



## تحلیل فنی و زیست محیطی استفاده از سامانه فتوولتائیک-گرمایی برای تأمین انرژی گرمایشی ساختمان یک مدرسه در کرمان

### زهره سلطانی نژاد<sup>1</sup>، محسن قاسمی<sup>2</sup>، مجتبی سلطانی نژاد<sup>3\*</sup>

1- کارشناس ارشد، گروه مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بم، بم، ایران

3- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

\* کرمان، آدرس پستی: 7617868641، Soltaninejad.Mojtaba.1991@gmail.com

#### چکیده

رشد جمعیت، صنعت و مصرف انرژی در سال های اخیر منجر به بروز بحران های زیست محیطی و انرژی بی سابقه ای در عمر کره ی زمین شده است. با توجه به سهم بالای ساختمان ها در مصرف انرژی، کاهش مصرف انرژی ساختمان ها و بهره مندی از منابع پاک انرژی اهمیت دارد. از این رو با شناخت روش های صرفه جویی و منابع پاک انرژی و بررسی عمل کرد آن ها می توان گام مهمی در جهت توسعه پایدار و کاهش بحران های زیست محیطی برداشت. با این هدف در تحقیق حاضر عمل کرد فنی، زیست محیطی و اقتصادی سامانه ی خورشیدی فتوولتائیک-گرمایی که برای گرمایش ساختمان یک مدرسه 24 کلاسه با شبیه سازی در نرم افزار بررسی شد. نتایج نشان داد سامانه فتوولتائیک-گرمایی با کارایی بیش از 50 درصد، امکان تأمین 41/1 مگاوات-ساعت انرژی حرارتی در ماه های سرد سال برای ساختمان مدرسه را دارد که در برخی مواقع حتی بیش از نیاز مصرفی خواهد بود. انرژی حرارتی تأمین شده این سامانه پاک منجر به کاهش تولید و انتشار بیش از 9 تن آلاینده های هوا خواهد شد. این سامانه سالانه امکان تولید 73 مگاوات-ساعت انرژی الکتریکی را هم زمان با تأمین انرژی حرارتی دارد. توان حرارتی و الکتریکی سامانه سالانه قادر به جلوگیری از تولید و انتشار بیش از 53 تن آلاینده است که منجر به کاهش 865 میلیون ریال هزینه های اجتماعی خواهد شد.

**کلیدواژگان:** انرژی گرمایشی، ساختمان مدرسه، فتوولتائیک-گرمایی، انتشار آلاینده ها

## Technical and environmental analysis of using a photovoltaic-thermal system to provide heating energy for a school building in Kerman

Zahra Soltaninejad<sup>1</sup>, Mohsen Ghasemi<sup>2</sup>, Mojtaba Soltaninejad<sup>3\*</sup>

1-MA, Department of Architecture, Islamic Azad University Kerman unit, Kerman, Iran

2-Assistant Professor, Department of Architecture, Islamic Azad University Bam unit, Bam, Iran

3- MA, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

\* P.O.B. 7617868641 Kerman, Iran, Soltaninejad.Mojtaba.1991@gmail.com

Received: 2 April 2023 Accepted: 10 October 2023

#### Abstract

The growth of population, industry, and energy consumption in recent years has led to environmental problems and energy crises which are unprecedented in the life of the earth. Considering the high share of buildings in energy consumption, it is important to reduce the energy consumption of buildings and benefit from clean energy sources. Therefore, by knowing the methods of energy saving and clean sources of energy and examining their performance, an important step can be taken in the direction of sustainable development. With this aim, in the present research, the technical, environmental, and economic performance of the solar photovoltaic-thermal system for heating the building of a 24-class school was investigated by simulation in the software. The results showed that the photovoltaic-thermal system with an efficiency of more than 50% has the possibility of providing 41.1 MWh of thermal energy in the cold months of the year for the school building, which in some cases will be even more than the consumption requirement. The thermal energy provided by this clean system will reduce the production and emission of more than 9 tons of air pollutants. This system has the possibility of producing 73 MWh of electrical energy at the same time as providing thermal energy. The thermal and electrical power of the system can prevent the production and release of more than 53 tons of air pollutants yearly.

**Keywords:** Heating energy, School building, Photovoltaic-thermal, Pollutants emission

## ۱- مقدمه

که این امر موجب افزایش دمای کاری آن‌ها شده و افزایش دما باعث کاهش بازده الکتریکی سلول‌ها می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، سلول‌های خورشیدی را می‌توان با سیال مناسب خنک کرد. کاهش دمای سلول با استفاده از سیال خنک‌کننده از یک سو باعث بهبود بازده توان الکتریکی می‌شود و از طرف دیگر، امکان استفاده از سیال گرم خروجی برای مصارف گرمایی با دمای پایین را به وجود می‌آورد. سامانه‌هایی که در آن‌ها از انرژی خورشید هم‌زمان انرژی الکتریکی و گرمایی حاصل می‌شود، سامانه‌های فتولتاییک-گرمایی نامیده می‌شوند [5]. توان تولیدی یک سامانه‌ی فتولتاییک-گرمایی، شامل توان‌های الکتریکی و حرارتی علاوه بر مشخصه‌های طراحی، به موقعیت جغرافیایی محل نصب آن نیز بستگی دارد [5]. با توجه به هزینه‌های به نسبت بالای ساخت و راه‌اندازی سامانه‌های خورشیدی، تخمین عمل‌کرد آن‌ها قبل از نصب، امری ضروری هست از این‌رو در پژوهش‌های متعددی، اقدام به شبیه‌سازی و تحلیل سامانه‌های فتولتاییک-گرمایی در مناطق جغرافیایی مختلف شده است.

## ۲- سابقه پژوهشی

در پژوهشی عمل‌کرد سامانه‌ی فتولتاییک-گرمایی در سه شهر فرانسه، به روش دینامیکی و به‌وسیله‌ی نرم‌افزار ترنسیس<sup>۳</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیش‌ترین انرژی الکتریکی تولید شده در ماه‌های مرداد و شهریور و به ترتیب برای شهرهای نیس، لیون و پاریس هستند. همچنین نتایج این شبیه‌سازی حاکی از آن است که توان حرارتی نسبت به توان الکتریکی بیشتر خواهد بود [6]. در پژوهشی دیگر عمل‌کرد سامانه‌ی فتولتاییک-گرمایی در کشور کانادا به روش تجربی برای یک ساختمان مسکونی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که هزینه‌ی نگهداری سالانه، 21 درصد و تولید گازهای گل‌خانه‌ای، 16 درصد در مقایسه با سامانه‌های فتولتاییک تکی کاهش می‌یابد [7]. بررسی و مقایسه‌ی شبیه‌سازی عمل‌کرد دو سامانه‌ی خورشیدی، با جمع‌کننده‌های حرارتی صفحه-تخت و جمع‌کننده‌های فتولتاییک-گرمایی برای گرمایش آب یک استخر در شهر کرمان در محیط نرم‌افزار ترنسیس نشان داد بیش‌ترین کارایی سامانه‌ی خورشیدی مربوط به سامانه‌ی مجهز به جمع‌کننده‌ی صفحه-تخت در تابستان است که برابر با 34/6 درصد خواهد بود و در سامانه‌ی فتولتاییک-گرمایی بیش‌ترین کارایی در تابستان 28 درصد است. در مجموع سامانه‌ی دارای جمع‌کننده‌ی صفحه تخت خورشیدی، سالانه 14 درصد و سامانه‌ی فتولتاییک-گرمایی 11 درصد مصرف سوخت مورد نیاز برای گرم کردن آب استخر را کاهش خواهند داد. همچنین سامانه‌ی فتولتاییک-گرمایی سالانه قادر به تولید 85 مگاوات ساعت برق پاک است. تعبیه‌ی سامانه‌های خورشیدی منجر به کاهش تولید 29 تن دی‌اکسیدکربن در سامانه‌ی جمع-کننده‌ی خورشیدی معمولی و 23/3 تن در سامانه فتولتاییک-گرمایی در طول سال خواهد شد، تولید سالانه‌ی برق خورشیدی توان جلوگیری از انتشار 34/6 تن دی‌اکسیدکربن را در سال دارد [8]. این نتایج نشان دهنده بیش‌تر بودن کارایی سامانه‌های ترکیبی در مقایسه با سامانه‌های تکی است. در تحقیقی دیگر که در شهر کرمان بر روی مدل یک ساختمان مسکونی با بهره‌گیری از نرم‌افزار ترنسیس انجام شد نتایج تحقیق نشان داد با تعبیه یک سامانه فتولتاییک-گرمایی برای گرمایش ساختمان، انرژی الکتریکی و حرارتی تولید شده به‌وسیله‌ی سامانه‌ی پیشنهادی قادر است تا 24 درصد در دی‌ماه و

بیش از 40 درصد منابع مختلف انرژی کشورها در ساختمان‌های مسکونی، اداری، آموزشی، تجاری و غیره مصرف می‌شود. به علت طراحی و استفاده نامناسب از این ساختمان‌ها و عدم نگهداری مناسب دستگاه‌های گرمایشی و سرمایشی آن‌ها، مقدار زیادی از انرژی ورودی به این ساختمان‌ها تلف می‌گردد. این اتلاف انرژی، علاوه بر از بین بردن منابع طبیعی کشورها باعث آلوده‌سازی هوای شهرها نیز است [1]. در معماری پایدار مصالح ساختمانی و انرژی مصرفی به گونه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که کمترین تأثیر منفی بر محیط‌زیست را با کمترین اتلاف منابع داشته باشند [2]. معماری پایدار نوعی از طراحی است که در طول چرخه‌ی حیات خود با سامانه‌های زیستی کره‌ی زمین هماهنگی کامل دارد. وضعیت جهان در آغاز قرن 21 میلادی، به یک توسعه ناپایدار گواهی می‌دهد که از مشخصه‌های آن رشد جمعیت، افزایش مصرف و توزیع نامتعادل منابع است.

