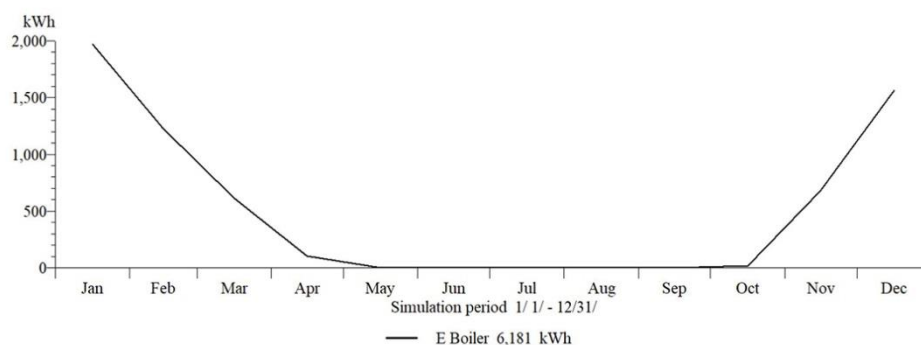
(پ)



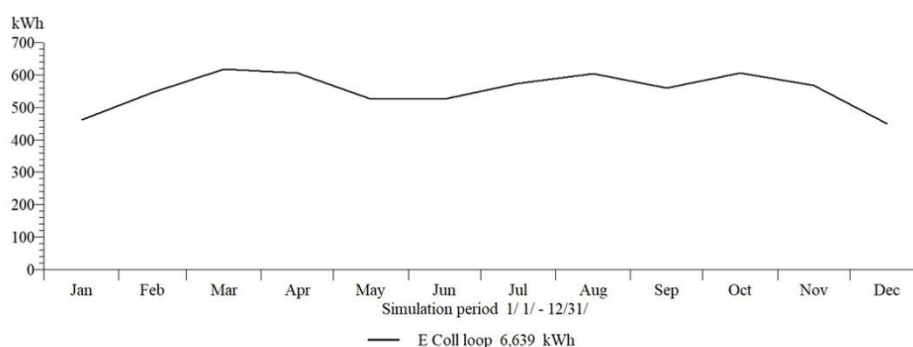
(ت)

شکل ۸. الف- انرژی آب گرم مصرفی تأمین شده توسط گردآورنده (۳۴۷۸ کیلووات ساعت در سال) ب- انرژی گرمایش از کف تأمین شده توسط گردآورنده (۱۲۸۳ کیلووات ساعت در سال) پ- انرژی آب گرم مصرفی تأمین شده توسط دیگ (۵۱ کیلووات ساعت در سال) ت- انرژی گرمایش از کف تأمین شده توسط دیگ (۶۱۳۰ کیلووات ساعت در سال)

Fig. 8. a. The solar contribution to domestic hot water (3478 kWh per year). b. The solar contribution to underfloor heating (1283 kWh per year). c. The energy provided by the boiler to domestic hot water (51 kWh per year). d. The energy provided by the boiler to underfloor heating (6130 kWh per year)



(الف)



(ب)

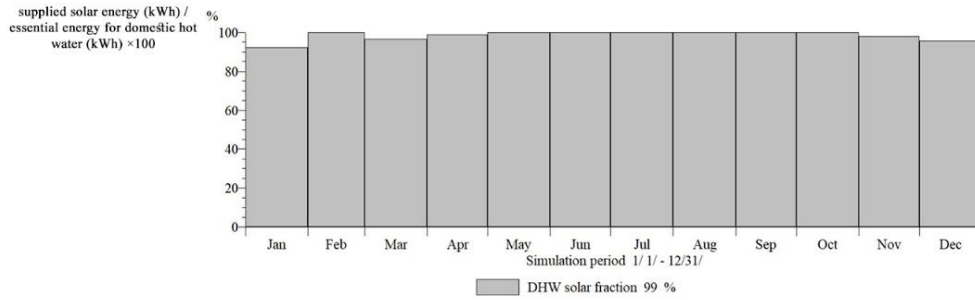
شکل ۹. الف- انرژی تولید شده توسط دیگ (۶۱۸۱ کیلووات ساعت در سال) ب- انرژی تولید شده توسط گردآورنده (۶۶۳۹ کیلووات ساعت در سال)

