نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۹۸، جلد ۵۲، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، صفحه ۲۲۷-۲۳۶ – پژوهشی کامل – DOI: 10.22034/jmeut.2021.43389.2807

# مطالعه موردی سرمایش ساختمان به وسیله سردکن ترموالکتریک با تغذیه از منابع انرژی خورشیدی

**بهروز میرزایی ضیاپور*** استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، bmziapour@gmail.com

**احسان مختاری زائر** کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، exsan_zm@yahoo.com

**محسن رحیمی** کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، rahimi91mohsen@gmail.com

**چکیده**

در این پژوهش، سیستم سرمایشی غیر فعالی متشکل از پنل فتوولتایی و سردکن ترمو الکتریک به ترتیب بعنوان منبع تامین الکتریسیته و تجهیز سرمایش، طراحی و ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش در طراحی سیستمی متشکل از سردکن ترموالکتریک، پنل فتوولتایی و اتاقی که به لحاظ تامین انرژی سرمایشی خودکفا باشد، استفاده شد. از این قرار، ابتدا نیاز انرژی اتاق محاسبه و سپس به منظور بررسی بیشینه عملکرد سردکن ترموالکتریک دو شیوه: ۱) بیشینه توان سرمایش و ۲) بیشینه ضریب عملکرد بکار گرفته شد. در محاسبات انجام گرفته برای بیشینه توان سرمایش، توان سرمایش و ضریب عملکرد بترتیب برابر ۵۸/۴۱ وات و ۰/۴۰۵۶ و برای بیشینه ضریب عملکرد، توان سرمایش و ضریب عملکرد بترتیب برابر ۱۵/۵وات و ۱/۶۴ بدست آمدند. به منظور نزدیک شدن به بهترین عملکرد سردکنهای ترموالکتریک به هر دو شیوه بیشینه توان سرمایش و ضریب عملکرد بطور همزمان، با انتخاب آرایش (۳×۸) به اوج بار سرمایش و هم ضریب عملکرد بالا دست خواهیم یافت.

**واژه‌های کلیدی:** سردکن ترموالکتریک، پنل فتوولتایی، توان سرمایشی، ضریب عملکرد، انرژی خورشیدی.

# The case study of building cooling by thermoelectric cooler using solar energy resources

**B. M. Ziapour** Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

**E. Mokhtari zaer** Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

**M. Rahimi** Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

**Abstract**

In this study, the passive cooling system consisting of photovoltaic panel and thermoelectric cooler as a source of electricity and cooling equipment has been designed and evaluated. The result of this study was used in system design consist of thermoelectric cooler, photovoltaic panel and the room which is self-sufficient in terms of cooling energy supply. Thus, first, the energy demand for the room is calculated, and then in order to evaluate the maximum performance of the thermoelectric cooler, two methods were obtained: 1) maximum cooling power and 2) maximum coefficient of performance (COP). In the calculations done for maximum cooling power method, the cooling power and coefficient of performance, were 58.41W and 0.44056, respectively; and for maximum coefficient of performance method, the cooling power and coefficient of performance were 15.5W and 1.64, respectively. To access the best performance of thermoelectric coolers in both maximum cooling power and coefficient of performance simultaneously, by selecting the arrangement (3×8), both the cooling peak load and the high performance coefficient we will achieve.

**Keywords:** Thermoelectric cooler; Photovoltaic panel; Cooling power; Coefficient of performance; Solar energy.

## ۱- مقدمه

اقتصاد، جمعیت و مصرف سرانه انرژی باعث افزایش نیاز به انرژی در دهه های اخیر شده است. سوخت های فسیلی منبع مهمی برای تولید اشکال قابل استفاده انرژی هستند. بنابراین، سوخت های فسیلی سهم زیادی در گرم شدن زمین و اثرات گلخانه ای بر لایه ازون دارند. جستجو برای منابع انرژی پاک و پایدار یک مسئله جهانی است که در حال افزایش است و دلیل آن، افزایش هزینه های انرژی و گرم شدن زمین مرتبط با سوخت های فسیلی است[۱]. مصرف بالای انرژی در جهان منجر به پیدا کردن راه‌های جدید برای استفاده از منابع انرژی کارآمد شده است. حدوداً ۳۰٪ از مصرف انرژی در چین، ۴۰ ٪ در آمریکا و ۲۰٪ در کشورهای در حال توسعه، شامل ساختمان‌ها می‌شود و پیش‌بینی می‌شود[۱،۲] در ۲۰ سال آینده تا ۳۴٪ درصد افزایش یابد[۴،۳]. موسسه بین المللی تبرید در پاریس تخمین زده است که حدود ۱۵٪ از کل انرژی الکتریکی تولید شده در سراسر جهان برای تهویه مطبوع و فرآیندهای تبرید مصرف می‌شود[۵]. علاوه بر این، در طول تابستان با توجه به بیشتر شدن استفاده از تجهیزات تبرید و تهویه مطبوع، مصرف برق مخصوصاً در زمان‌های اوج نیز در حال افزایش است. به همین دلیل تحقیقات قابل توجهی در زمینه یافتن فناوری‌های

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: b_mirzaeezia@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۳/۱۷

نوین در تولید انرژی پاک انجام شده است که می‌توان ترموالکتریک‌ها را یکی از تجهیزات پیشنهادی جهت تولید انرژی پاک دانست[۶]. همچنین ساخت تجهیزات خنک‌کننده با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی، یک راه حل کلیدی برای مسائل مربوط به انرژی و محیط زیست است. جستجو برای منابع انرژی پاک و پایدار یک مسئله جهانی است که در حال افزایش است و دلیل آن افزایش هزینه‌های انرژی و گرم شدن زمین مرتبط با سوخت‌های فسیلی است[۹-۷]. از جمله فناوری‌های موجود برای رسیدن به این هدف، مبادله کن‌های انرژی ترموالکتریک هستند که استفاده از آنها در حال افزایش است زیرا ویژگی خاص این دستگاه‌ها این است که می‌توانند گرما را از منابعی مانند نیروگاه‌ها، کارخانه‌ها، وسایل نقلیه موتوری، رایانه‌ها و یا حتی بدن انسان دریافت کنند و به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. در ادامه‌ی این بخش به توضیحی اجمالی در مورد خنک‌کننده-های ترموالکتریک، نحوه عملکرد آنها، مواد ترموالکتریک و کاربردهای سیستم‌های ترموالکتریک پرداخته می‌شود.

اثر ترموالکتریک تبدیل مستقیم اختلاف دما به ولتاژ الکتریکی و یا برعکس آن است. یک دستگاه ترموالکتریک وسیله‌ای است که در صورت وجود اختلاف دما در دو سرش، ولتاژی را پدید می‌آورد و در مقابل در صورت گرفتن ولتاژ در دو سرش اختلاف دما ایجاد می‌شود. در ابعاد اتمی، گرادیان دمای اعمال شده سبب می‌شود تا حامل‌های بار در ماده از سمت گرم به سمت سرد حرکت کنند. این اثر در تولید الکتریسیته و محاسبه دمای اجسام یا تغییر دمایشان کاربرد دارد. چون گرم شدن و سرد شدن ارتباط مستقیمی با قطبش ولتاژ اعمال شده دارد، دستگاه‌های ترموالکتریک، کنترل کننده‌های بسیار موثر دما هستند. اثر ترموالکتریک شامل سه اثر شناخته شده مجزا است: اثر سیبک[۱]، اثر پلتیر[۲] و اثر تامسون[۳] که اثر سیبک تبدیل انرژی گرمای به الکتریکی و اثر پلتیر معکوس آن است. [۱۰]

اثر سیبک به اثری گفته می‌شود که اختلاف گرادیان دما بین دو ماده هادی الکتریکی باعث ایجاد ولتاژ شود. زمانی که نیمه‌هادی‌ها به هم متصل می‌شوند و چرخه الکتریکی به شکل سری تشکیل می‌دهند، گرما می‌تواند به انرژی الکتریکی تبدیل شود[۱۱]. ضریب سیبک، $\alpha$ به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \qquad (۱)$$

که $V$ ولتاژ و $T$ دما است. اثر سیبک نتیجه شارش بار از بخش گرم به بخش سرد مواد ترموالکتریک است. این شارش در بخش گرم انرژی گرمایی بیش‌تری در مقایسه با بخش سرد دارد. شارش بار از الکترون (نیمه‌رسانای نوع n) به سمت حفره (نیمه‌رسانای نوع p) است. شارش بار باعث ایجاد یک میدان الکتریکی به شکل پراکنده می‌شود که اختلاف دما باعث جلوگیری از این پراکندگی می‌شود. موازنه زمانی برقرار می‌شود که دو نیروی مخالف باهم برابر باشند و یک پتانسیل الکتروشیمیایی که با ولتاژ سیبک شناخته می‌شود، از گرادیان دما حاصل شود.