با وجود اینکه منابع سوخت‌های فسیلی موجود، توان پاسخگویی به انرژی مورد نیاز را تا چند دهه‌ی آینده خواهند داشت، نباید پیامدهای استفاده غیر مدبرانه از آن‌ها مورد غفلت قرار گیرد. سوخت‌های فسیلی بزرگترین منبع انتشار گازهای گل‌خانه‌ای هستند. بر اثر مصرف سوخت‌های فسیلی، در سال 2015، 35/9 میلیارد تن انواع گازهای گل‌خانه‌ای منتشر شد که از این مقدار سهم انتشار دی‌اکسیدکربن 90/1 درصد، متان 9/1 درصد، اکسیدهای نیتروژن 0/8 درصد بود [3]. با توجه به پایان‌پذیر بودن عمر منابع ذخایر فسیلی (49/9 سال نفت، 49/8 سال گاز و 132 سال زغال‌سنگ [3]) و همچنین نگرانی‌های زیست‌محیطی، باران‌های اسیدی، گرمایش جهانی، ازدحام جمعیت، رشد اقتصادی و افزایش ضریب مصرف، نیاز به شناخت و استفاده از راه‌کارهای کاهش مصرف انرژی و بهره‌مندی از منابع جدید و پاک انرژی به صورت روزافزون احساس می‌شود.

صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌تواند از روش‌های مختلف انجام شود، اما یکی از موثرترین آن‌ها طراحی مناسب محیط‌های شهری و ساختمان‌ها بر اساس مقررات و استانداردهای تبیین شده هر منطقه با در نظر گرفتن الگوی مصرف انرژی است. از طرفی دیگر بهره‌مندی از منابع تجدیدپذیر و پاک هم گامی اساسی به سوی توسعه پایدار خواهد بود. یکی از پاک‌ترین، بهترین و در دسترس‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است. خورشید یک کره‌ی گازی است که بیش‌تر آن را هیدروژن تشکیل می‌دهد، این گاز منبع اصلی سوخت خورشید است که 6000 درجه سلسیوس حرارت سطحی و 15000 درجه سلسیوس حرارت در مرکز آن تولید می‌کند [4]. از انرژی خورشید می‌توان برای بهره‌مندی از توان‌های الکتریکی و حرارتی استفاده کرد.

فتولتاییک، فناوری تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته است. انرژی الکتریکی تولید شده در سامانه‌های فتولتاییک به دو روش متصل به شبکه<sup>۱</sup> و جدا از شبکه<sup>۲</sup> قابل بهره‌وری است. در روش متصل به شبکه برق تولید شده به طور مستقیم به شبکه سراسری توزیع برق متصل و تزریق می‌شود اما در روش جدا از شبکه برق تولید شده به‌وسیله‌ی سامانه فتولتاییک در مجموعه‌ای مانند باتری‌ها ذخیره شده و برای مصرف داخلی یک مجموعه به شکل جزیره‌ای استفاده می‌گردد. سلول‌های فتولتاییک در حین تبدیل نور خورشید به الکتریسیته بیشتر تابش دریافت شده را به گرما تبدیل می‌کنند

1. On grid  
2. Off grid

3. TRNSYS: A Transient System Simulation Program

شرایط اقلیمی منطقه طرح، مقررات ملی ساختمان و فضاها و مرزهای خروج انرژی از ساختمان، نیاز حرارتی ساختمان مدرسه، بازه زمانی فعالیت مدرسه و فضای موجود برای تعبیه‌ی سامانه‌ی خورشیدی، سامانه‌ی گرمایش خورشیدی از نوع فتوولتاییک-گرمایی طراحی شد. در گام بعد با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی ساختمان مدرسه و عمل-کرد سامانه‌ی خورشیدی، اقدام به ارزیابی و بررسی سامانه‌ی خورشیدی فتوولتاییک-گرمایی، با وارد کردن داده‌های مورد نیاز به نرم‌افزار گردید. نرم-افزار باتوجه به داده‌های ورودی از قبیل دمای آب ورودی و خروجی سامانه‌ی خورشیدی، مشخصات مدار گرمایشی، داده‌های اقلیمی و هواشناسی کار پردازش مولفه‌های مورد ارزیابی از قبیل دمای آب ورودی و خروجی سامانه‌ی خورشیدی، انرژی انتقال داده شده در مبدل‌های حرارتی، میانگین دمای ساختمان و انرژی الکتریکی تولید شده را به دو روش گرافیکی و عددی انجام داد. در نهایت با استفاده از داده‌های به دست‌آمده، تحلیل و بررسی سهم و کارایی سامانه‌ی خورشیدی فتوولتاییک-گرمایی برای گرمایش ساختمان مدرسه، تولید انرژی الکتریکی و نقش سامانه‌ی مورد بررسی در کاهش تولید و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی انجام شد.

### ۳-۱- شرایط اقلیمی، زمانی و آسایش

بررسی پتانسیل تابش خورشیدی مناطق مختلف ایران و تدوین نقشه پتانسیل خورشیدی توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) نشان می‌دهد که بخش‌های وسیعی از استان کرمان در محدوده جغرافیایی قرار دارند که دارای تابش خورشیدی زیاد هستند. تابش در این مناطق بین 5/2 تا 5/4 کیلووات ساعت بر مترمربع در روز است. این استان به طور متوسط 300 روز آفتابی در سال را تجربه می‌کند. لذا استان کرمان از امتیاز ویژه‌ای برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی بهره‌مند است. از این‌رو اقلیم شبیه‌سازی در شهرستان کرمان انتخاب شد. بازه زمانی برای مطالعه‌ی عمل‌کرد سامانه‌ی گرمایشی، در ساعات‌های فعالیت آموزشی مدرسه از ماه آذر تا اسفند که ماه‌های سرد سال در اقلیم مورد نظر هستند در نظر گرفته شد. برای تأمین آسایش حرارتی در ساختمان مدرسه دمای 17 تا 18 درجه سلسیوس مطلوب است [12].

### ۳-۲- ساختمان مدرسه:

عرصه‌های موجود در مجموعه مدرسه به 4 گروه آموزشی، اداری، خدماتی و ورزشی و تفریحی دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به ضریب ناخالص (5/4 مترمربع به ازای هر دانش‌آموز) و تعداد 720 دانش‌آموز، زیربنای ناخالص مدرسه 3900 مترمربع طراحی شد [11]. مشخصات فنی فضای ساختمان مدرسه در جدول 1 آورده شده‌است.

جدول 1 فضاهای ساختمان مدرسه [11]	
بخش	مقدار
زیر بنای ساختمان	3900 مترمربع
دیوارهای خارجی	1466 مترمربع
سطح پنجره‌ها	600 مترمربع
سقف	2600 مترمربع
محیط طبقه همکف	390 متر
درهای بازشو	49 مترمربع
محیط‌های کنترل نشده	99 مترمربع

30 درصد در بهمن‌ماه انرژی گرمایی مورد نیاز ساختمان را تأمین کند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد سامانه‌ی فتوولتاییک-گرمایی سالانه توان تولید 9/5 مگاوات ساعت انرژی الکتریکی پاک بدون انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی را دارد که منجر به کاهش تولید 1150 کیلوگرم دی-اکسیدکربن در بهمن‌ماه و 920 کیلوگرم در دی‌ماه خواهد شد [9].