Fig. 9. a. The energy provided by the boiler (6181 kWh per year). b. The energy provided by the collector loop (6639 kWh per year)

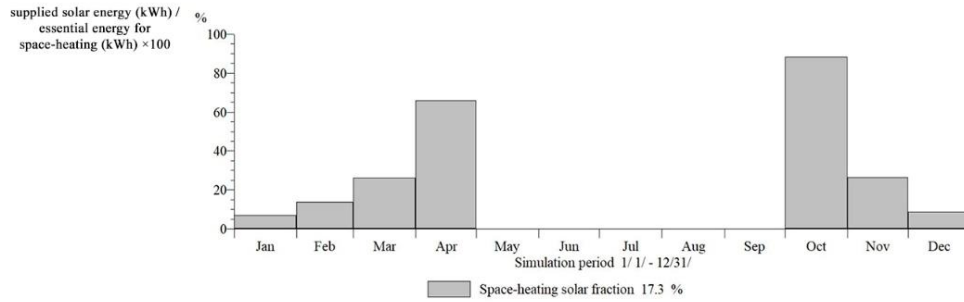
مقداری که به دست آمده در مقایسه با بخش صنعت کشور بسیار اندک و ناچیز است [۱]؛ ولی اگر در مقیاس بزرگتر یعنی برای تعداد بیشتری از منازل بررسی شود، می‌تواند حایز اهمیت شود. در مورد سیستم‌های خورشیدی، نسبت خورشیدی یا نسبت ذخیره‌سازی خورشیدی بیانگر نسبت انرژی به دست آمده از خورشید به انرژی مورد نیاز برای هدف مطلوب می‌باشد [۲۳]. شکل ۱۰، نسبت خورشیدی را برای گرمایش از کف و آب‌گرم مصرفی نشان می‌دهد. این نسبت برای آب‌گرم مصرفی برابر  $0/985$  است؛ یعنی، تأمین آب‌گرم مصرفی با این سیستم طراحی شده، در طول سال به خوبی انجام می‌شود. بر خلاف آب‌گرم مصرفی، سیستم طراحی شده، پاسخگوی نیاز انرژی گرمایش از کف نیست. نسبت خورشیدی برای گرمایش از کف، در طول فصل زمستان یعنی ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه به ترتیب برابر  $0/09$ ،  $0/07$  و  $0/14$  است. بیشترین مصرف انرژی برای گرمایش، در این

حرارتی بالایی خواهیم داشت. مصارف روزانه آب‌گرم که به صورت ناپیوسته انجام می‌شود، موجب اتلاف حرارتی بالایی در مخزن  $650$  لیتری می‌شود که این رقم بالغ بر  $1768$  کیلووات ساعت است. از آنجایی که مخزن  $900$  لیتری پیوسته برای گرمایش ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، نمی‌تواند اتلاف حرارتی قابل توجهی داشته باشد. شکل ۹، نمودار کل انرژی تأمین شده توسط دیگ و گردآورنده است. با داشتن انرژی تأمین شده توسط دیگ ( $6181$  کیلووات ساعت)، میزان گاز مصرفی برای تأمین این مقدار انرژی  $730$  متر مکعب در سال، محاسبه می‌شود. با داشتن انرژی تأمین شده توسط کلکتورها نیز محاسبه می‌شود که از مصرف  $785$  متر مکعب گاز اجتناب شده است. میزان گاز کربن دی اکسیدی که با سوزاندن گاز متان می‌توانست تشکیل شود و با نصب سیستم خورشیدی از تولید آن در محیط‌زیست شهری، جلوگیری شده است،  $1207$  کیلوگرم در سال حساب شده است. هر