اثر پلتیر عکس اثر سیبک است. زمانی که یک جریان الکتریکی از دو ماده الکتریکی نیمه هادی عبور می‌کند، یک سر گرم و سر دیگر سرد می‌شود. ضریب پلتیر π به آهنگ سرد شدن یک سر جسم گفته می‌شود و عبارت است از:

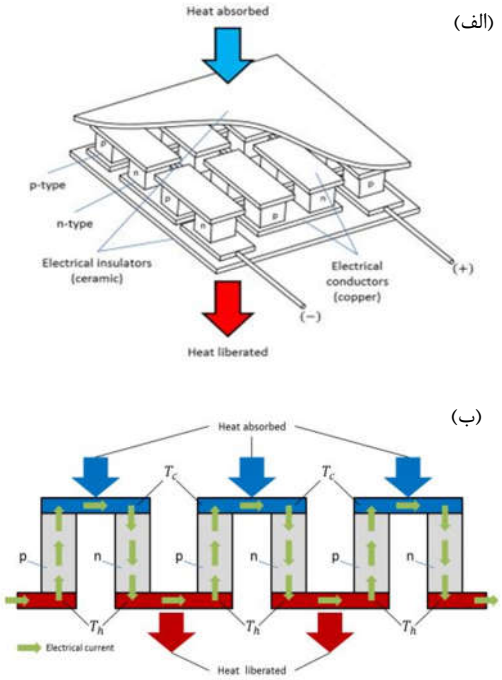
$$\pi = \frac{I}{q} \qquad (۲)$$

که $I$ جریان الکتریکی و $q$ آهنگ سرمایش است. اثر پلتیر در سرمایش جامدات در سردکننده‌های ترموالکتریکی اهمیت دارد.

در سال ۱۸۵۱ ویلیام تامسون دانشمند انگلیسی دریافت که عبور جریان از داخل هادی که اختلاف دما دارد منجر به جذب یا دفع گرمای متناسب با جنس هادی و جهت جریان داخل هادی می شود. ضریب تامسون بصورت زیر تعریف می شود:

$$\tau = \frac{q}{I\Delta T} \qquad (۳)$$

که $I$ جریان الکتریکی، $q$ گرمای تامسون و $\Delta T$ اختلاف دمای اتصالات ترموالکتریک هستند.




**شکل ۱-نمونه دستگاه نشان دهنده پدیده ترموالکتریک الف) طرحواره ساختمان ترموالکتریک ب) اتصالات الکتریکی و گرمایی زوج TEC در یک ماژول**

ماژول ترموالکتریک از جفت قطعات نیمه‌هادی نوع p و نوع n تشکیل شده که در میان دو صفحه سرامیکی قرار گرفته‌اند. این قطعات از نظر گرمایی با هم موازی و از نظر الکتریکی سری هستند. صفحه سرامیکی، عایق الکتریکی بین صفحات مسی اتصال دهنده و قطعات خارجی متصل شده به سیستم است. این در حالی است که این صفحات هادی گرما هستند. شکل۱ این ساختمان را به لحاظ ساختار و عملکرد نشان می دهد.

[1] Seebeck
[2] Peltier
[3] Thomson

فناوری‌های سرمایشی غیرفعال معمولا از آب یا هوا به عنوان سیال کاری استفاده می‌کنند مانند میکروکانال‌ها، که به طور کامل نمی‌توانند گرمای اضافی را خارج کنند و باید از روش‌های فعال استفاده شود. سردکنهای ترموالکتریک نسبت به سایر روش های غیرفعال، توانایی بالایی به انتقال گرما از صفحه‌ی دما بالا به محیط بیرون دارند، زیرا اندازه کوچک و قابلیت اطمینان بالا دارند همچنین در حین عملکرد بی صدا هستند.

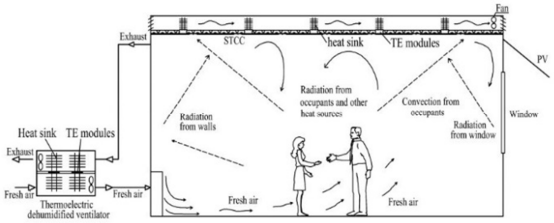
فیلان و همکاران [۱۲] فناوری حال‌حاضر و آینده خنک‌کننده مینیاتوری برای تجهیزات میکروالکترونیک با قدرت بالا را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تنها خنک‌کننده‌های ترموالکتریک در حال حاضر به صورت تجاری در اندازه های کوچک در دسترس هستند.

هوانگ و همکاران [۱۳] نیز در مطالعات تجربی شان دریافتند که، هنگامی که بار گرمای یک دستگاه الکترونیکی کمتر از ۵۷ وات باشد، تلفیق کردن یک خنک کننده آبی معمولی با خنک کننده های ترموالکتریک می تواند راندمان گرمای را به طور چشمگیری افزایش دهد.

ریفات و کیو[۱۴] یک گزارش جهت مقایسه بین ۳ سیستم تهویه مطبوع ارائه دادند که در آن عملکرد سیستم‌های تهویه تراکمی، جذبی و ترموالکتریک را مورد مقایسه قرار دادند. باتوجه به مطالعه انجام گرفته، پربازده‌ترین بین آنها سیستم تهویه تراکمی با ضریب عملکرد بین ۲/۶ تا ۳ بعد از آن نیز سیستم تهویه جذبی با ضریب عملکرد ۰/۶ تا ۰/۷ بوده است. همچنین ضریب عملکرد سیستم تهویه ترموالکتریک بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۵ به دست آمده است. این درحالی است که فایده استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع ترموالکتریک در این است که با برق DC کار می کنند و به راحتی می‌توانند مستقیماً از منابعی همانند پنل‌های فتوولتایی و پیل سوختی استفاده کنند. از دیگر مزایای استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع ترموالکتریک می‌توان به کاهش آسیب به لایه اوزون به دلیل استفاده نکردن از CFC ها و کاهش آلودگی صوتی به دلیل بی صدا بودن هنگام عمل کردن اشاره کرد.

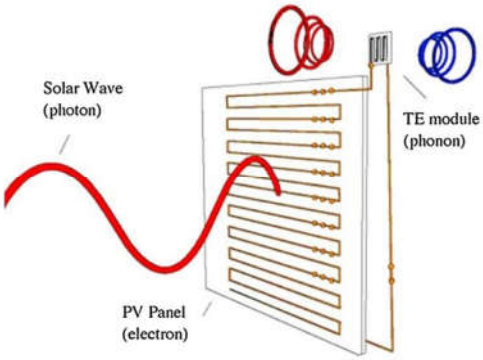
در شکل ۲ سقف یک خانه مجهز به سردکنترموالکتریک خورشیدی مشاهده می‌شود که با یک سیستم تهویه مطبوع ترکیب شده است[۱۵]. در این سیستم خنک‌کننده از پنل‌های تابشی استفاده شده است. این سیستم خنک‌کننده با کاهش کسرزیادی از بار سرمایش محسوس به تهویه مطبوع کمک می‌کند. ماژول‌های ترموالکتریک به صورت سری در کنارهم متصل شده و در زیر پنل‌های تابشی آلومینیومی و لوله‌های گرما به صورت فشرده قرار می‌گیرند. از پره‌ها برای پخش گرمای ماژول‌های ترموالکتریک استفاده شده است. فن نیز با ایجاد یک جریان همرفتی اجباری هوا به ماژول‌های ترموالکتریک کمک می‌کند تا گرما را بهتر دفع کنند. با کنترل کردن جهت جریان، عمل سرمایش و گرمایش هردو قابل دسترس خواهد بود.