بررسی شرایط اقلیمی و محیطی نشان‌دهنده تأثیرپذیر بودن کارایی سامانه‌های خورشیدی از شرایط محیط و اقلیم است. نتایج تحقیقی که بر روی کارایی یک سامانه‌ی فتوولتاییک-گرمایی برای گرمایش یک ساختمان مسکونی با شرایط یکسان فنی و طراحی در سه اقلیم مختلف در شهرهای کرمان، مشهد و تبریز با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس انجام شد، نشان داد که کرمان با توجه به ارتفاع، عرض جغرافیایی، میانگین دما و تعداد روزهای آفتابی شرایط بهتری را برای اجرای سامانه‌های فتوولتاییک-گرمایی دارد [10]. نتایج در پژوهشی دیگر که در شهر کرمان برای مدیریت مصرف انرژی ساختمان یک مدرسه 24 کلاس با رعایت الگوهای مختلف مصرف انرژی از منظر مقررات ملی ساختمان ایران برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در محیط نرم‌افزار ترنسیس انجام شد، نشان داد انتخاب مصالح و روش اجرای ساختمان در مقدار مصرف انرژی و تلفات حرارتی ساختمان تأثیر زیادی دارد. این نتایج نشان داد بیش‌ترین تلفات حرارتی گروه‌های 1، 2 و 3 ساختمان در سردترین ماه سال به مقدار 23/5، 20/4 و 16/2 گیگاژول-ساعت خواهد بود. با در نظر گرفتن گروه 1 محث 19 مقررات ملی ساختمان نسبت به گروه 3 این امکان وجود خواهد داشت که بیش از 30 درصد در مصرف انرژی صرفه-جویی شود. صرفه‌جویی به وجود آمده باعث کاهش تولید بیش از 26/5 تن دی‌اکسیدکربن در نتیجه رعایت الزام‌های گروه 1 ساختمان در مقابل رعایت کردن الزام‌های گروه 3 ساختمان خواهد شد [11].

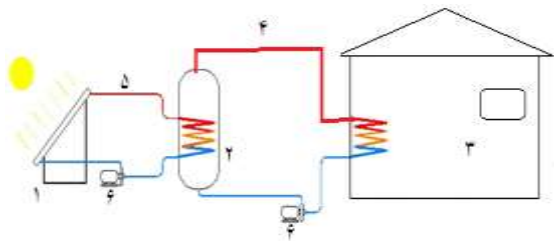
از میان تمامی پروژه‌های معماری که می‌بایست طراحی شوند هیچ‌یک به اندازه طراحی مدرسه نمی‌تواند جذاب و مهم باشد، چراکه مدرسه مهم‌ترین مکان اجتماعی تأثیرگذار در یک جامعه است و کودکان بیش‌ترین زمان خود را در مدرسه می‌گذرانند تا به بالندگی برسند. پس فضای مدرسه بیش‌ترین تأثیر را بر رشد و بالندگی آن‌ها دارد، از این‌رو بررسی فضاهای آموزشی در جهت برآوردن اهداف آموزشی دلخواه و ایده‌آل دارای اهمیت است. با نهادینه شدن فرهنگ استفاده صحیح مصرف انرژی می‌توان کمک زیادی به بحران-های زیست‌محیطی کرد. سال‌های اول آموزش به افراد می‌تواند نقش به‌سزایی در شکل گرفتن یک فرهنگ داشته باشد. استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی در محیط‌های آموزشی علاوه بر تأمین انرژی مورد این ساختمان‌ها که فراوانی گسترده و مصرف انرژی بالایی دارند تأثیر فراوانی در نشان دادن اهمیت بالا و نقش موثر این امر به کاربران آن محیط به شکل عملی دارد.

از این‌رو پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی و بررسی عمل‌کرد یک سامانه‌ی خورشیدی فتوولتاییک-گرمایی برای کمک به تأمین انرژی گرمایی مورد نیاز ساختمان یک مدرسه شکل گرفت. کاهش تولید و انتشار آلاینده-های زیست‌محیطی هوا از قبیل گازهای گل‌خانه‌ای در نتیجه کاهش نیاز به مصرف سوخت‌های فسیلی برای گرمایش ساختمان مدرسه، به همراه هزینه-های اجتماعی طرح از اهداف مورد بررسی در تحقیق هستند.

### ۳- روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا یک مدرسه که ساختمان آن با در نظر گرفتن استاندارد-های طراحی و مطالعه‌ی منابع کتابخانه‌ای و استخراج سرانه‌ی آموزشی ساختمان مدرسه طراحی شده‌است، در نظر گرفته شد. سپس با توجه به

گرمایش سیال در حال گردش در مدار سامانه مرسوم گرمایشی ساختمان شده و باعث کاهش انرژی مورد نیاز سامانه گرمایشی مرسوم خواهد شد. گرم‌کن‌های بکار رفته در مخازن ذخیره سیال و مبدل‌ها، دمای سیال ذخیره شده و گرم‌شده به وسیله‌ی صفحه‌های جمع‌کننده خورشیدی را در مواقع افت شدید دما و زمان‌هایی که سامانه‌ی خورشیدی امکان پیش‌گرمایش سیال سامانه‌ی مرسوم را به مقدار کافی ندارد به دمای مطلوب می‌رساند. سیال عامل در این مدار به وسیله‌ی یک پمپ هنگامی که دمای ساختمان کم‌تر از مقدار تعریف‌شده شود، فعال می‌گردد و به چرخش در می‌آید. در این حلقه یک سامانه‌ی کنترلی قرار گرفته که با مقایسه‌ی دمای متوسط ساختمان با مقدار تعیین‌شده، در صورتی که دمای ساختمان از دمای مطلوب کم‌تر باشد، پمپ را روشن می‌کند. در طرح حاضر، سعی بر آن شد تا با قرار دادن سامانه‌ی گرمایش خورشیدی و تأمین توان حرارتی مورد نیاز به وسیله‌ی انرژی خورشید، مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی هوا کاهش یابد. در شکل 2 طرح‌واره‌ی از سامانه‌ی گرمایشی پیشنهادی نشان داده شده‌است. سمت راست شکل مربوط به مدار گرمایش مرسوم ساختمان و قسمت سمت چپ نشان دهنده‌ی سامانه‌ی گرمایش خورشیدی هست.



شکل 2 طرح‌واره سامانه‌ی گرمایش خورشیدی پیشنهادی<sup>1</sup>

در جدول 2 مشخصات و المان‌های بکار رفته برای شبیه‌سازی هر یک از تجهیزات سامانه‌ی گرمایش در نرم افزار نشان داده شده‌است.

جدول 2 مشخصات المان‌های بکار رفته در نرم‌افزار

تجهیزات	مشخصات فنی	المان نرم‌افزار
پنل فتوولتائیک-گرمایی	40 کیلووات، 400 مترمربع	Type 50b
گرم‌کن الکتریکی مخازن	دمای مطلوب 60 درجه سلسیوس	Type 6
مبدل حرارتی سامانه	ظرفیت 13/2 مترمکعب	Type 4
پمپ سامانه خورشیدی	دبی 330 لیتر بر ساعت	Type 3b
پمپ سامانه مرسوم	دبی 10,000 لیتر بر ساعت	Type 3b
منطقه جغرافیایی	کرمان	Type 109

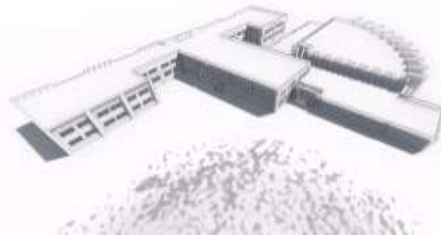
#### ۴-۳- نرم‌افزار

نرم‌افزار ترنسیس توانایی شبیه‌سازی سامانه‌های تهویه مطبوع و گرمایش ترکیب شده با انرژی‌های تجدیدپذیر از قبیل انرژی‌های خورشیدی و باد و

1. جمع‌کننده‌های خورشیدی، 2. مخازن دارای گرم‌کن‌های الکتریکی ذخیره‌کننده‌ی آب 3. ساختمان مدرسه، 4. مدار گرمایش ساختمان مدرسه، 5. مدار گرمایش خورشیدی، 6. پمپ‌ها

برای افزایش فرصت استفاده از نور طبیعی روز طرح ساختمان مدرسه روی یک محور شرقی-غربی در نظر گرفته شده است، بیش‌تر فضاها رو به جنوب است. این امر نه تنها منجر به کاهش انرژی الکتریکی مورد نیاز برای روشنایی واحد آموزشی می‌شود بلکه با دریافت انرژی گرمایی منجر به کاهش نیاز گرمایی ساختمان نیز خواهد شد. به همین منظور جدارهای نورگذر رو به جنوب افزایش و رو به غرب به حداقل ممکن کاهش یافته‌اند.

سطوح باریک و طولانی برای بهره‌مندی از نور خورشید به مراتب بهتر از سطوح مربعی شکل هستند، به این منظور ساختمان مدرسه کشیده و باریک و در امتداد شرقی-غربی طراحی شد. همچنین شکل کشیده رو به جنوب ساختمان فضای مناسبی را برای نصب صفحه‌های فتوولتائیک-گرمایی فراهم می‌کند. شکل 1 طرح ساختمان مدرسه را نشان می‌دهد.



شکل 1 طرح ساختمان مدرسه [11]

رفتار حرارتی مدرسه مورد نظر، قبل‌تر با رعایت الگوهای مختلف مصرف انرژی از منظر مقررات ملی ساختمان ایران ارزیابی و اعتبارسنجی شده است [11].

