

# پتانسیل انرژی خورشیدی در ساختمان‌های انرژی صفر - مدیریت سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت خورشیدی در ساختمان‌های انرژی صفر با استفاده از مفهوم انرژی هاب

رسول رعیت، سید عباس طاهر، مریم السادات اخوان حجازی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه کاشان

کاشان، ایران

rasoulrayat@gmail.com, sataher@Kashanu.ac.ir, mhejazi@Kashanu.ac.ir

PV/T به یک تعادل انرژی صفر نزدیک می‌شود، اما نتایج به تعریف nZEB، شرایط مرزی و طراحی سیستم انرژی ساختمان بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی — انرژی صفر؛ انرژی هاب؛ فتوولتائیک؛ هیبرید خورشیدی؛ PV/T

## ۱. مقدمه

ساختمان‌ها در حدود یک سوم از مصرف انرژی جهانی و سهم مشابهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای را شامل می‌شوند [۱]. در ترازنامه انرژی ایران این میزان در حدود نیمی از مصرف انرژی است. از این رو، ساختمان‌ها به‌منظور کاهش تقاضای انرژی جهانی و تولید گازهای گلخانه‌ای از اهمیت و پتانسیل بیشتری نسبت به سایر مصرف‌کنندگان برخوردار هستند. در یک ساختمان خالص انرژی صفر (nZEB)، مقدار انرژی موردنیاز برای راه‌اندازی ساختمان توسط منابع انرژی تجدید پذیر در یا نزدیک ساختمان تولید می‌شود. در طول یک بازه زمانی مشخص، معمولاً یک سال، ساختمان به یک تراز انرژی صفر خالص می‌رسد. اتحادیه اروپا در طرح دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها (EPBD)<sup>2</sup>، به کشورهای عضو دستور داده است تا سال ۲۰۲۰، اطمینان پیدا کنند که همه ساختمان‌های جدید صفر انرژی و یا نزدیک به صفر انرژی باشند [۲]. استفاده از انرژی خورشیدی فعال یکی از استراتژی‌های اصلی استفاده از

چکیده — در یک ساختمان خالص انرژی صفر (nZEB<sup>1</sup>)، تقاضای انرژی ساختمان توسط انرژی تجدید پذیر تولیدشده در محل ساختمان برآورده می‌شود. ساختمان‌ها نیازمند انرژی به شکل گرما و الکتریسیته هستند و به‌کارگیری انرژی خورشیدی با توان تولید حرارت و الکتریسیته به‌منظور رسیدن به تعادل انرژی صفر خالص مهم است. تأسیسات خورشیدی حرارتی و فتوولتائیک خورشیدی PV در پروژه‌های با اهداف بهینه‌سازی انرژی و یا مناطق با دسترسی جغرافیایی محدود برای تولید انرژی محلی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مازول فتوولتائیک - حرارتی هیبریدی (PV/T) که در آن گرما و الکتریسیته هم‌زمان تولید می‌شود، یک فناوری جالب برای کاربردهای ساختمانی است که می‌تواند به‌طور بالقوه منجر به افزایش بازده کلی و استفاده کم‌تر از فضا شود. این مقاله یک مطالعه مقایسه‌ای از راه‌حل‌های مختلف انرژی خورشیدی برای یک ساختمان با کاربری مسکونی در ایران با هدف یک موازنه انرژی خالص صفر را توصیف می‌کند. شبیه‌سازی با استفاده از مدل توسعه داده‌شده انرژی هاب انجام می‌شود. در این مقاله مدل انرژی هاب برای سیستم‌های تجدید پذیر خورشیدی توسعه داده می‌شود. سامانه‌های حرارتی جداگانه و خورشیدی با سامانه‌های PV / T مقایسه شده‌اند و تعادل‌های انرژی حاصل تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ساختمان با مازول‌های

<sup>2</sup> Energy performance building directive

<sup>1</sup> Net zero energy building

شده (covered) و پوشیده نشده (uncovered) ایجاد می‌شود. به بیان ساده، ماژول PV / T پوشیده نشده یک ماژول PV با خنک‌کننده است که مقدار مساوی یا بیشتر از یک ماژول PV معمولی انرژی الکتریکی تولید می‌کند و علاوه بر آن گرمای با دمای کم نیز وجود دارد.