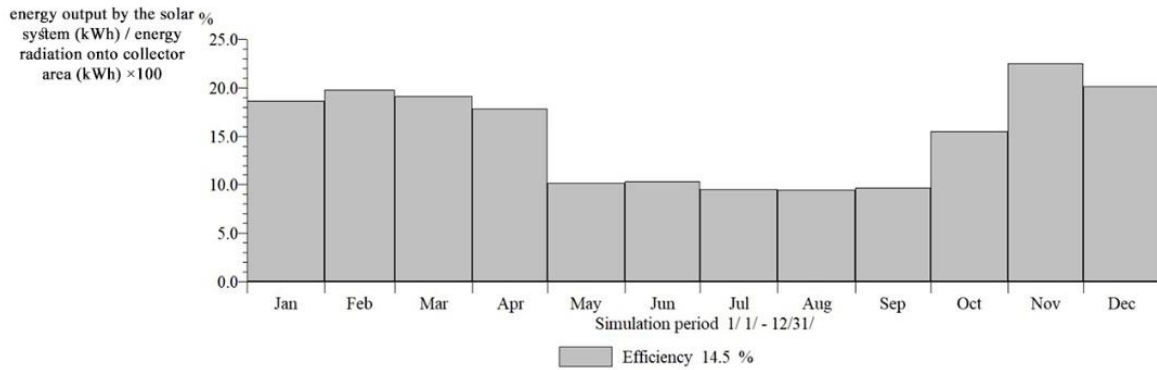
(الف)



(ب)

شکل ۱۰. الف- نسبت ذخیره خورشیدی آب گرم مصرفی (میانگین ۹۹٪) -ب- نسبت ذخیره خورشیدی گرمایش از کف (میانگین ۱۷/۳٪)

Fig. 10. a. The domestic hot water solar fraction (average 99%). b. The underfloor heating solar fraction (average 17.3%)

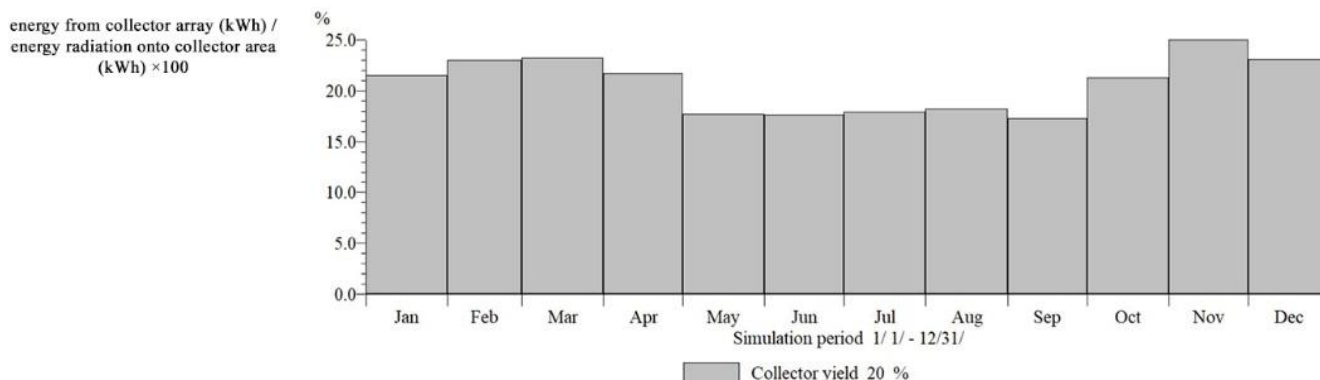


شکل ۱۱. بهره وری کل سیستم (میانگین ۱۴/۵٪)

Fig. 11. The system efficiency (average 14.5%)

تعریف نسبت انرژی خروجی از سیستم خورشیدی به انرژی تابشی خورشید به دست می‌آید. شکل ۱۲، نیز بازده کلکتورها را نشان می‌دهد و از نسبت انرژی خروجی از گردآورنده خورشیدی به انرژی تابشی خورشید به دست می‌آید. بازده حرارتی کلکتور، با افزایش مقاومت انتقال حرارت بین جاذب و سیال، افزایش گرمای ویژه گردآورنده و جذب نور پایین کاهش پیدا می‌کند [۲۴]. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد

سه ماه روی می‌دهد که عملاً سیستم خورشیدی مورد نظر، پاسخگوی کافی برای گرمایش از کف نیست و بخش اعظمی از نیاز گرمایش، توسط دیگ و مصرف گاز شهری تأمین می‌شود. در نتیجه، نسبت خورشیدی برای گرمایش از کف در طول سال برابر ۰/۱۷۳ است. همینطور نسبت خورشیدی برای گرمایش از کف و آب گرم مصرفی در طول سال، برابر ۰/۴۴ است. شکل ۱۱، بهره‌وری سیستم را در طول سال نشان می‌دهد. بهره‌وری سیستم، با