#### ۳-۳- سامانه‌ی خورشیدی

برای گرم کردن ساختمان، استفاده از یک سامانه‌ی گرمایش خورشیدی مجهز به جمع‌کننده‌های خورشیدی فتوولتائیک-گرمایی آبی پیشنهاد شد، این سامانه در زمان‌هایی که تابش خورشید وجود دارد سیال در گردش مدار سامانه‌ی گرمایشی مرسوم ساختمان مدرسه را قبل از ورود به سامانه-گرمایشی مرسوم در مبدل‌های حرارتی پیش‌گرم می‌کند و باعث کاهش انرژی مورد نیاز سامانه گرمایشی مرسوم می‌شود. در زمان‌هایی که تابش خورشید وجود ندارد و یا دمای سیال موجود در مدار سامانه‌ی خورشیدی و مبدل‌های آن از دمای سیال سامانه‌ی گرمایشی مرسوم کم‌تر است، امکان پیش‌گرمایش سیال وجود ندارد و سامانه‌ی مرسوم انرژی بیش‌تری نسبت به زمانی که مدار سامانه‌ی خورشیدی فعال است برای گرمایش ساختمان مدرسه نیاز دارد که منجر به کاهش میانگین سهم سامانه‌ی خورشیدی در گرمایش ساختمان مدرسه خواهد شد.

برای استفاده از بیش‌ترین توان تابشی خورشید، سطح جمع‌کننده‌های خورشیدی فتوولتائیک-گرمایی بر اساس فضای قابل دسترس در بالای بام طبقه اول ساختمان مدرسه در نظر گرفته شد. با توجه به فضای موجود می‌توان از یک سامانه با توان 40 کیلووات استفاده کرد. سطح صفحه‌های جمع‌کننده خورشیدی مورد نیاز 400 مترمربع است که برای اجرای این طرح و چیدمان مفید آن‌ها به شکلی که بر روی هم سایه افکنی نکنند و باعث کاهش کارایی نشوند به فضایی حدود 800 مترمربع نیاز است. انرژی حرارتی خورشید در زمان‌هایی که تابش خورشید وجود دارد به وسیله‌ی جمع‌کننده‌ها جذب شده و به آب در حال گردش در مدار جمع‌کننده منتقل می‌شود. در ادامه، انرژی حرارتی این مدار، به وسیله‌ی مبدل‌های حرارتی، موجب پیش-

به منظور تحلیل حرارتی ساختمان مدرسه و نیاز گرمایی آن مولفه‌هایی از قبیل مرزهای ورود و خروج انرژی، جنس مصالح به کار برده شده و اختلاف دمای داخل و بیرون ساختمان در نظر گرفته شده‌اند. مرزهای خروج انرژی شامل کف، سقف، دیوارهای خارجی ساختمان، پنجره‌ها و درب‌ها و فضاهای کنترل نشده مورد نظر هستند. جنس مصالح در سه حالت شامل: گروه 3 (ساختمان‌های با صرفه‌جویی کم در مصرف انرژی)، گروه 2 (ساختمان‌های ملزم به صرفه‌جویی متوسط در مصرف انرژی) و گروه 1 (ساختمان‌های ملزم به صرفه‌جویی زیاد در مصرف انرژی) مبحث 19 مقررات ملی ساختمان بررسی شدند. دمای محیط در سردترین حالت ممکن 5- درجه سلسیوس با توجه به شبیه‌سازی انجام شده در نظر گرفته‌شد.

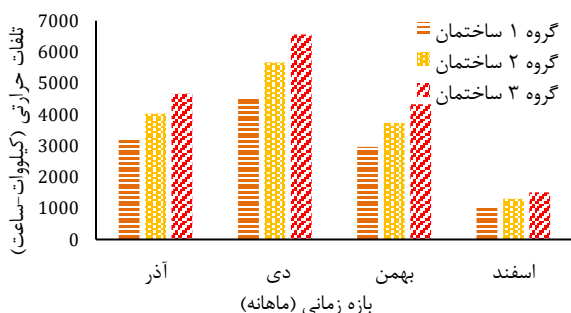
تلفات حرارتی ساختمان مدرسه با استفاده از رابطه‌ی (1) محاسبه می‌شود [13].

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

که در آن A مساحت مرزهای خروج انرژی بر اساس جدول 1،  $\Delta T$  اختلاف دمای داخل و بیرون ساختمان در سردترین زمان و U ضریب مقاومت حرارتی مرزهای خروج انرژی است. انرژی مصرفی به‌وسیله‌ی ساختمان در یک فاصله زمانی، برحسب کیلووات-ساعت از رابطه (2) به دست می‌آید [14].

$$E = \int Q dt \quad (2)$$

که در آن E انرژی مصرفی ساختمان در یک بازه زمانی مشخص و Q بار گرمایی مورد نیاز ساختمان در هر ساعت است. بیش‌ترین تلفات حرارتی برای گروه‌های 1، 2 و 3 ساختمان مدرسه در نظر گرفته‌شده در دی‌ماه به عنوان سردترین ماه سال به مقدار 6561/6، 5662/7 و 4494/7 کیلووات-ساعت است. اختلاف تلفات حرارتی گروه‌های 3 و 1 ساختمان برای سردترین ماه سال 2066/9 کیلووات-ساعت برآورد شد. مقدار تلفات حرارتی در گروه 3، 32 درصد بیش‌تر از گروه 1 خواهد بود [11]. به همین منظور برای شبیه‌سازی و بررسی عمل‌کرد سامانه‌ی گرمایش خورشیدی فتوولتائیک-گرمایی در تأمین بار حرارتی مورد نیاز ساختمان مدرسه در شرایط ایده‌آل و بهترین کارایی از الگوی مصرف انرژی گروه 1 مبحث 19 مقررات ملی ساختمان استفاده شد. شکل 4 نشان‌دهنده تلفات حرارتی گروه‌های مختلف ساختمان در ماه‌های سرد سال است [11].

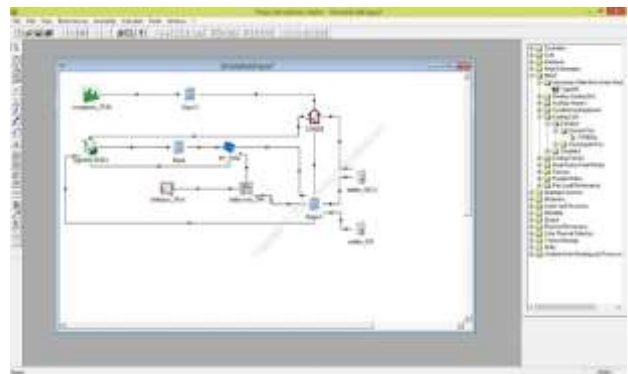


شکل 4 گرمای تلف‌شده از گروه‌های مختلف ساختمان در زمان فعالیت مدرسه [11]

3-7- شبیه‌سازی مدل مصرف انرژی و مدل تأمین انرژی ساختمان مدرسه در نرم‌افزار

به‌منظور تحلیل عمل‌کرد سامانه‌ی گرمایش خورشیدی پیشنهادی، شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار ترنسسیس انجام شد. نرم‌افزار در این قسمت به سه

همچنین انواع سامانه‌های مرسوم موجود در بازار از قبیل چیلرهای آبی و هوایی، روف تاپ پکیج‌های انبساط مستقیم، هواسازها، برج‌های خنک‌کننده، سامانه‌های سرمایش تبخیری نظیر ایرواشرها همراه با کانال کشی و لوله‌کشی‌های مربوطه‌شان را در نرم‌افزار دارد. همچنین شرایط آب و هوایی شهرهای مختلف جهان در این ابزار موجود است. از این نرم‌افزار می‌توان برای طراحی ساختمان‌های سبز<sup>1</sup> استفاده کرد. این نرم‌افزار از جمله محدود نرم‌افزارهایی هست که قادر به محاسبه‌گذاری<sup>2</sup> بار سرمایش و گرمایشی ساختمان است. تمامی جزئیات مورد نیاز برای مدل کردن ساختمان در این ابزار دیده شده‌است. برای این منظور تمامی استانداردها و جزئیات مورد نیاز برای طراحی و محاسبه بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان از قبیل استانداردهای کشورهای ژاپن، فرانسه و آلمان موجود می‌باشد. این ابزار توسط آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه ویسکونسن آمریکا<sup>3</sup> ارائه شده است. تصویری از محیط نرم‌افزار به همراه کتابخانه آن در شکل 3 نشان داده شده‌است.