## ۱.۲. ساختمان انرژی صفر

تعاریف مختلفی از یک ساختمان خالص انرژی صفر وجود دارد. به‌طور کلی، یک nZEB می‌تواند به‌عنوان ساختمانی تعریف شود که به تعادل انرژی صفر خالص در یک بازه زمانی مشخص (معمولاً یک سال) می‌رسد. هدف اتحادیه اروپا در EPBD تعیین یک ساختمان تقریباً صفر انرژی به‌عنوان ساختمانی با عملکرد انرژی بسیار بالا است که در آن «مقدار انرژی موردنیاز (تقریباً صفر یا کم) باید تا حد زیادی توسط انرژی از منابع تجدید پذیر تأمین شود، از جمله انرژی از منابع تجدید پذیر که در محل ساختمان یا نزدیکی به آن وجود دارد» [۲]. مقدار انرژی که باید در محل ایجاد شود تا به تعادل انرژی صفر برسد، به تعریف nZEB بستگی دارد. پیشنهادی برای تعریف nZEB توسط Sartori و همکاران در [۶] ارائه شده است. مرز سیستم که در اینجا مورد استفاده قرار می‌گیرد، خود ساختمان است و تراز واردات / صادرات انرژی سالانه مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ یعنی تعادل بین انرژی تحویلی، یا وارداتی به ساختمان (Edel) توسط حامل i و انرژی صادر شده از ساختمان (Eexp) (کیلووات ساعت) محاسبه می‌شود. تأسیسات انرژی خورشیدی در سقف در داخل مرز سیستم قرار دارند. سپس تعادل انرژی بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌شود. تعادل در این مورد با مقادیر ساعتی در بازه یک سال محاسبه می‌شود. اگر Enet (کیلووات ساعت) صفر یا بزرگ‌تر باشد تعادل انرژی صفر حاصل شده است.

$$(۱) \quad E_{net} = \sum_i [E_{exp, i} - E_{del, i}] F_{pi}$$

در اینجا برای رسیدن به تعادل انرژی صفر خالص، اولویت اول باید کاهش نیاز به انرژی تحویلی باشد و سپس برآورده کردن تقاضای باقی‌مانده با منابع انرژی تجدید پذیر در ساختمان. انرژی تحویلی می‌تواند شامل برق، گاز، زیست‌توده، گرمایش منطقه‌ای، یا سایر حامل‌های انرژی باشد. انرژی صادر شده به‌طور کلی تنها برق است، اما در برخی موارد نیز می‌تواند شامل گرما، برای یک شبکه گرمایش منطقه‌ای باشد. برای مقایسه انرژی از منابع مختلف می‌توان از فاکتور وزن دهی در حالت برابر استفاده کرد. به طور مثال برای تولید یک کیلووات ساعت برق در ایران به طور تقریبی ۲,۴۸ کیلووات ساعت انرژی حرارتی (از نوع گاز طبیعی) نیاز است. اگر انرژی اولیه سیستم

انرژی تجدید پذیر در ساختمان‌ها است که برای رسیدن به تعادل انرژی صفر ضروری است. ساختمان‌ها در طول زمان بهره‌برداری نیاز به انرژی به شکل گرما و الکتریسیته دارند که می‌تواند توسط جمع‌کننده‌های حرارتی خورشیدی و ماژول‌های فتوولتاییک (PV) تأمین شود. در پروژه‌های ساختمانی با اهداف بهینه‌سازی انرژی و یا دسترسی جغرافیایی محدود کلکتور خورشیدی و ماژول PV برای اشغال فضای موجود در ساختمان‌ها و نماها، رقابت می‌کنند. در ماژول فتوولتاییک - حرارتی هیبریدی PV / T، الکتریسیته و گرما هم‌زمان تولید می‌شوند. این می‌تواند منجر به افزایش کارایی کلی در هر ماژول و احتمالاً به کاهش استفاده از فضا در مقایسه با سامانه‌های جداگانه شود؛ بنابراین PV / T یک فناوری جالب برای ساختمان‌ها است. این مقاله یک مطالعه تطبیقی را برای سامانه‌های حرارتی خورشیدی، PV و PV / T که در مورد یک ساختمان مسکونی ایرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، توصیف می‌کند. در اینجا شبیه‌سازی با مدل توسعه داده شده انرژی هاب با هدف رسیدن به تعادل انرژی صفر در یک سال انجام شده است. تعادل انرژی ساختمان محاسبه شده و عملکرد انرژی سامانه‌های مختلف تحلیل شده است.