عملکرد سقف‌های مجهز به سردکن ترموالکتریک در شرایط گرمایش و سرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که افزایش ولتاژ باعث افزایش شار گرمایی کل می‌شود. کاهش اختلاف دمای بین دمای محیط و دمای داخلی به طور قابل توجهی شار گرمایی کل و کمی هم ضریب عملکرد سیستم را در هر دو حالت سرمایش و گرمایش افزایش می‌دهد.




**شکل ۲- طرحواره ای از سقف مجهز به سیستم سردکن ترموالکتریک**

سیستم پوشش فعال ساختمان[1] وقتی که با سیستم ترموالکتریک همراه شود می‌تواند راه حل جدیدی برای گرمایش و سرمایش باشد که می‌تواند به طور فعال جریان گرما را تنظیم کند و با فراهم آوردن گرمایش و سرمایش، اتلافات و جذب‌های گرمای پاکت را جبران کند. در مقایسه با پوشش‌های عایق کاری شده و سیستم‌های غیرفعال خورشیدی، سیستم پاکت فعال ساختمان با ترموالکتریک، انرژی تابشی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و متعاقباً از انرژی الکتریکی استفاده کرده تا یک سردکن ترموالکتریک را تغذیه کند. در این شرایط به طور کامل شار گرمایی درون پاکت ساختمان به طور فعال کنترل می‌شود[۱۶].




**شکل ۳- نحوه جریان انرژی در دیوار فعال ساختمان**

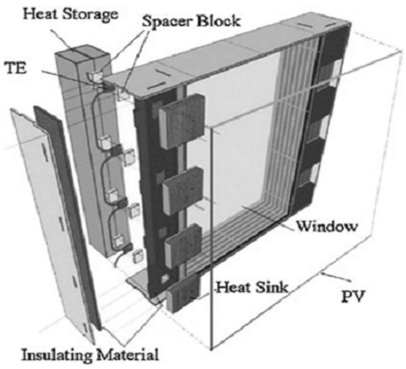
دیوار فعال ساختمان[2] نیز نوعی از دیوارهاست که به طور فعال می‌تواند شارگرمایی دیواره را با انرژی خورشیدی کنترل کند[۱۷]. یک دیوار فعال ساختمان شامل پنل فتوولتایی و یک سیستم ترموالکتریک است. سطح خارجی دیوار پنل فتوولتایی پوشانده به طوری که یک کانال برای جریان هوا بین پنل و دیواره وجود دارد. ماژول‌های ترموالکتریک نیز در پشت پنل فتوولتایی و درون کانال هوا قرار دارند. همانطور که در شکل۳ نشان داده شده است در این سیستم، پنل فتوولتایی انرژی خورشیدی را به الکتریسیته و ماژول ترموالکتریک الکتریسیته را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند.

در مرجع [۱۷] یک مدل تحلیلی محاسباتی از سردکن ترموالکتریک و چاه گرمایی برای طراحی سیستم دیوار فعال ساختمان ارائه شده است. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش تراکم

[1] Active building envelope
[2] Active building wall

و تعداد سردکنهای ترموالکتریک در دیوار نیروی کل ورودی مورد نیاز برای عملکرد واحدهای ترموالکتریک کاهش می یابد.

سیستم پنجره فعال ساختمان[1] فناوری جدیدی از پنجره‌ها می‌باشد که سردکن ترموالکتریک و پنل‌های خورشیدی را باهم در خود جای داده است[۱۸و۱۹]. طرحواره از این فناوری در شکل4 نشان داده شده است. هشت ماژول ترموالکتریک بر روی دو لوله آلومینیومی نصب شده و در دوطرف پنجره قرار می‌گیرند. هر ماژول به یک چاه گرمایی خارجی اتصال دارد که وظیفه جذب یا آزاد کردن گرما به هوا از طریق همرفتی آزاد را بر عهده دارد.




**شکل ۴- طرحواره ای از پنجره فعال ساختمان**

نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که این سیستم می تواند برای دمای داخل اتاق بین ۲ تا ۶ °C موثر خواهد بود و همچنین می‌تواند با فراهم آوردن انرژی بین ۳۵ تا ۴۰ وات دمای اتاق را کنترل کند. بازده کل این سیستم در حدود ۵ درصد در حالت سرمایش و ۱۳ درصد در حالت گرمایش بوده است.

لیو و همکاران [۲۰] عملکرد دیوارفعال مجهز به پنل خورشیدی و ماژول‌های ترموالکتریک را مورد بررسی قرار دادند. برای این کار یک مدل دینامیک ارائه شد و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. سه مدل تحلیلی زیر که شامل مدل الکتریکی و گرمایی پنل فتوولتایی، مدل انتقال گرما در کانال هوا و مدل صفحه تابشی ترموالکتریک می‌باشند با یکدیگر کوپل شده تا رفتار دیوارفعال مجهز به پنل خورشیدی و ماژول‌های ترموالکتریک را مورد بررسی قرار بدهند. در شکل 5 طرحواره ی از دیوار و نحوه قرارگیری دیگر اجزای آن نشان داده شده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داده است که زمانی که دمای هوای داخل اتاق24°C باشد، ضخامت و رسانایی گرمایی عایق نیز به ترتیب ۰/۰۴ متر و W/m.K ۰/۰۵ باشد، سیستم دیوار فعال می‌تواند نزدیک به ۷۰٪ از گرمای جذب شده روزانه را در مقایسه با دیوارهای معمول کاهش دهد.

کیو و همکاران [۲۱] یک مدل عددی سه بعدی به منظور تجزیه و تحلیل کمی و کیفی عوامل موثر بر عملکرد سردکن برای یک سردکن ترموالکتریک با مقطع غیر ثابت از طریق روش المان محدود و یک مدل ریاضی یک بعدی ارائه دادند. نتایج نشان می دهد که در مقایسه با یک سردکن ترموالکتریک با سطح مقطع ثابت، ظرفیت سردکن و ضریب عملکرد یک سردکن ترموالکتریک بهینه شده با مقطع غیر ثابت به ترتیب ۳۵/۷۳٪ و ۲۱/۵۹٪ بهبود یافته است. در مقایسه با سردکن ترموالکتریک با سطح مقطع غیر ثابت قبل از بهینه سازی، ظرفیت سردکن و ضریب عملکرد پس از بهینه سازی به ترتیب ۲۰/۹۸٪ و ۲۰/۵۲٪ افزایش یافته است.

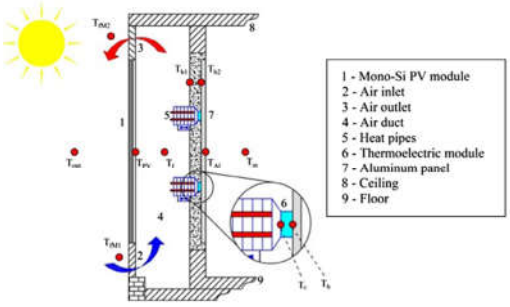



Fig. 1. The schematic diagram of BIPVTE wall system.

**شکل ۵- طرحواره ای از سیستم دیوار فعال مجهز به ماژول ترموالکتریک و پنل خورشیدی**

سان و همکاران [۲۲] یک مدل عددی برای بررسی تأثیر اثر تامسون بر عملکرد سردکن سردکنهای میکرو ترموالکتریک و اثرات سطحی و اندازه ای ارائه دادند. نتایج نشان می دهد که ضریب تامسون مثبت می تواند ظرفیت سردکن را بهبود بخشد. علاوه بر این، کاهش حداقل دمای خنک سازی ناشی از اثر تامسون در بار سردکن بیشتر آشکار می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش سطح متقاطع به ضخامت، تأثیر اثر تامسون در حداکثر دمای سردکن به تدریج کاهش می یابد. برای شار گرمایی $W / cm^2$ ۱۰۰ و W / $200cm^2$ با توجه به اثر تامسون می توان حداقل دمای سردکن را به ترتیب K ۲/۱ و K ۴/۱ کاهش داد. علاوه بر این، برای ضخامت ۱۰ میکرومتر، با افزایش سطح متقاطع به ضخامت، اختلاف دمای حداکثر سردکن به تدریج از K ۲/۲ به K ۱/۱ کاهش می یابد.