شکل 3 تصویری گرافیکی از محیط نرم‌افزار

### 3-5- روش شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی تأمین و مصرف انرژی ساختمان، ابتدا باید مصرف انرژی ساختمان محاسبه شود. برای این کار دو روش وجود دارد. در روش اول با توجه به محیط نرم‌افزار با مدل کردن قسمت‌های مختلف ساختمان درون نرم‌افزار و اعمال مولفه‌هایی از قبیل دمای آرامش و دمای محیط مقدار انرژی مورد نیاز ساختمان محاسبه خواهد شد. در روش دیگر می‌توان با استفاده از معادله‌های انتقال حرارت مکانیک و ضریب انتقال حرارت اجزای مختلف ساختمان، سطح مقطع و اختلاف دمای داخل و بیرون ساختمان به نیاز حرارتی ساختمان دست یافت و ضریب تلفات ساختمان را محاسبه کرد، که یکی از مولفه‌های ورودی به نرم‌افزار است. در این تحقیق برای محاسبه اتلاف انرژی در ساختمان مدرسه روش استفاده از معادله انتقال حرارت و برای بررسی عمل‌کرد سامانه‌ی خورشیدی فتوولتائیک-گرمایی و کارایی آن در تأمین گرمای مورد نیاز ساختمان مدرسه روش شبیه‌سازی با ورود مولفه‌های مورد نیاز به نرم‌افزار انجام شد.

### 3-6- تعیین نیاز حرارتی ساختمان مدرسه با استفاده از معادله‌های انتقال حرارت

1. Green Buildings  
2. Transient  
3. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA

### ۳-۷-۳- مدل مصرف انرژی ساختمان مدرسه

در این قسمت با استفاده از گزینه پروژه ساختمانی<sup>۸</sup> نرم‌افزار می‌توان با وارد کردن و بازسازی قسمت‌های مختلف ساختمان پرداخته و یا با انتخاب گزینه ذخیره‌ساز حرارتی<sup>۹</sup> و وارد کردن داده‌های بدست‌آمده از معادله انتقال حرارت، تلفات حرارتی در ساختمان را مدل کرد.

برای استفاده از گزینه‌ی ذخیره‌ساز حرارتی پس از انتخاب گزینه‌ی مد-نظر از کتاب‌خانه نرم‌افزار و کلیک بر روی گزینه مدل در قسمت مولفه می‌توان مولفه‌های مدنظر از قبیل فضای ساختمان، تلفات حرارتی، چگالی و گرمای ویژه سیال عامل را وارد کرد. شکل 7 نمایی از تنظیمات صفحه‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل 7 مراحل مدل‌سازی مصرف انرژی ساختمان مدرسه

### ۳-۸- مولفه‌های مورد اندازه‌گیری

پس از طراحی سامانه‌ی گرمایشی در نرم‌افزار ترنسیس، آزمایش‌های مربوط به شبیه‌سازی عمل کرد آن‌ها انجام شد. مولفه‌های اندازه‌گیری شده در هر آزمایش، شامل دمای آب ورودی و خروجی از جمع‌کننده‌های خورشیدی و انرژی الکتریکی تولیدی به‌وسیله‌ی سامانه، دمای آب ورودی و خروجی گرم-کن و مبدل به همراه دمای آب ورودی و خروجی مخزن سامانه‌ی گرمایش ساختمان، دبی پمپ‌های موجود در سامانه و انرژی مصرف‌شده به‌وسیله‌ی گرم‌کن هستند. داده‌ها در فاصله‌های زمانی یک ساعته برای تمام طول ماه‌های مورد ارزیابی ثبت و به‌صورت گرافیکی و عددی نمایش داده شدند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کاری برای هر جمع‌کننده‌ی گرمایی خورشیدی، توان حرارتی تولیدی آن است. برای محاسبه توان حرارتی تولیدی جمع‌کننده، از رابطه‌ی (3) استفاده می‌شود [15].

$$Q_s = m_1 \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

که در این رابطه  $Q_s$  توان حرارتی تولیدی جمع‌کننده خورشیدی،  $m_1$  دبی جرمی سیال عبوری از مبدل،  $C_p$  گرمای ویژه سیال،  $T_2$  دمای آب خروجی از مبدل و  $T_1$  دمای آب ورودی به مبدل هستند. مجموع انرژی تولیدی به‌وسیله‌ی جمع‌کننده‌های خورشیدی در یک فاصله زمانی مشخص با رابطه (4) تعیین خواهد شد [15].

$$E_s = \int Q_s dt \quad (4)$$

که در آن  $E_s$  انرژی حرارتی تولیدی به وسیله‌ی جمع‌کننده و  $dt$  فاصله‌های زمانی ثبت داده‌ها هستند. سهم خورشیدی (SF) بیانگر بخشی از

8. Building project  
9. Thermal storage

گروه اصلی تقسیم می‌شود: داده‌های آب و هوایی، مدل سامانه‌ی خورشیدی، مدل مدرسه و مبدل‌های حرارتی که کار انتقال حرارت از سامانه‌ی خورشیدی به مدرسه را انجام می‌دهند. این آیت‌ها از بخش کتاب‌خانه<sup>۱</sup> نرم‌افزار باز خوانی می‌شوند و مولفه‌های مورد نیاز با توجه به طراحی به آن‌ها اعمال می‌شود.

### ۳-۷-۱- داده‌های آب و هوایی

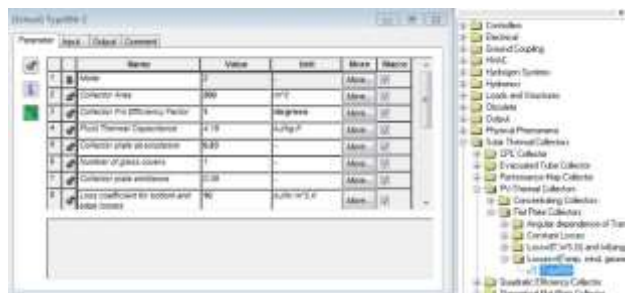
برای انتقال داده‌های آب و هوایی به محیط نرم‌افزار ابتدا از طریق نوار ابزار سمت راست که مرتبط با محیط کتاب‌خانه نرم‌افزار است از طریق گزینه خواندن و پردازش اطلاعات آب و هوایی<sup>۲</sup> و زیر مجموعه فرمت استاندارد<sup>۳</sup> یکی از گزینه‌های داده‌های استاندارد انتخاب می‌شود و سپس با کلیک راست به روی آیت مربوطه در محیط نرم‌افزار و انتخاب گزینه فایل خروجی<sup>۴</sup> از طریق دکمه مرورگر<sup>۵</sup> منطقه جغرافیایی مورد نظر انتخاب خواهد شد. شکل 5 مراحل انتخاب منطقه جغرافیایی و اطلاعات آب و هوایی را نشان می‌دهد.



شکل 5 داده‌های آب و هوایی

### ۳-۷-۲- سامانه‌ی خورشیدی

مدل کردن سامانه‌ی خورشیدی با انتخاب صفحه‌های جمع‌کننده مد نظر از قسمت کتاب‌خانه با انتخاب گزینه جمع‌کننده‌های خورشیدی حرارتی<sup>۶</sup> و برگزیدن یکی از انواع صفحه‌های خورشیدی بسته به نوع کاربری آن که در مشخصات فنی آن‌ها مشخص شده است، شروع می‌شود. سپس با کلیک بر روی آیکون مدل مورد نظر در صفحه نرم‌افزار انتخاب گزینه مولفه<sup>۷</sup>، مولفه‌های مورد نیاز را وارد کرده که شامل اندازه سطح پنل‌ها، گرمای ویژه سیال عامل، تلفات حرارتی صفحه‌های خورشیدی، زاویه‌ی قرارگیری نسبت به افق و... هستند. شکل 6 نمایی از تنظیمات صفحه‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل 6 نمایی از تنظیمات صفحه‌های خورشیدی

1. Library
2. Weather data reading and processing
3. Standard format
4. External file
5. Browse
6. Solar Thermal collectors
7. Parameter



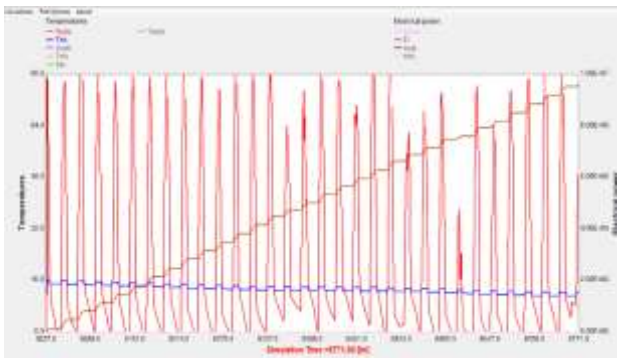
۳-۹-۱- هزینه اجتماعی ناشی از انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی هوا از جمله مهمترین آثار کاهش مصرف انرژی کاهش هزینه کربن و سایر گازهای گل‌خانه‌ای در طول دوره بهره‌برداری است. هزینه انتشار آلاینده‌ها در گروه هزینه‌های ملموس ولی غیر قابل اندازه‌گیری دسته‌بندی می‌گردد. علت چالش‌برانگیز بودن محاسبه هزینه‌ها پیچیدگی فرآیند ارزش‌گذاری بر روی کالاهای زیست‌محیطی به دلیل دشواری محاسبه قیمت واقعی آنها است [18]. هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی هوا بر اساس نرخ ارز خردادماه سال 1401 (1دلار = 270,000 تومان) در جدول 4 آورده شده‌است [19, 20].