## ۱.۱. ماژول (PV / T)

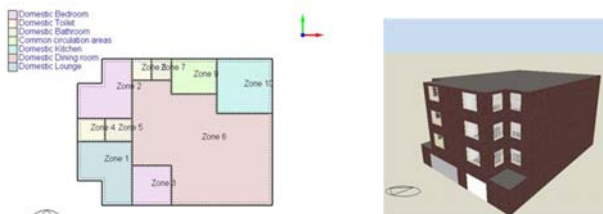
فناوری هیبرید حرارتی - فتوولتاییک تاکنون به لحاظ تجاری در مقایسه با PV یا کلکتورهای حرارتی برتری ندارد، اما علاقه به فناوری به‌خصوص در ارتباط با ساختمان‌های کم انرژی یا صفر انرژی در حال افزایش است. بازار PV / T در دهه گذشته افزایش یافته است و تعدادی از تولیدکنندگان ماژول‌های فتوولتاییک هم‌اکنون ماژول PV / T تولید می‌کنند. برخی تولیدکنندگان حتی در فناوری PV / T تخصص دارند و به طور انحصاری این ماژول‌ها را تولید می‌کنند. تعدادی از انواع فناوری‌های PV / T مختلف در دسترس هستند. آن‌ها می‌توانند برای مثال بر اساس نوع محیط انتقال حرارت (هوا یا مایع)، پیکربندی شیشه‌ها و فناوری PV مورد استفاده قرار گیرند. ماژول PV به طور متوسط تنها حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد از تابش خورشیدی را به الکتریسیته تبدیل می‌کند در حالی که بقیه به‌صورت گرما در ماژول منعکس یا پراکنده می‌شوند. ایده اساسی در پشت فناوری PV / T استفاده بیشتر از تابش خورشیدی دریافتی از ماژول‌های PV است [۳]. از آنجاکه بازده سلول PV معمولاً با افزایش دمای سلول کاهش می‌یابد، حذف گرمای پسماند می‌تواند منجر به افزایش تولید برق شود. ماژول‌های هیبریدی را می‌توان بر اساس فناوری به کار رفته در کلکتور حرارتی و رسانای حرارتی متمایز کرد. به طور مثال ماژول‌های هیبرید با محیط انتقال حرارت هوا و با مایع. این مطالعه تنها بر روی ماژول‌های PV / T مسطح با محیط انتقال حرارت مایع متمرکز است. برای این نوع، تمایز اساسی بین ماژول‌های پوشیده

$$(۳) \quad SF_{el} = \sum_{year} \left[ \frac{Esol(t)}{E_{need}(t)} \right]$$

که در آن Esol (کیلووات ساعت) انرژی الکتریکی تولید شده توسط فتولتاییک است که در محل ساختمان تولید و مصرف شده است؛ و Eneed (کیلووات ساعت) انرژی الکتریکی مورد نیاز برای بارهای الکتریکی ساختمان است و نه بارهای سرمایشی یا گرمایشی.

## ۲. مدل مفهومی ساختمان انرژی صفر

مدل ساختمان (شکل ۲) در شبیه‌سازی‌ها مبتنی بر مدل ساختمان مفهومی طراحی شده در تهران است. یک ساختمان مسکونی سه طبقه با مساحت زیربنای ۱۳۰۵ مترمربع به منظور به دست آوردن عملکرد انرژی یک ساختمان ساده و واقع‌بینانه به عنوان مبنای مطالعات، در نرم‌افزار دیزاین بیلدر (Design Builder) مدل شده است. مدل مفهومی بر اساس فن‌آوری موجود در صنعت ساخت‌وساز طراحی شده است. در این مدل از مواد متعارف در صنعت ساختمان استفاده شده و جهت‌گیری آن بر اساس دریافت بیشترین انرژی پسیو خورشیدی بهینه شده است؛ بنابراین این مدل برای استفاده به عنوان پایه‌ای برای تحلیل سیستم انرژی خورشیدی مناسب است. پروفیل بار به دست آمده از شبیه‌سازی در جدول (۱) مشخص شده است.

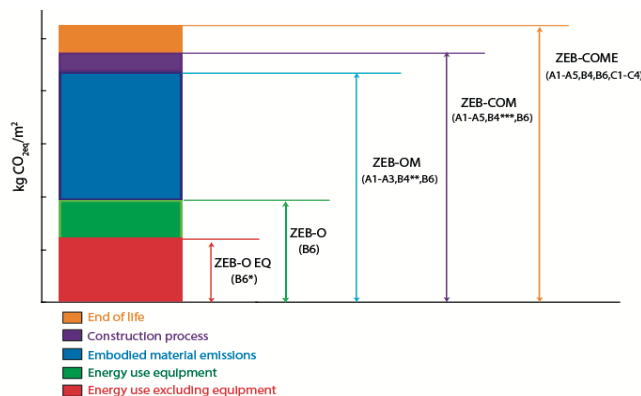


شکل ۲ نمای سه‌بعدی (راست) و تک‌بعدی (چپ) ساختمان انرژی صفر

جدول ۱ پروفایل بار ساختمان - خروجی نرم افزار Design Builder

Consumption	Energy (kwh)	Energy (kwh/m <sup>2</sup> )
Electricity	22303	22.1
Space Cooling	18033	17.9
Space Heating	20341	20.2
DHW	11385	11.32
<b>Total</b>	<b>72062</b>	<b>71.52</b>

گاز طبیعی در نظر گرفته شود ارزش هر کیلووات ساعت برق معادل ۲,۴۸ کیلووات ساعت گاز طبیعی است. در اینجا Fpi ضرایب انرژی اولیه برای حامل i می باشد. سطوح و چارچوب کامل تعریف در پژوهش Dokka و همکاران [۷] توضیح داده شده است (شکل ۱). در این مقاله، هدف رسیدن به nZEB-O است که به این معنی است که نیاز انرژی برای بهره‌برداری از ساختمان در محاسبه موازنه انرژی در نظر گرفته می‌شود. تقاضای انرژی تجهیزات، مانند کامپیوترها و روشنایی، در نظر گرفته می‌شود، تقاضای انرژی برای مواد، ساخت و تخریب در این مطالعه قرار نمی‌گیرد.