در پژوهش حاضر، سرمایش اتاقی (همچون کانکس و یا اتاقک های سیار به منظور کاربردهای امدادی و اسکانی موقت) به وسیله سردکن های ترموالکتریک با تغذیه از منابع انرژی خورشیدی مورد تحلیل قرار می- گیرد. نتایج این پژوهش در طراحی سیستمی متشکل از سردکن ترموالکتریک، پنل فتوولتایی و اتاقی که به لحاظ تامین انرژی سرمایشی خودکفا باشد، استفاده می شود. به منظور بررسی بیشینه عملکرد ترموالکتریک سردکن دو شیوه: ۱) بیشینه توان سرمایش و ۲) بیشینه ضریب عملکرد بکار گرفته می شود تا بر اساس آن شرایط برای بهینه کردن کارکرد TECs تنظیم شود. همچنین برای تحلیل توان سرمایشی تولیدی سردکن ترموالکتریک ها دو حالت الف) نحوه اتصال به منبع تغذیه و ب) آرایش الکتریکی ترموالکتریک سردکنها در نظر گرفته می شود. برای نحوه اتصال TECs به منبع تغذیه دو شیوه ۱) اتصال مستقیم به PV و ۲) اتصال به باطری بررسی می شود.

[1] Active building window

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- معادلات حاکم بر سردکنهای ترموالکتریک

با استفاده از دمای اتصالات سرد و گرم، معادلات ایده آل برای سرمایش و گرمایش بصورت زیر خواهند بود[۲۳]:

$$Q_c = \alpha i_{TE} T_c - \frac{1}{2} {i_{TE}}^2 R - k(T_h - T_c) \quad (۴)$$

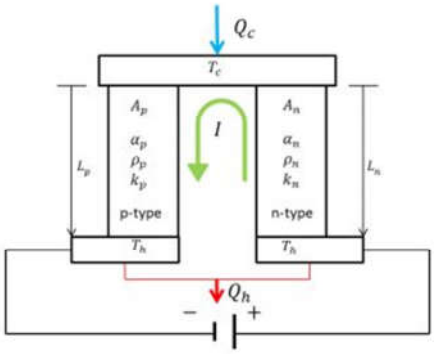
$$Q_h = \alpha i_{TE} T_h + \frac{1}{2} {i_{TE}}^2 R - k(T_h - T_c) \quad (۵)$$

که $Q_c$ و $Q_h$ مطابق شکل۶ بترتیب آهنگ های انتقال گرما در اتصالات سرد و گرم سردکن ترموالکتریک هستند.

با بکارگیری قانون اول ترمودینامیک برای سیستم سردکن ترموالکتریک، توان مصرفی آنان را می توان بدست آورد [۲۳].

$$\dot{W}_{TE} = Q_h - Q_c \quad (۶)$$

$$\dot{W}_{TE} = \alpha i_{TE}(T_h - T_c) + {i_{TE}}^2 R \quad (۷)$$




**شکل ۶- TEC متصل به منبع توان**

در روابط (۴) تا (۷) $i_{TE}$، جریان ورودی به هر سردکن ترموالکتریک است، که طبق رابطه زیر محاسبه می شود[۲۴و۲۵]:

$$i_{TE} = \frac{v_{TE} - \alpha(T_h - T_c)}{R} \quad (۸)$$

در رابطه (۸) $v_{TE}$ ولتاژ ورودی به هر سردکن ترموالکتریک است که متناسب با ولتاژ پنل فتوولتایی و همچنین آرایش الکتریکی سردکنهای ترموالکتریک است.

معیار عملکرد وسایل سرمایشی، ضریب عملکرد (COP) است که نسبت توان سرمایش (یا گرمایش) به توان ورودی است؛ که برای سردکن ترموالکتریک بصورت زیر بازنویسی می شود:

$$COP = \frac{Q_c}{\dot{W}_{TE}} = \frac{\alpha i_{TE} T_c - \frac{1}{2} {i_{TE}}^2 R - k(T_h - T_c)}{\alpha i_{TE}(T_h - T_c) + {i_{TE}}^2 R} \quad (۹)$$

دو شیوه برای بررسی بیشینه عملکرد سردکن ترموالکتریک وجود دارد: ۱) بیشینه توان سرمایش ۲) بیشینه ضریب عملکرد. پارامتر متغیر در هر دو مورد جریان اعمالی است.

۱) بیشینه توان سرمایش

با مشتق گیری از معادله (۴) نسبت به $i_{TE}$ و مساوی صفر قرار دادن آن، جریان متناسب با بیشینه توان سرمایش ($i_{mp}$) بدست می‌آید.

$$\frac{dQ_c}{di_{TE}} = 0 \rightarrow i_{mp} = \frac{\alpha T_c}{R} \quad (۱۰)$$

با استفاده از $i_{mp}$، بیشینه توان سرمایش و ضریب عملکرد متناسب با آن در دمای اتصالات بصورت زیر محاسبه می شوند:

$$Q_{c.mp} = \frac{\alpha^2 {T_c}^2}{2R} + k(T_c - T_h) \quad (۱۱)$$

$$V_{mp} = \alpha T_h \quad (۱۲)$$

$$COP_{mp} = \frac{\frac{{T_c}^2}{2} + \frac{(T_c - T_h)}{Z}}{T_c(T_c + 1)} \quad (۱۳)$$

۲) بیشینه ضریب عملکرد

بیشینه ضریب عملکرد را می توان به طریق مشابه با مشتق گیری از رابطه (۹) نسبت به $i_{TE}$ و مساوی صفر قرار دادن آن بدست آورد.

$$\frac{dCOP}{di_{TE}} = 0 \rightarrow i_{mc} = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R\left[\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1\right]} \quad (۱۴)$$

توان سرمایش، ولتاژ و بیشینه ضریب عملکرد متناسب با $i_{mc}$ بترتیب برابر است با:

$$Q_{c.mc} = \frac{\alpha^2 T_c(T_h - T_c)}{R\left[\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1\right]} - \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)^2}{2R\left[\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1\right]} + k(T_c - T_h) \quad (۱۵)$$

$$COP_{max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - \frac{T_h}{T_c}}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + 1} \quad (۱۶)$$

$$V_{mc} = \alpha(T_h - T_c)\left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}\right] \quad (۱۷)$$

رابطه مربوط به توان پنل فتوولتایی متناسب با جریان و ولتاژ بصورت زیر است:

$$\dot{W}_{pv} = i_{PV} v_{PV} \quad (۱۸)$$

در رابطه اخیر $i_{PV}$ و $v_{PV}$ به ترتیب جریان و ولتاژ تولیدی پنل فتوولتایی است. جریان پنل فتوولتایی در هر دمایی متغیر با زمان طبق رابطه (۱۹) بدست می آید [۲۶]:

$$i_{PV} = [i_{PV.STE} + K_1(T_{sc} - T_{sc.STE})]\frac{G}{G_{STE}} \quad (۱۹)$$

در رابطه (۱۹) $i_{PV.STE}$، $T_{sc.STE}$ و $G_{STE}$ به ترتیب جریان پنل، دمای سلول خورشیدی و شدت تابش خورشید در شرایط استاندارد ($G_{STE} = 1000\ W/m^2$ & $T_{sc.STE} = 25°C$) هستند. $T_{sc}$ دمای سلول خورشیدی متغیر با زمان و همچنین $K_1$ نسبت جریان اتصال کوتاه به دمای سلول خورشیدی است.