**جدول 4** هزینه‌های اجتماعی انتشار آلاینده‌ها، (هزار ریال بر کیلوگرم) [19, 20]

ترکیب‌های نیتروژن‌دار	ترکیب‌های گوگرددار	دی‌اکسید کربن	مونوکسید کربن	متان	ریزگردها
684	2,080	11/4	213/75	239/4	4,902

#### ۴- نتایج و بحث

نمونه‌ای از نتایج گرافیکی تحلیل سامانه‌ی گرمایش پیشنهادی به‌وسیله‌ی نرم‌افزار، در شکل 8 مشاهده می‌گردد. این شکل مربوط به بررسی عمل‌کرد سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی در آذرماه است و تغییرات دمای ورودی و خروجی جمع‌کننده در سامانه‌ی گرمایش را نشان می‌دهد (محور قائم سمت چپ)، خط پایین درجه حرارت آب ورودی به جمع‌کننده‌های خورشیدی است که پس از گرمایش با دمای نشان داده شده به شکل منحنی متغییر وارد مبدل‌های حرارتی می‌شود. نمودار محور سمت راست انرژی الکتریکی تولید شده به شکل تجمعی را در ساعات مختلف آذرماه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، دمای آب خروجی از جمع‌کننده‌های فتوولتائیک-گرمایی امکان افزایش تا 80 درجه‌ی سلسیوس را دارد.



شکل 8 نتایج گرافیکی تحلیل سامانه‌ی گرمایش خورشیدی

شکل 9 نمونه‌ای از داده‌های ثبت شده به صورت عددی از نرم‌افزار است. مولفه‌های مورد ارزیابی در تحقیق شامل انرژی گرمایی تولیدشده در جمع‌کننده‌های خورشیدی، مجموع گرمای مصرفی ساختمان و توان تولیدی سامانه‌ی خورشیدی هستند.

مجموع انرژی مصرفی است که به وسیله‌ی جمع‌کننده‌های خورشیدی تأمین می‌شود. برای محاسبه سهم خورشیدی (درصد) از رابطه (5) استفاده می‌شود [15, 16].

$$SF = \frac{E_s}{E_s + E_h} \quad (5)$$

که در آن  $E_h$  گرمای مصرف شده به‌وسیله‌ی گرم‌کن الکتریکی است که به‌طور مستقیم به‌وسیله‌ی نرم‌افزار محاسبه و ثبت می‌شود. کارایی سامانه خورشیدی از رابطه (6) محاسبه شد [15].

$$\eta_s = \frac{Q_{TS}}{Q_s} \quad (6)$$

که در آن  $\eta_s$  کارایی سامانه خورشیدی و مبدل‌های آن،  $Q_{TS}$  انرژی گرمایی منتقل شده در مبدل حرارتی از سیال سامانه‌ی خورشیدی به سیال عامل در مدار سامانه گرمایشی مرسوم و  $Q_s$  انرژی گرمایی دریافت شده در صفحه‌های خورشیدی است که با استفاده از رابطه (3) محاسبه شد. با دانستن مقدار انرژی الکتریکی تولیدشده در سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی برحسب کیلووات ساعت و مقدار انرژی الکتریکی مصرفی سامانه‌ی گرمایش مرسوم (گرم‌کن کمکی) سهم برق خورشیدی در تأمین انرژی مورد نیاز گرمایش ساختمان قابل محاسبه خواهد بود. همچنین با توجه به عدم نیاز ساختمان به گرمایش در فصل‌های گرم و عدم کاربری ساختمان از برق تولید شده می‌توان برای تأمین برق سامانه‌ی سرمایشی به روش جدا از شبکه و یا توزیع به شبکه برق به روش اتصال به شبکه استفاده کرد.

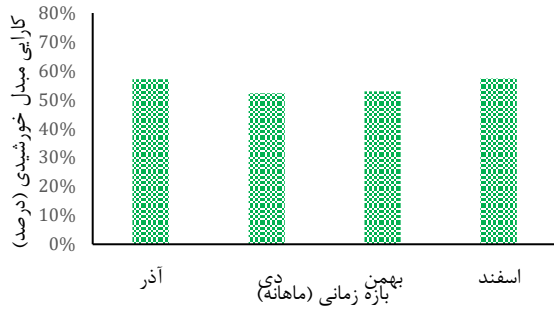
سامانه‌ی گرمایش فتوولتائیک-گرمایی علاوه بر این که با تأمین بخشی از حرارت موردنیاز و صرفه‌جویی در مصرف برق، موجب کاهش تولید و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی هوا می‌شود، با تولید انرژی الکتریکی و تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز مدرسه، کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی را به دنبال دارد. از آنجاکه به ازای تولید هر کیلووات-ساعت انرژی در نیروگاه‌های حرارتی به‌طور متوسط مقدار مشخصی آلاینده تولید و منتشر می‌شود، با دانستن مقدار انرژی الکتریکی تولیدشده در سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی برحسب کیلووات-ساعت و کاهش مصرفی سوخت‌های فسیلی سامانه مرسوم، مقدار کاهش انتشار آلاینده‌های زیست-محیطی هوا به‌وسیله‌ی این سامانه، قابل محاسبه خواهد بود.

#### ۳-۹- تحلیل زیست‌محیطی

جدول 3 مقدار متوسط آلاینده‌های منتشر شده برای تولید هر کیلووات ساعت انرژی در سال‌های اخیر ایران را نشان می‌دهد [17]. تأمین بخشی از بار گرمایشی به‌وسیله‌ی سامانه‌ی پیشنهادی منجر به کاهش فعالیت سامانه‌ی مرسوم گرمایشی ساختمان و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شود. کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید و انتشار آلاینده‌ها را به دنبال خواهد داشت. با استفاده از جدول 3 و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آثار زیست‌محیطی بهره‌مندی از سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی محاسبه و برآورد می‌گردد.

**جدول 3** مقدار انتشار آلاینده‌های هوا به ازای هر کیلووات-ساعت انرژی مصرف‌شده (گرم بر کیلووات ساعت) [17]

ترکیب‌های نیتروژن‌دار	ترکیب‌های گوگرددار	دی‌اکسید کربن	مونوکسید کربن	متان	ریزگردها
0/906	0/906	598/3	0/001	0/024	0/088



شکل 11 کارایی مبدل‌های حرارتی

نتیجه‌ی روی‌کرد طرح کاهش و یا در صورت امکان حذف مصرف سوخت‌های فسیلی برای گرمایش ساختمان است. که دست‌آورد این کار کاهش تولید آلاینده‌های هوا خواهد بود. در جدول 5 مقدار کاهش تولید آلاینده‌های هوا به علت بار حرارتی سامانه فتوولتاییک-گرمایی آورده شده است. این نتایج با توجه به مقدار تولید گازهای گل‌خانه‌ای در ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی (جدول 3) حاصل شد. نتایج نشان داد با استفاده از یک سامانه خورشیدی از نوع فتوولتاییک-گرمایی برای تأمین گرمای مورد نیاز ساختمان مدسه، امکان کاهش انتشار حدود 9196 کیلوگرم آلاینده‌های هوا در یک بازه زمانی 4 ماهه در دوره سرد سال شهر کرمان وجود دارد.

جدول 5 کاهش تولید آلاینده‌های هوا به علت بار حرارتی سامانه فتوولتاییک-گرمایی در ماه‌های سرد سال (کیلوگرم)

بازه زمانی	ترکیب‌های نیتروژن‌دار	ترکیب‌های گوگرددار	دی‌اکسید کربن	منوکسید کربن	متان	ریز-گردها
آذر	4/23	4/23	2793/46	0/005	0/11	0/41
دی	4/37	4/37	2885/01	0/005	0/12	0/42
بهمن	3/92	3/92	2587/65	0/004	0/10	0/38
اسفند	1/36	1/36	901/04	0/002	0/04	0/13

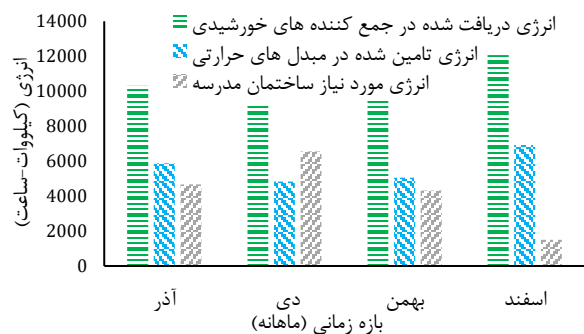
در شکل 12 مقدار انرژی الکتریکی تولید شده به‌وسیله‌ی جمع‌کننده‌های فتوولتاییک-گرمایی در یک بازه زمانی سالانه نشان داده شده است. این مقادیر از خروجی نرم‌افزار و با توجه به شبیه‌سازی انجام شده در قسمت فتوولتاییک مجموعه خورشیدی استنتاج شد. بیش‌ترین انرژی الکتریکی تولید شده مربوط به مرداد ماه با 7/38 مگاوات-ساعت و کم‌ترین آن مربوط به مهرماه 4/58 مگاوات-ساعت است. اختلاف 33 درصدی در تولید انرژی الکتریکی در این ماه‌ها به علت کاهش ساعت‌های آفتابی در نیمه دوم سال در مقایسه با نیمه اول سال و شرایط آب و هوایی است. در ماه‌های آذر و دی بر خلاف این که میانگین ساعت تابش خورشیدی کم‌تر از مهرماه هست، تولید برق به علت کم‌تر بودن میانگین دما و کاهش تلفات حرارتی در این ماه‌ها در مقایسه با مهرماه بیش‌تر خواهد بود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، سامانه‌ی فتوولتاییک-گرمایی در نظر گرفته‌شده قادر است سالانه حدود 73 مگاوات ساعت انرژی الکتریکی تولید کند.