شکل ۱۲. بازده گردآورنده (میانگین ~ ۲۰٪)

Fig. 12. The collector loop efficiency (average ~ 20%)

#### ۸- فهرست علائم

|  |          |
|--|----------|
| حرارت از دست رفته از طریق رسانش (W)                      | $Q_T$    |
| حرارت از دست رفته از طریق تهویه (W)                      | $Q_V$    |
| بار حرارتی ساختمان (W)                                   | $Q$      |
| شار بار حرارتی ( $W.m^{-2}$ )                            | $q''$    |
| ضریب هدایت حرارتی کل ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )       | $K$      |
| مساحت ( $m^2$ )  | $A$      |
| تعداد دفعات تهویه در ساعت                                | $a$      |
| حجم (l)  | $V$      |
| دمای داخل ساختمان ( $^{\circ}C$ )                        | $t_2$    |
| دمای خارج ساختمان ( $^{\circ}C$ )                        | $t_1$    |
| شدت تابش خورشید ( $W.m^{-2}$ )                           | $I$      |
| ضریب صافی هوا  | $P$      |
| ضریب انعکاس زمین   | $\rho$   |
| زاویه نصب کلکتورهای خورشیدی                              | $\theta$ |
| زاویه ارتفاع خورشیدی                                     | $h$      |
| زاویه سمت خورشیدی  | $\gamma$ |
| دمای تنظیم شده برای گرمایش سیستم موردنظر ( $^{\circ}C$ ) | $X$      |
| دمای آب در موقعیت مکانی بکارگیری سیستم ( $^{\circ}C$ )   | $Y$      |

که سیستم گرمایش خورشیدی طراحی شده در تحقیق حاضر، می‌تواند به تنهایی ۹۸/۵ درصد کل انرژی لازم برای تهیه آب گرم ساختمان و ۱۷/۳ درصد از کل انرژی لازم برای گرمایش از کف را در یک ساختمان تأمین کند.

#### ۷- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، یک سیستم گرمایش از کف ترکیبی برای گرمایش یک ساختمان در اقلیم سردسیر طراحی، شبیه‌سازی و تحلیل شده است. این سیستم گرمایش از کف شامل یک سیستم گرمایش از کف خورشیدی به عنوان کمک‌کننده و یک دیگ آب گرم است. جهت محاسبه بار حرارتی ساختمان، از نرم‌افزار لوپکد استفاده شده است. داده‌های مربوط به آب تغذیه، جهت تأمین بار حرارتی ساختمان، بعنوان ورودی به نرم‌افزار تیسول معرفی شده و با استفاده از این نرم‌افزار، سیستم پیشنهاد شده برای بخش گرمایش از کف خورشیدی، شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم گرمایش خورشیدی طراحی شده در این تحقیق، می‌تواند به تنهایی ۹۸/۵ درصد کل انرژی لازم برای تهیه آب گرم ساختمان و ۱۷/۳ درصد از کل انرژی لازم برای گرمایش از کف در یک ساختمان نمونه ۱۱۵ متری را تأمین کند.