مطابق رابطه (۱۹) دمای سلول خورشیدی در روابط جریان و توان پنل اعمال شده است. تاثیر دمای سلول خورشیدی و محیط بر اساس رابطه (۲۰) در رابطه (۱۹) اعمال شده است:

$$T_{sc} = \frac{[\alpha_g \tau_g \beta_{sc}(1 - \eta)]G + U_{tc.a} T_{amb} + U_T T_{bs}}{U_{tc.a} + U_T} \quad (۲۰)$$

در رابطه بالا، $\alpha_g$ و $\tau_g$ بترتیب ضریب جذب و قابلیت انتقال کاور شیشه ای، $U_{tc.a}$ ضریب انتقال گرما از سلول به هوا از طریق شیشه، $T_{amb}$ دمای محیط، $U_T$ ضریب انتقال کلی از سلول خورشیدی به سطح پشت، $T_{bs}$ دمای سطح پشت پنل و η راندمان سلول خورشیدی

هستند.

راندمان الکتریکی لحظه ای سلول خورشیدی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \eta_0[1 - \beta_0(T_{sc} - 25)] \quad (۲۱)$$

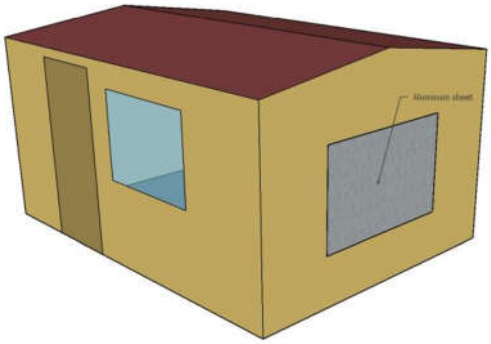
که $\eta_o$ راندمان سلول خورشیدی در شرایط تست استاندارد، $\beta_o$ ضریب دمایی راندمان سلول خورشیدی $(1/k)$ و $T_{sc}$ دمای سلول خورشیدی است. و برای سلول خورشیدی از جنس مونوکریستالین سیلیکون، $\beta_o = 0.004$ و $\eta_o = 0.135$ می باشد[۲۷].

همچنین توان الکتریکی تولیدی توسط یک پنل فتوولتایی طبق رابطه (۲۱) قابل محاسبه است:

$$\dot{W}_{pv} = G \cdot \eta \cdot A \cdot \beta_{sc} \quad (۲۲)$$

که در اینجا $G$ شدت تابش خورشید، η راندمان سلول خورشیدی، $A$ مساحت سطح پنل فتوولتایی و $\beta_{sc}$ پکینگ فاکتور(نسبت سطح پوشانده شده توسط سلول های خورشیدی به سطح پنل) است.

با معلوم بودن جریان تولیدی پنل مطابق رابطه (۱۹) و توان تولیدی مطابق روابط (۱۸) و (۲۱)، ولتاژ تولیدی نیز مطابق رابطه (۱۸) قابل محاسبه است.



**شکل ۷- مدل شبیه سازی شده اتاق مورد مطالعه**

## ۲-۲- اتاق مورد مطالعه

در این بخش به عنوان مطالعه موردی، اتاقی با ابعاد (۲×۳×۴ m) را با هدف استخراج نیازهای انرژی آن انتخاب نموده و سپس با توسل به دو زیر سیستم TEC و پنل فتوولتایی، نقشه راه جدیدی برای تامین نیاز سرمایش آن برای موقعیت شهر اردبیل ارائه می دهیم.

به منظور شبیه سازی و تحلیل انرژی اتاق مورد مطالعه، ابتدا مدل سه بعدی هندسه اتاق را در نرم افزار Sketch up مطابق شکل ۷ طراحی و سپس از برنامه شبیه سازی Openstudio که کاری از لابراتور ملی انرژیهای تجدیدپذیر دپارتمان انرژی آمریکا است، به منظور شبیه سازی دینامیکی انرژی مصرفی کانکس استفاده می کنیم.

دیوارهای جانبی و سقف اتاق از ساندویچ پنل با مشخصات روکش گالوانیزه رنگی و عایق پلی یورتان انتخاب شدند و برای قسمت داخلی از تخته های عایق استفاده شده است، همچنین جنس در و پنجره از مواد عایق و غیر فلزی برای تحلیل در نرم افزار انتخاب شده اند.

مطابق شکل ۷ برای اتاق مدلسازی شده یک منطقه گرمایی در نظر گرفته شده است. جزئیات این واحد گرمایی در جدول ۱ آورده شده است.

**جدول ۱- جزئیات منطقه گرمایی**

| تعداد واحد گرمایی | People Definition [w] | Electric Equipment [w] | Lights Definition [w/ft2] |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۳ | ۱۳۰۰ | ۰/۹۹ |

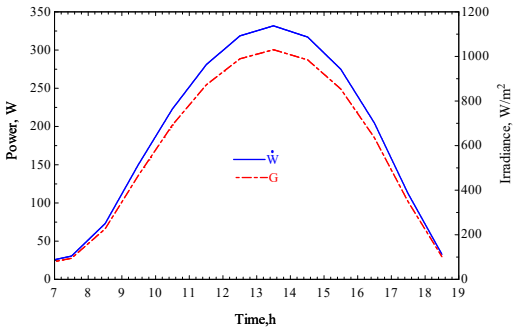
# ۳- نتایج

## ۳-۱- توان الکتریکی تولیدی توسط پنل فوتوولتاییک

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم پنل فتوولتایی در سیستم پوشش فعال ساختمان، پنل فتوولتایی با مساحت سطح پنل ۱/۷۱ متر مربع مورد استفاده قرار گرفت[۲۷]. سایر مشخصات الکتریکی پنل فتوولتایی در شرایط استاندارد و همچنین در شرایط کارکرد اسمی دمای سلول، در جدول ۲ آورده شده است.

**جدول ۲- مشخصات الکتریکی پنل فوتوولتاییگ در شرایط NOCT[1]**

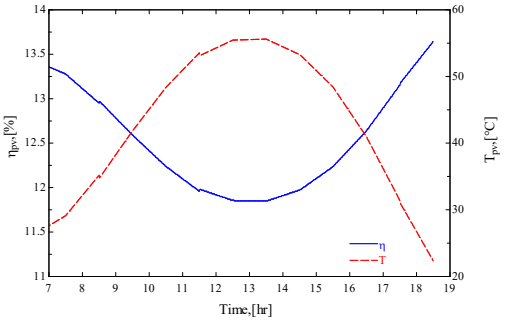
| مقدار | پارامتر |
|---|---|
| ۳۸/۰ V | ولتاژ مدار باز $(V_{oc})$ |
| ۸/۳۸ A | جریان اتصال کوتاه $(I_{sc})$ |
| ۳۰/۸V | ولتاژ متناسب با توان بیشینه $(V_{mpp})$ |
| ۷/۷۸ A | جریان متناسب با توان بیشینه $(I_{mpp})$ |




**شکل ۸- شدت تابش خورشید و توان تولیدی پنل فوتوولتاییک برای موقعیت شهر اردبیل**

میزان تابش روزانه خورشید[۲۸] در یک روز صاف و آفتابی برای گرمترین روز سال ۹۹ به موقعیت جغرافیایی استان اردبیل و همچنین توان الکتریکی تولیدی توسط پنل فتوولتایی متناسب با تابش خورشید مطابق رابطه (۲۰) در شکل ۸ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود توان الکتریکی و شدت تابش ارتباط متناسبی به هم دارند و بیشینه مقادیر در ساعت ۱۳:۳۰ رخ می دهد. شکل ۹ راندمان لحظه ای و دمای لحظه ای سلول خورشیدی نشان داده شده است. همان طور که انتظار می رود با افزایش دمای سلول خورشیدی در ساعات میانی روز، راندمان سلول خورشیدی کاهش می یابد.