زمان	دمای مبدل‌کننده مدرسه	انرژی ورودی به مبدل حرارتی	انرژی خروجی از مبدل حرارتی	انرژی ورودی به مبدل حرارتی	انرژی خروجی از مبدل حرارتی
120	19/91	15/50	55/00	12/63	31/00
121	19/91	21/76	55/00	12/63	47/45
122	19/91	28/88	55/00	12/62	50/92
123	19/91	32/20	55/00	12/63	32/63
124	19/91	31/25	55/00	12/63	25/38
125	19/91	27/86	55/00	11/55	13/55
126	19/91	25/76	55/00	12/63	27/10
127	19/91	25/58	55/00	12/63	23/24
128	19/91	23/44	55/00	12/64	13/78
129	19/90	20/48	55/00	11/56	11/30

شکل 9 نمونه‌ای از نتایج عددی نرم‌افزار

سهم انرژی خورشیدی از مجموع انرژی گرمایی مصرفی ساختمان، به عوامل مختلفی مانند انرژی خورشیدی در دسترس، دمای محیط و کارایی حرارتی جمع‌کننده بستگی دارد [21]. در بازه زمانی مورد بررسی به جز دی-ماه سامانه‌ی فتوولتاییک-گرمایی قادر است 100 درصد نیاز حرارتی ساختمان مدرسه را با بهره‌گیری از توان حرارتی خود تأمین نماید. همچنین می‌توان با بهره‌گیری از گرم‌کن‌های الکتریکی موجود در مخازن ذخیره آب، 26 درصد کمبود انرژی تولید شده در دی‌ماه را به‌وسیله‌ی جمع‌کننده‌های خورشیدی جبران کرد.

در شکل 10 به مقایسه‌ی بین انرژی دریافت شده به‌وسیله‌ی جمع‌کننده‌های خورشیدی، انرژی انتقال داده شده در مبدل‌های حرارتی و گرمای مورد نیاز ساختمان مدرسه پرداخته شده است. همانطور که در شکل مشخص است مقدار انرژی تأمین شده در برخی از ماه‌ها بیش از نیاز گرمایی ساختمان مدرسه خواهد بود. با این حال طراحی به نحوی است که سامانه با بالاترین کارایی امکان تأمین نیاز حرارتی سردترین روزهای سال را داشته باشد، که نتیجه آن تأمین بیش از 41/1 مگاوات-ساعت انرژی مفید حرارتی در بازه زمانی شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی سامانه‌ی گرمایشی مجهز به جمع‌کننده‌ی فتوولتاییک-گرمایی خواهد بود. در شکل 11 کارایی حرارتی مبدل‌ها با توجه به گرمای دریافتی و خروجی مفید آن‌ها برای ساختمان مدرسه نمایش داده شده است. در ماه‌های دی و بهمن علاوه بر کاهش دما که منجر به افزایش تلفات حرارتی شده است، انرژی دریافت شده به‌وسیله‌ی جمع‌کننده‌های فتوولتاییک-گرمایی نیز به علت شرایط آب و هوا و وجود روزهای ابری بیش‌تر، در این ماه‌ها کمتر شده است. در نتیجه کارایی حرارتی سامانه نسبت به سایر ماه‌ها کاهش یافته است.



شکل 10 نمودار تولید انرژی



**جدول 7** مقدار سالانه‌ی کاهش تولید و انتشار آلاینده‌ها برای سامانه‌ی فتوولتائیک- گرمایی پیشنهادی به طور تجمعی از نقش توان‌های حرارتی و الکتریکی (کیلوگرم)

ریزگردها	متان	منوکسید کربن	دی‌اکسید کربن	ترکیب‌های گوگردار	ترکیب‌های نیتروژن‌دار
7/8	2/1	0/9	53010/7	80/3	80/3

هزینه‌های کاهش یافته به علت کاهش تولید و انتشار آلاینده‌ها در جدول 7 محاسبه و درج شده‌است. دی‌اکسیدکربن با توجه به بیش‌ترین مقدار وزنی که در بین آلاینده‌های هوا دارد (99/7 درصد)، بیش‌ترین سهم هزینه‌ای را نیز به خود اختصاص می‌دهد (69/8 درصد). ترکیب‌های گوگردار علی‌رغم سهم وزنی یکسانی که با ترکیب‌های نیتروژن‌دار دارند اما هزینه‌ای بیش از 3 برابر را دارند. ذرات معلق در هوا نیز از لحاظ وزنی 10 درصد ترکیب‌های نیتروژن هستند. اما از لحاظ هزینه‌ها وزن یکسانی خواهند داشت. در نهایت هزینه‌های اجتماعی کاهش یافته حدود 865 میلیون ریال (با توجه به نرخ ارز در تابستان 1401 [20]) برای بازه زمانی یک ساله محاسبه و برآورد شد.

**جدول 7** کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار آلاینده‌ها (هزار ریال)

ریزگردها	متان	منوکسید کربن	دی‌اکسید کربن	ترکیب‌های گوگردار	ترکیب‌های نیتروژن‌دار
38220	509	19	604322	166969	54907

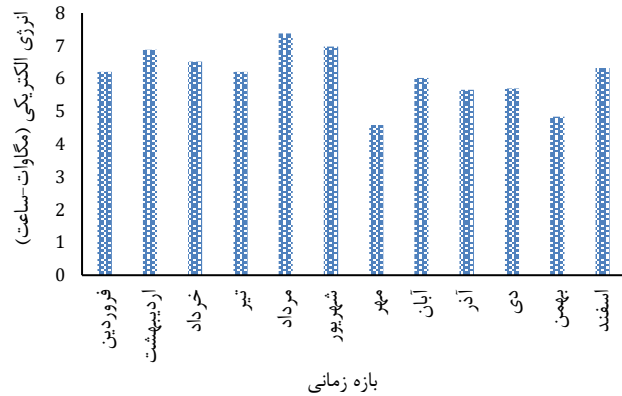
#### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی و بررسی رفتار حرارتی یک سامانه‌ی گرمایش خورشیدی فتوولتائیک-گرمایی که پیش‌گرمایش سیال سامانه‌ی گرمایشی مرسوم ساختمان یک مدرسه 24 کلاسه با زیر بنای 3900 مترمربع در شهر کرمان را با رعایت الگوی مصرف انرژی گروه 1 ساختمان انجام می‌دهد، نشان داد:

1. در تمام طول سال به جز دی‌ماه سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی پیشنهادی قادر است 100 درصد انرژی گرمایی مورد نیاز ساختمان مدرسه را با بهره‌گیری از توان حرارتی تأمین نماید.
2. مقدار انرژی تأمین شده در برخی مواقع بیش از نیاز انرژی گرمایی ساختمان مدرسه خواهد بود.
3. امکان تأمین بیش از 41/1 مگاوات-ساعت انرژی گرمایی مفید در بازه زمانی 4 ماه به‌وسیله‌ی سامانه‌ی گرمایشی مجهز به جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمایی وجود دارد.
4. کارایی سامانه‌ی خورشیدی در تأمین انرژی با توجه به انرژی دریافت شده از خورشید، بیش از 50 درصد مشاهده شد.
5. توان حرارتی سامانه‌ی خورشیدی باعث کاهش تولید و انتشار بیش از 9 تن آلاینده‌های هوا در یک بازه زمانی 4 ماهه فصل سرد سال می‌شود.
6. سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی در نظر گرفته‌شده قادر است سالانه حدود 73 مگاوات ساعت انرژی الکتریکی تولید کند.
7. بهره‌مندی همزمان از توان حرارتی و الکتریکی سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی سالانه منجر به کاهش تولید و انتشار بیش از 53 تن آلاینده‌ها هوا خواهد شد.