- Energy, 65(2) (1999) 111-118.
- [12] M. Antonelli, A. Baccioli, M. Francesconi, R. Lensi, L. Martorano, Analysis of a low concentration solar plant with compound parabolic collectors and a rotary expander for electricity generation, *Energy Procedia*, 45 (2014) 170-179.
- [13] M. Paidar, M. Ashjari, Performance and Efficiency Consideration of a Floor Heating System Working with the Heat Collected from the Sun at Different Climate Conditions, *Journal of Mechanical Engineering*, 48(1) (2018) 85-94 (in Persian).
- [14] P. Alamdari, O. Nematollahi, A. Alam Rajabi, Numerical study of the pipe arrangement effect on heat transfer and pressure drop in underfloor heating system, *The First Conference on Emerging Trends in Energy Conservation*, (2011) (in Persian).
- [15] F. Yazdanifard, M. Ameri, R. Taylor, Investigation of using hybrid nanofluid-phase change material spectral splitter in photovoltaic/thermal system, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(7) (2021) 19-19 (in Persian).
- [16] M. Talebizadeh, E. Jahanshahi Javaran, M. Rahnama, Design, Manufacturing and Performance Evaluation of a Fixed Focus Scheffler Concentrator in Kerman, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(6) (2019) 1303-1318 (in Persian).
- [17] S.A. Behmounesi, F. Jafarkazemi, Theoretical comparison of thermal and electrical performance of different models of sheet and tube type solar photovoltaic - thermal water collector, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(5) (2021) 9-9 (in Persian).
- [18] H. Abdualla, H. Ceylan, S. Kim, P.C. Taylor, K. Gopalakrishnan, K. Cetin, Hydronic Heated Pavement System Using Precast Concrete Pavement for Airport Applications, *International Conference on Transportation and Development*, American Society of Civil Engineers (ASCE), (2018) 16-24.
- [19] S.M. Mousavi Naeinian, *Building Facilities*, Danesh va Fan, Tehran, (2011) (in Persian).
- [1] F. Amini, L. Saber Fattahi, P. Soleymanpour, N. Golghahremani, M. Shafizadeh, M. Tavanpour, M. Farmad, *Iran Energy Balance Sheets: 1397*, Iran Ministry of Energy, Deputy of planning and economic, (2019) (in Persian).
- [2] G. Najafi, B. Ghobadian, R. Mamat, T. Yusaf, W.H. Azmi, Solar energy in Iran: Current state and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49 (2015) 931-942.
- [3] A. Ebrahimpour, Y. Karimi Wahed, The best methods to optimize energy consumption for an educational building in Tabriz, *Modares Mechanical Engineering*, 12(4) (2012) (in Persian).
- [4] A. Sousi, L.A. Al-Rubaye, Feasibility of Underfloor Heating Using Solar Energy, *SSRN Electronic Journal*, (2012).
- [5] H.G. Sabiniak, K. Wiśnik, Real Temperature Distribution on the Surface of Underfloor Heating, *International Journal of Energy Engineering*, 5(5) (2015) 137-151.
- [6] M.S. Karimi, F. Fazelpour, M.A. Rosen, M. Shams, Comparative study of solar-powered underfloor heating system performance in distinctive climates, *Renewable Energy*, 130 (2019) 524-535.
- [7] H. Zweifel, R.D. Maier, M. Schiller, *Plastics additives handbook*, 6th ed., Hanser, Munich, (2009).
- [8] S. Faisal Ahmed, M. Khalid, M. Vaka, R. Walvekar, A. Numan, A. Khaliq Rasheed, N. Mujawar Mubarak, Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review, *Thermal Science and Engineering Progress*, 25 (2021) 100981-100981.
- [9] L. Wang, Y. Man, S. Shi, Z. Wang, Application of Solar Air Collector and Floor Air Supply Heating System in Winter, *Procedia Engineering*, 205 (2017) 3623-3629.
- [10] H.Y. Chan, S.B. Riffat, J. Zhu, Review of passive solar heating and cooling technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2010) 781-789.
- [11] N. Benz, T. Beikircher, High efficiency evacuated flat-plate solar collector for process steam production, *Solar*

- Conference on Optimizing fuel consumption in the building, (2003) (in Persian).
- [23] W.T. Grondzik, A.G. Kwok, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, John Wiley & Sons, Portland, (2014).
- [24] H.A. Zondag, D.W. De Vries, W.G.J. Van Helden, R.J.C. Van Zolingen, A.A. Van Steenhoven, The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector, Solar Energy, 72(2) (2002) 113-128.
- [20] M. Izadkhah, H. Khanimoghaddam, K. Yazdani, Underfloor Heating in LoopCAD, Noavar, Tehran, (2013) (in Persian).
- [21] F. Yang, J. Liu, Q. Sun, L. Cheng, R. Wennersten, Simulation analysis of household solar assistant radiant floor heating system in cold area, Energy Procedia, 158 (2019) 631-636.
- [22] M. Bahadorinejad, S.A. Mirhosseini, Atmospheric Transparency for different cities of Iran, The Third

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Asadi, A. M. Abazari, A. Hassanvand, Analysis of an Auxiliary Household Underfloor Heating and Domestic Hot Water System Using Solar Energy in a Cold Area, Amirkabir J. Mech Eng., 54(5) (2022) 1081-1100.

DOI: 10.22060/mej.2022.20404.7227