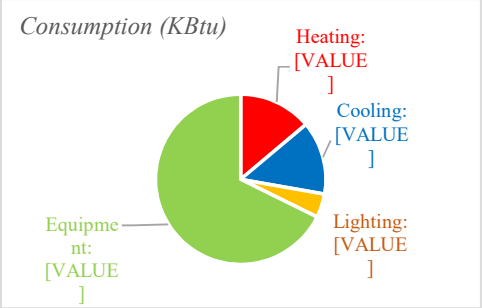
[1] Nominal operating cell temperature (NOCT)




شکل ۹- راندمان الکتریکی و دمای لحظه ای سلول خورشیدی

## ۳-۲- شبیه سازی مصرف انرژی اتاق

همان طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، به منظور استخراج نیاز انرژی اتاق مورد مطالعه از نرم افزار Openstudio استفاده شد. نتایج شبیه سازی سالیانه مصرف انرژی الکتریسیته در شکل ۱۰ آورده شده اند. لازم به ذکر است به جهت تامین نیاز گرمایی اتاق از انرژی الکتریسیته به عنوان انرژی مصرفی استفاده شده است.




شکل ۱۰- مصرف سالیانه انرژی الکتریسیته

مصرف الکتریسیته اتاق برای نیاز سرمایش و همچنین اوج مصرف انرژی الکتریکی برای ماه های گرم سال به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده اند.

جدول ۳- مصرف انرژی الکتریسیته برای نیاز سرمایش (kWh)

| May | Jun | Jul | Aug | Sep |
|---|---|---|---|---|
| ۱۴۱/۱۲ | ۱۸۲/۸۷ | ۲۳۱/۳ | ۲۳۷/۳۹ | ۱۶۳/۹۱ |

جدول ۴- اوج مصرف انرژی الکتریسیته برای نیاز سرمایش (kW)

| May | Jun | Jul | Aug | Sep |
|---|---|---|---|---|
| ۰/۵۶ | ۰/۷۸ | ۰/۸۶ | ۰/۸۴ | ۰/۸۶ |

با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه سازی انرژی مصرفی اتاق، مطابق جدول ۳ بیشترین مقدار بار سرمایش برای ماه آگوست و مطابق جدول ۴ بیشترین مقدار اوج بار سرمایش در ماه جولای است. برای غلبه بر این نیازها با معین کردن تعداد سردکن ترموالکتریک لازم، سه آرایش الکتریکی به منظور یافتن بهترین چیدمان ترموالکتریک ها را ارائه خواهیم داد.

## ۳-۳- نتایج حاصل از شبیه سازی TEC

در این شبیه سازی از یک نوع تجاری ترموالکتریک که در [۲۹] هم بکارگرفته شده است؛ استفاده شده است. مشخصات این ترموالکتریک در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- مشخصات ترموالکتریک

| نوع ترموالکتریک | تعداد جزء N | فاکتور هندسی $(G \times 10^2\ (m))$ | $\alpha$ $(V/K)$ | R (Ω) | K $(W/°C)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| CP1.4-127-045L | ۱۲۷ | ۰/۱۷۱ | ۰/۰۵ | ۱/۵ | ۰/۶۶ |

همان طور که در فصل پیش اشاره شد، دو شیوه برای بررسی بیشینه عملکرد سردکن ترموالکتریک وجود دارد: ۱) بیشینه توان سرمایش ۲) بیشینه ضریب عملکرد. در این قسمت به بررسی نتایج این دو شیوه می پردازیم. نتایج حاصل از بهینه سازی جریان اعمالی به عنوان پارامتر مورد بررسی برای بیشینه توان سرمایش، مطابق روابط (۱۰) تا (۱۳) در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- بیشینه عملکرد TEC به شیوه بیشینه توان سرمایش

| جریان متناسب با بیشینه توان سرمایش (A) | توان سرمایش بیشینه (W) | ولتاژ متناسب با بیشینه توان سرمایش (V) | ضریب عملکرد متناسب با بیشینه توان سرمایش |
|---|---|---|---|
| ۹/۷۷ | ۵۸/۴۱ | ۱۵/۶۶ | ۰/۴۰۵۶ |

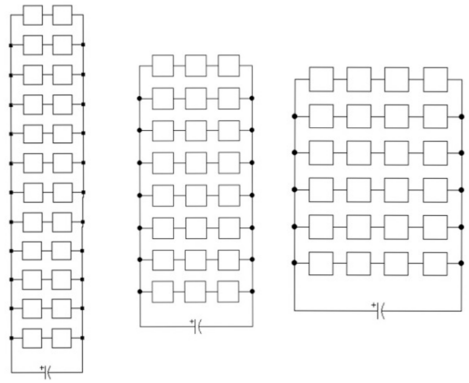
بطور مشابه نتایج حاصل از تحلیل بیشینه عملکرد سردکن ترموالکتریک به شیوه بیشینه ضریب عملکرد مطابق روابط (۱۴) تا (۱۷) در جدول ۷ آورده شده اند.

جدول ۷- بیشینه عملکرد TEC به شیوه بیشینه ضریب عملکرد

| جریان متناسب با بیشینه ضریب عملکرد (A) | توان سرمایش متناسب با بیشینه ضریب عملکرد (W) | ولتاژ متناسب با بیشینه ضریب عملکرد (V) | بیشینه ضریب عملکرد |
|---|---|---|---|
| ۲/۰۳ | ۱۵/66 | ۴/۰۴ | ۱/۶۴ |

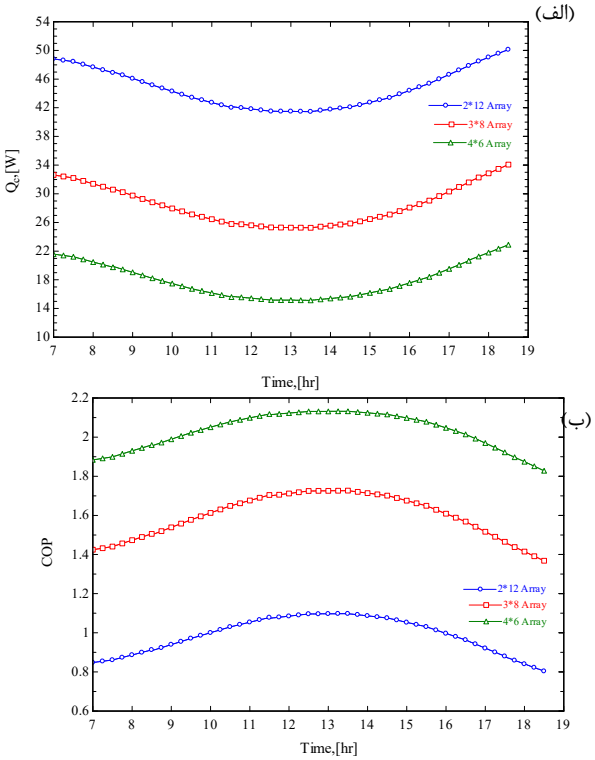
## ۳-۴- مدل ارائه شده برای سرمایش اتاق و مقایسه نتایج

در این بخش مطابق شکل ۱۱ سه مدل از آرایش الکتریکی با تعداد یکسان (۲۴ عدد) سردکنهای ترموالکتریک با هدف تامین اوج توان سرمایشی اتاق انتخاب شده اند. تحلیل ها با این فرض انجام شد که پنل خورشیدی بصورت مستقیم به ترموالکتریک ها متصل باشد. لازم به ذکر است که دمای اتصالات سرد و گرم برای TEC ها ثابت در نظر گرفته شده است.