#### ۶- فهرست علائم

A	مساحت مرز خروج انرژی (m <sup>2</sup> )
C <sub>p</sub>	گرمای ویژه سیال (J/kg.K)
dt	فاصله‌های زمانی ثبت داده‌ها (h)



**شکل 12** انرژی الکتریکی تولید شده به‌وسیله‌ی سامانه‌ی فتوولتائیک-گرمایی

با ذخیره انرژی الکتریکی تولیدشده به‌وسیله‌ی سامانه‌ی فتوولتائیک- گرمایی در باتری، می‌توان برای مصارف داخلی ساختمان به روش جدا از شبکه از این برق استفاده کرد. یکی از راه‌های استفاده از انرژی الکتریکی تولید شده، تأمین برق مورد نیاز گرمکن‌های الکتریکی برای گرمایش ساختمان در ماه سرد سال است، موافقی که به علت برودت هوا و یا عدم تابش خورشید در شرایط هوای ابری، کارایی سامانه افت می‌کند. سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی همزمان قادر به تولید توان الکتریکی و حرارتی هستند، به همین علت برای بررسی تأثیر یک سامانه‌ی فتوولتائیک- گرمایی در کاهش آلاینده‌های هوا که یکی از آن‌ها دی‌اکسیدکربن است، باید مقدار آن را به صورت تجمعی از نقش الکتریکی و حرارتی سامانه در نظر گرفت. جدول 6 مقدار ماهانه‌ی کاهش تولید و انتشار آلاینده‌های هوا را با توجه به تأثیر توان الکتریکی تولید شده در 12 ماه سال و جدول 7 مقدار سالانه‌ی کاهش تولید و انتشار آلاینده‌های هوا را برای سامانه‌ی فتوولتائیک- گرمایی پیشنهادی به‌طور تجمعی از نقش توان الکتریکی در 12 ماه و توان حرارتی در 4 ماه را نشان می‌دهند. نتایج نشان داد این سامانه توانایی کاهش تولید و انتشار 53,181 کیلوگرم انواع آلاینده‌ها در بازه زمانی یک‌ساله را دارد که از این مقدار 53,010 کیلوگرم آن مربوط به دی‌اکسیدکربن است.

**جدول 6** مقدار ماهانه‌ی کاهش تولید و انتشار آلاینده‌های سامانه‌ی پیشنهادی با توجه به تأثیر توان الکتریکی تولید شده (کیلوگرم)

بازه زمانی	ترکیب‌های نیتروژن‌دار	ترکیب‌های گوگردار	دی‌اکسید کربن	منوکسید کربن	متان	ریز-گردها
فروردین	5/62	5/62	3709/46	0/006	0/15	0/55
اردیبهشت	6/23	6/23	4116/30	0/007	0/17	0/61
خرداد	5/91	5/91	3900/92	0/007	0/16	0/57
تیر	5/62	5/62	3709/46	0/006	0/15	0/55
مرداد	6/69	6/69	4415/45	0/007	0/18	0/65
شهریور	6/32	6/32	4176/13	0/007	0/17	0/61
مهر	4/15	4/15	2740/21	0/005	0/11	0/40
آبان	5/45	5/45	3601/77	0/006	0/14	0/53
آذر	5/13	5/13	3386/38	0/006	0/14	0/50
دی	5/16	5/16	3410/31	0/006	0/14	0/50
بهمن	4/39	4/39	2895/77	0/005	0/12	0/43
اسفند	5/73	5/73	3781/26	0/006	0/15	0/56
سالانه	67/30	67/30	44441/7	0/07	1/78	6/54

- 7<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, In Cooperation with Shiraz University, Maraghe University and University of Science and Technology of Iran, Tehran, Iran, 2021. (in Persian)
- [12] National Building Regulations (Chapter 19), Energy saving, 4<sup>th</sup> Edit., pp. 43-165, Office of National Building Regulations, Road, Housing and Urban Development Research Center, 2020. (in Persian)
- [13] M. KhalajiAsadi, Z. Asadi, and N. Sharei, Combined solar systems are a new solution for heating in buildings, *Environmental Science and Technology Quarterly*, vol. 11, no. 3, pp. 15-28, 2009. (in Persian)
- [14] A. Dang, A parametric study of swimming pool heating, *Energy Conversion and management*, vol. 26, no. 1, pp. 27-31, 1986.
- [15] J.-C. Hadom, Solar and heat pump systems for residential buildings. *John Wiley & Sons*, 2015.
- [16] E. Ampatzi, I. Knight, and R. Wiltshire, The potential contribution of solar thermal collection and storage systems to meeting the energy requirements of North European Housing, *Solar energy*, vol. 91, pp. 402-421, 2013.
- [17] Detailed statistics of Iran's electricity industry, especially for strategic management in 2018, Statistical report of water and electricity industry, The amount of pollutant released, 2019. (in Persian)
- [18] G. Heravi, M. Rostami, and M. Shekari, Evaluating the economic and environmental effects of intelligent cooling and heating management systems in buildings: a case study of an office building in Tehran, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, vol. 53, no. 2, pp. 14-14, 2021. (in Persian)
- [19] F. khodadadkashi, M. AkabariTafti, Y. MosaviJahromi, and A. Khosravinejad, Calculating the social cost of CO<sub>2</sub> emissions by different provinces in Iran, *Journal of energy planning and policy research*, vol. 2, no. 1, pp. 77-110, 2016. (in Persian)
- [20] Statistics of the Central Bank of Iran, Exchange rate, June 2022; <https://www.cbi.ir/>
- [21] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes* (no. 4). New York: Wiley-Interscience, 2006.

E	انرژی مصرفی ساختمان در یک بازه زمانی مشخص (kW/h)
E <sub>h</sub>	انرژی گرمایی مصرف شده به‌وسیله‌ی گرم‌کن (kW/h)
E <sub>s</sub>	انرژی حرارتی تولیدی به‌وسیله‌ی جمع‌کننده (kW/h)
m <sub>1</sub>	دبی جرمی سیال عبوری از مبدل (kg/s)
Q	بار گرمایی مورد نیاز ساختمان در هر ساعت (kW/h)
Q <sub>s</sub>	توان حرارتی تولیدی جمع‌کننده خورشیدی (W)
Q <sub>TS</sub>	انرژی گرمایی منتقل شده در مبدل‌های حرارتی (W)
SF	سهم خورشیدی (درصد)
T <sub>1</sub>	دمای آب ورودی به مبدل (°C)
T <sub>2</sub>	دمای آب خروجی از مبدل (°C)
ΔT	اختلاف دمای داخل و بیرون ساختمان (°C)
U	ضریب مقاومت حرارتی مرزهای خروج انرژی (kW/m <sup>2</sup> )
η <sub>s</sub>	کارایی سامانه خورشیدی و مبدل‌های حرارتی آن (درصد)
CH	متان
CO	مونوکسیدکربن
CO <sub>2</sub>	دی‌اکسیدکربن
NO <sub>x</sub>	ترکیب‌های نیتروژن‌دار
SO <sub>x</sub>	ترکیب‌های گوگرددار
SPM	ریزگردها

#### ۷- مراجع

- [1] M. Bahadori, H. Safarzadeh, *Designing a building that does not need fossil energy in Tehran (Green building)*, 2002. (in Persian)
- [2] R. Farjam, M. Soleymani, S. Tolaei, M. Rafeaian, and A. Movahed, Urban development based on the combination of uses; A review of its academic literature in Iran, *The scientific-research quarterly of research and urban planning*, vol. 4, no. 12, pp. 23-48, 2013. (in Persian)
- [3] *Iran's energy balance sheet*, 2019, pp. 8-25, Tehran: Electricity and energy planning and macroeconomics office- Ministry of Energy, 2021. (in Persian)
- [4] J. Kuhn, K. Libbrecht, and R. Dicke, The surface temperature of the sun and changes in the solar constant, *Science*, vol. 242, no. 4880, pp. 908-911, 1988.
- [5] B. Huang, T. Lin, W. Hung, and F. Sun, Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems, *Solar energy*, vol. 70, no. 5, pp. 443-448, 2001.
- [6] P. Dupeyrat, C. Menezes, and S. Fortuin, Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system, *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 751-755, 2014.
- [7] M. Kegel, J. Tamasauskas, and R. Sunye, Solar Thermal Trigenation System in a Canadian Climate Multi-unit Residential Building, *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 876-887, 2014.
- [8] M. Soltaninejad, H. Mortezaipoor, Comparison of the use of conventional solar water heaters and photovoltaic-thermal water heaters for swimming pool water heating in Kerman, in *proceeding of 7<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, In Cooperation with Shiraz University, Maraghe University and University of Science and Technology of Iran, Tehran, Iran, 2021. (in Persian)
- [9] M. Soltaninejad, Z. Soltanineja, and H. Mortezaipoor, Technical and Environmental analysis of using of photovoltaic thermal system for building heating, in *proceeding of The first international conference and the second national conference on agriculture, environment and food security*, Jiroft University, Jiroft, Iran, 2016. (in Persian)
- [10] Z. Soltaninejad, M. Soltaninejad, Solar Systems are a solution to reduce environmental pollutants in Residential buildings, in *proceeding of 7<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, In Cooperation with Shiraz University, Maraghe University and University of Science and Technology of Iran, Tehran, Iran, 2021. (in Persian)
- [11] Z. Soltaninejad, M. Ghasemi, and M. Soltaninejad, Analysis of the energy behavior of the school building in Kerman city according to the grouping of the building from the point of view of topic 19 of the national building regulations (with TRNSYS), in *proceeding of*