**شکل ۱۱- سه آرایش الکتریکی پیشنهادی برای TEC ها**

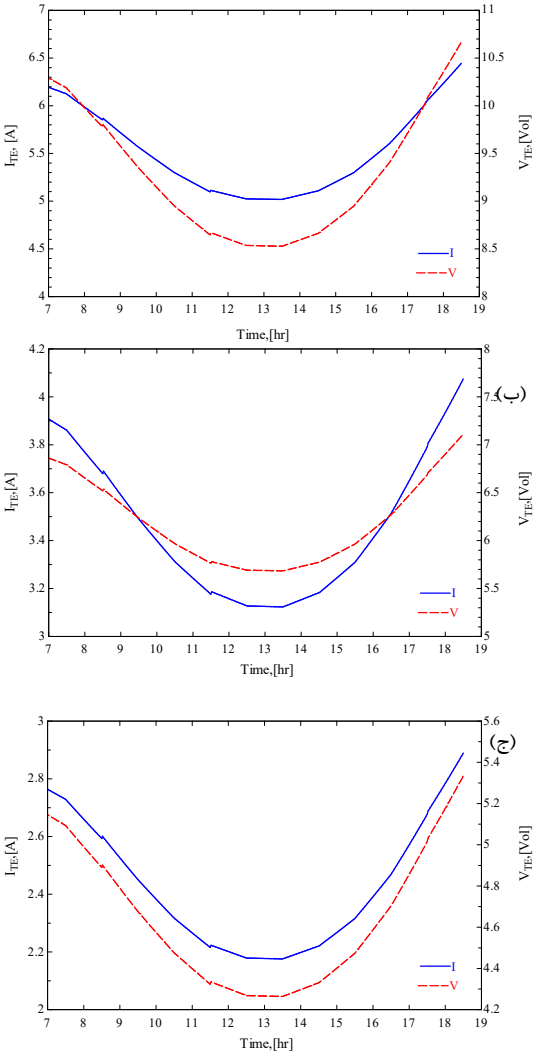
حال به مقایسه نتایج مربوط به آهنگ جذب گرما و ضریب عملکرد آرایش های الکتریکی مختلف ترموالکتریک ها می پردازیم.




**شکل ۱۲- مقایسه عملکرد یک TEC در آرایش های الکتریکی مختلف الف) آهنگ جذب گرما در اتصال سرد ب) ضریب عملکرد**

همان طور که در شکل ۱۲- الف مشاهده می شود بیشترین آهنگ جذب گرما مربوط به آرایش (۲×۱۲) است. در این نحوه آرایش، سردکنهای ترموالکتریک مطابق جدول ۶ نزدیک به بیشینه توان سرمایش خود عمل خواهند کرد. مطابق شکل ۱۲- ب بیشترین مقدار ضریب عملکرد آرایش ترموالکتریک ها آرایش (۴×۸) است. نقاط اکسترمم در شکل ۱۲ بدلیل متاثر بودن توان سرمایشی از جریان ورودی به ترموالکتریک و همچنین ضریب عملکرد متاثر از توان مصرفی ترموالکتریک ها است.

(الف)




**شکل 13- مقادیر جریان و ولتاژ مورد نیاز هر آرایش برای دستیابی به توان سرمایشی هدف الف) آرایش (۲×۱۲) ب) آرایش (۳×۸) ج) آرایش (۴×۶)**

شکل ۱۳ مقادیر جریان و ولتاژ مورد نیاز هر آرایش را برای دستیابی به توان سرمایشی مد نظر را برای آرایش های مختلف TECها نشان می دهد. با ثابت فرض کردن تعداد سطرها، با افزایش ستون ها مقدار جریان و ولتاژ مورد نیاز کاهش پیدا می کند.

همان طور که پیشتر نیز اشاره شد این تحلیل ها برای حالتی است که پنل فتوولتایی بصورت مستقیم به ترموالکتریک ها متصل باشد. البته این شرایط علاوه بر وجود نوسانات ولتاژ در سیستم که متناسب با شدت تابش خورشید است، برای مواقعی که شرایط جوی مناسب نباشد یا هنگام شب جوابگو نخواهد بود. برای حل این معضلات، یک سیستم متشکل از باطری با ظرفیت ۲۴V و کنترلگر را به منظور ذخیره الکتریسیته در طول روز و کنترل و مدیریت نمودن ولتاژ ورودی سردکنهای ترموالکتریک بهره می جوییم. نتایج برای سه آرایش موجود در جدول ۸ آورده شده اند.

**جدول ۸- مقایسه عملکرد یک TEC در حالت اتصال به باطری**

| | $i_{TE}(A)$ | $v_{TE}(V)$ | $Q_c(W)$ | COP |
|---|---|---|---|---|
| آرایش ۲×۱۲ | ۷/۳۳ | ۱۲ | ۵۳/۹۶ | ۰/۶۷ |
| آرایش ۳×۸ | ۴/۶۷ | ۸ | ۳۸/۸۷ | ۱/۱۹ |
| آرایش ۴×۶ | ۳/۳۳ | ۶ | ۲۷/۳۳ | ۱/۶۴ |

با توجه به نتایج بدست آمده در هر دو حالت اتصال مستقیم به پنل و به باطری سردکنهای ترموالکتریک، می توان در یافت با افزایش ستون ترموالکتریک ها توان سرمایش کاهش و ضریب عملکرد افزایش پیدا می کند. به منظور نزدیک شدن به بهترین عملکرد سردکن های ترموالکتریک به هر دو شیوه بیشینه توان سرمایش و ضریب عملکرد بطور همزمان، با انتخاب آرایش(۳×۸) هم می توان بر اوج بار سرمایش نزدیک شد و هم ضریب عملکرد بالایی داشت. همچنین برای آرایش(۲×۱۲) توان سرمایش تولیدی ۲۴ TEC برابر با ۱۲۹۵ وات و برای آرایش(۴×۶) توان سرمایش تولیدی ۲۴ TEC برابر ۶۵۶ وات خواهد بود.

**جدول ۹- عملکرد TECها در آرایش ۳×۸ برای حالت اتصال به باطری**

| آرایش | توان سرمایش تولیدی ۲۴ TEC (W) | اوج توان سرمایش در ماه جولای (W) | بیشینه بار سرمایش در ماه آگوست (kWh) | انرژی سرمایش تولیدی در ماه آگوست (kWh) |
|---|---|---|---|---|
| ۸×۳ | ۹۳۲/۸۸ | ۸۶۰ | ۲۳۷/۳۹ | ۳۷۵/۹۳ |

مقایسه عملکرد سرمایش۲۴ عدد سردکن ترموالکتریک در آرایش (۳×۸) را برای حالت اتصال به باطری در جدول ۹ آورده شده است. براساس شبیه سازی انجام شده، بیشینه بار سرمایش مصرفی در ماه آگوست واقع شده است که با انتخاب آرایش (۳×۸) بطور کامل بر این نیاز سرمایش فائق خواهیم آمد.

مطابق شکل ۷ آرایش انتخابی در صفحه که محل آن مشخص شده است قابل نصب است. به منظور افزایش آهنگ انتقال گرما با نصب سینک هایی در دو طرف سردکنهای ترموالکتریک، طبق مکانیزم انتقال گرما همرفتی طبیعی عمل دفع و جذب گرما انجام می پذیرد. همچنین می توان با نصب فن در دو طرف، براساس مکانیزیم انتقال گرما همرفتی اجباری عمل دفع و جذب گرما را تسهیل کرد.

## ۴- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱) در محاسبات انجام گرفته برای بیشینه توان سرمایش، ولتاژ و جریان اعمالی برای هر TEC به ترتیب برابر ۱۵/۶۶ ولت و ۹/۷۷ آمپر و توان سرمایش و ضریب عملکرد بترتیب برابر ۵۸/۴۱ وات و ۰/۴۰۵۶ بدست آمدند.

۲) در محاسبات انجام گرفته برای بیشینه ضریب عملکرد، ولتاژ و جریان اعمالی برای هر TEC بترتیب برابر ۴/۰۴ ولت و ۲/۰۳ آمپر و توان سرمایش و ضریب عملکرد بترتیب برابر ۱۵/۶۶وات و ۱/۶۴ بدست آمدند.

۳) تاثیر آرایش الکتریکی سری و موازی بر عملکرد TECها بدین گونه است که: موازی بستن TECها منجر به افزایش توان سرمایشی و همچنین سری بستن TECها منجر به افزایش ضریب عملکرد می شود.

۴) بیشترین مقدار توان سرمایش در بین سه آرایش پیشنهادی متعلق به آرایش(۲×۱۲) در هر دو شیوه اتصال به پنل و به باطری بدست آمد.

۵) بیشترین مقدار ضریب عملکرد در بین سه آرایش پیشنهادی متعلق به آرایش (۴×۶) در هر دو شیوه اتصال به پنل و به باطری بدست آمد.

۶) به منظور نزدیک شدن به بهترین عملکرد سردکنهای ترموالکتریک به هر دو شیوه بیشینه توان سرمایش و ضریب عملکرد بطور همزمان، با انتخاب آرایش (۳×۸) هم می توان بر اوج بار سرمایش نزدیک شد و هم ضریب عملکرد بالایی داشت.

۷) توان سرمایش تولیدی و انرژی سرمایش تولیدی ماهیانه ۲۴ سردکن ترموالکتریک در آرایش الکتریکی (۳×۸) در حالت اتصال به باطری بترتیب برابر ۹۳۲/۸۸ وات و ۳۷۵/۹۳ کیلو وات ساعت خواهد بود.

## ۵- نمادها

| | |
|---|---|
| $COP_{mp}$ | ضریب عملکرد متناسب با بیشینه توان سرمایش |
| $COP_{max}$ | ضریب عملکرد متناسب با بیشینه ضریب عملکرد |
| $\boldsymbol{i_{TE}}$ | جریان اعمالی به هر سردکن ترموالکتریک، (A) |
| $\boldsymbol{i_{mp}}$ | جریان متناسب با بیشینه توان سرمایش، (A) |
| $i_{mc}$ | جریان متناسب با بیشینه ضریب عملکرد، (A) |
| $k$ | رسانایی گرمایی سردکن ترموالکتریک، (W/m.K) |
| $K_1$ | نسبت جریان اتصال کوتاه به دمای سلول خورشیدی، (A/K) |
| $Q_c$ | آهنگ انتقال گرما در اتصال سرد، (W) |
| $Q_h$ | آهنگ انتقال گرما در اتصال گرم، (W) |
| $Q_{c.mp}$ | توان سرمایش متناسب با بیشینه توان سرمایش، (W) |
| $Q_{c.mc}$ | توان سرمایش متناسب با بیشینه ضریب عملکرد، (W) |
| $R$ | مقاومت الکتریکی سردکن ترموالکتریک، (Ω) |
| $T_h$ | دمای اتصال گرم، (T) |
| $T_c$ | دمای اتصال سرد، (T) |
| $T_{sc}$ | دمای سلول خورشیدی، (T) |
| $\bar{T}$ | میانگین دمای اتصالات، K |
| $v_{TE}$ | ولتاژ اعمالی به هر سردکن ترموالکتریک، (V) |
| $V_{mp}$ | ولتاژ متناسب با بیشینه توان سرمایش، (V) |
| $V_{mc}$ | ولتاژ متناسب با بیشینه ضریب عملکرد، (V) |
| $\dot{W}_{TE}$ | توان مصرفی سردکن ترموالکتریک، (W) |
| $\dot{W}_{PV}$ | توان تولیدی پنل فوتوولتاییک، (W) |

| | |
|---|---|
| $Z$ | معیار شایستگی، (1/K) |
| $\alpha$ | ضریب سیبک، $(V/K)$ |
| $\beta_{sc}$ | پکینگ فکتور |

## ۶- مراجع


[1] Kong X., Lu S., Wu Y., A review of building energy efficiency in China during eleventh five-year plan period. *Energy Policy*, Vol.41, pp.624-635, 2012.

[2] Nguyen T.A., Aiello M., Energy intelligent buildings based on user activity: a survey. *Energ Buildings*, Vol.56, pp.244-257, 2013.

[3] IEA, Renewable for heating and cooling. Untapped potential. *International Energy Agency*: Paris, France, 2007.

[4] Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. Energy Buildings. 2008;40:394-398.

[5] Santamouris M., Argiriou A., Renewable energies and energy conservation technologies for buildings in southern Europe. *International Journal of Solar Energy*, Vol.15, pp.69-79, 1994.

[6] Elghool A., Basrawi F., Ibrahim T.K., Habib K., Hassan Ibrahim H.,Idris DMND. A review on heat sink for thermo-electric power generation: classifications and parameters affecting performance. *Energ Conver Manage,* Vol.134, pp. 260-277, 2017.

[7] Thirugnanasambandam M., Iniyan S., Goic R., A review of solar thermal technologies. *Renew Sustain Energy Rev*. Vol.14, pp.312-322, 2010.

[8] Afshar O., Saidur R., Hasanuzzaman M., Jameel M., A review of thermodynamics and heat transfer in solar refrigeration system. *Renew Sustain Energy Rev*. Vol.16, pp.5639-5648, 2012.

[9] Kalkan N., Young E.A., Celiktas A., Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning. *Renew Sustain Energy Rev*. Vol.16, pp.6352-5683, 2012.

[10] Rowe D., *Thermoelectric handbook, 1st ed*. Boca Ration: CRC/Taylor & Francis, 2006.

[11] Yang J., Stabler F.R., Automotive applications of thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*, Vol.38, No.7, pp.1245-1251, 2009.

[12] Phelan P.E., Chiriac V.A., Lee T-Y.T., Current and future miniature refrigeration cooling technologies for high power microelectronics. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*.Vol.25, No.3, pp.356-365,2002.

[13] Huang H.S., Weng Y.C., Chang Y.W., Chen S.L., Ke M.T., Thermo electric water-cooling device applied to electronic equipment. *Int Commun HeatMass Transf*; Vol. 37, pp.140–6, 2010.

[14] Riffat S.B., Qiu G., Comparative investigation of thermoelectric air- conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners. *Appl Therm Eng*, Vol.24, No.14-15, pp.1979-1993, 2004.

[15] Liu Z.B., Zhang L., Gong G.C., Experimental evaluation of a solar thermoelectric cooled ceiling combined with displacement ventilation system. *Energ Conver Manage*, Vol.87, pp.559-565, 2014.

[16] Liu Z.B., Zhang L., Gong G.C., Li H.X., Tang G.F., Review of solar thermoelectric cooling technologies for use in zero energy buildings. *Energ Buildings*, Vol.102, pp.207-216, 2015.

[17] Khire R.A., Messac A., Van Dessel S., Design of thermoelectric heat pump unit for active building envelope systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48, pp.4028-4040, 2005.

[18] Khire R.A., Messac A., Van Dessel S., Study of the performance of thermoelectric modules for use in active building envelopes. *Build Environ*, Vol.42, pp.1489-1502, 2007.

[19] Xu X, Van Dessel S. Evaluation of a prototype active building envelope window-system. Energ Buildings. 2008;40(2):168-174.

[20] Luo Y., Zhang L., Liu Z., Wang Y., Meng F., Wu J., Thermal performance evaluation of an active building integrated photovoltaic thermoelectric wall system, *Applied Energy,* Vol.177, pp.25–39, 2016.

[21] Qiu ch., Shi W., Comprehensive modeling for optimized design of a thermoelectric cooler with non-constant cross-section: Theoretical considerations, *Applied Thermal Eng., Vol.176, pp.115384, 2020.*

[22] Sun D., Shen L., Modeling and analysis of the influence of Thomson effect on micro-thermoelectric coolers considering interfacial and size effects, *Energy, Vol.196, pp.117116, 2020*

[23] Weera S.L.L., Analytical performance evaluation of thermoelectric modules using effective material properties. http://scholarworks.wmich.edu/masters_theses/483. (access 2020)

[24] Rowe D.M., *CRC handbook of thermoelectrics*. CRC Press Inc., 1995.

[25] Nolas G.S., Sharp J., Goldsmid H.J., *Thermoelectrics-basic principles and new materials developments*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.

[26] Jha V., Triar U.SH., A novel approach for evaluation of parameters of photovoltaic modules. *Applied Eng*., Vol.12 pp.11167-78, 2017.

[27] LG Electronics, Photovoltaic panel, Unit Model: LG325N1C-A5, (access 2020)

[28] Climate Monitoring. http://re.jrc.ec.europa.eu. (access 2020)

[29] Khire R.A., Messac A., Van Dessel S., Study of the performance of thermoelectric modules for use in active building envelopes. *Build Environ*, Vol.42, pp.1489-1502, 2007.