شکل ۱ سطوح تعریف ساختمان انرژی صفر

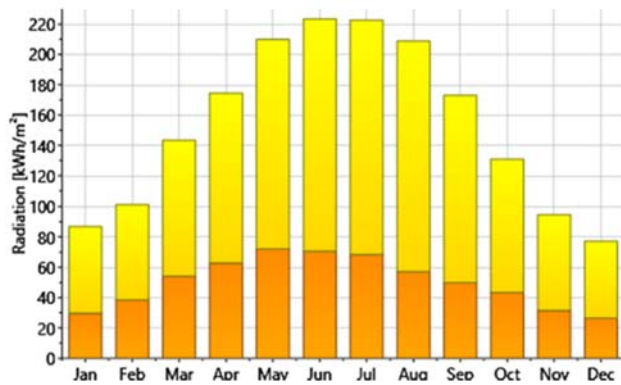
## ۱.۳ سهم (کسر) خورشیدی

علاوه بر Enet، دانستن سهم خورشیدی، یعنی میزان حرارت و الکتریسیته که توسط انرژی خورشیدی برآورده می‌شود، جالب است. سهم خورشیدی حرارتی (SFth) بر اساس معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$(۲) \quad SF_{th} = \sum_{year} \left[ \frac{Q_{sol}(t)}{Q_{sol}(t) + Q_{aux}(t)} \right]$$

که در آن Qsol (کیلووات ساعت) بخشی از انرژی خورشیدی است که بار ساختمان را تامین می‌کند و Qaux (کیلووات ساعت) انرژی کمکی است که توسط بویلر بار ساختمان را تامین می‌کند. بخش خورشیدی حرارتی معمولاً در محاسبات حرارتی خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما ما در اینجا از تعریف یک سهم خورشیدی خاص مربوط به برق (SFel) که بر اساس معادله (۳) محاسبه شده است، نیز استفاده می‌کنیم.

مخزن یکسان است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مفهوم انرژی هاب انجام می‌شوند که یک روش شبیه‌سازی برای راه‌حل‌های انرژی با اشکال گوناگون (حرارتی، سرمایشی، الکتریکی و ...) است. داده‌های هواشناسی از بانک اطلاعاتی نرم‌افزار **Meteonorm** استخراج شده است. مدل‌سازی سامانه‌ها برای این مطالعه بر اساس داده‌ها از تولیدکنندگان است. خروجی انرژی، کسر و تعادل انرژی برای هر یک از سامانه‌ها محاسبه می‌شود.



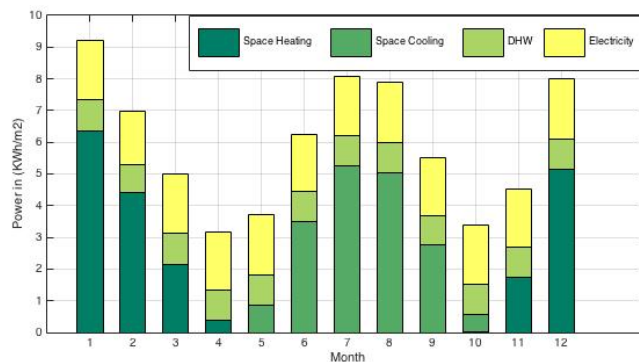
شکل ۴ تابش خورشیدی در زاویه ۳۳ درجه در تهران - از نرم‌افزار

Meteonorm

### ۴. مدل‌سازی

#### ۴.۱. انرژی هاب

انرژی هاب روشی برای تحلیل و بهینه‌سازی ترکیبی سامانه‌های تبدیل توان کوپل شده از زیرساخت‌های مختلف انرژی همانند الکتریسیته، گاز، گرمایش منطقه‌ای و دیگر ارائه می‌دهد. انرژی هاب شامل تعداد دلخواهی از مدل‌ها، انتقال‌دهنده‌ها و تولیدکننده‌های انرژی از حامل‌های مختلف در حالت پایدار خود است [۸]. در این مقاله مدل انرژی هاب برای تحلیل سامانه‌های تجدید پذیر در ساختمان‌ها توسعه داده می‌شود. مدل انرژی هاب در ساختمان‌های نمونه A تا C در شکل (۵) آمده است.

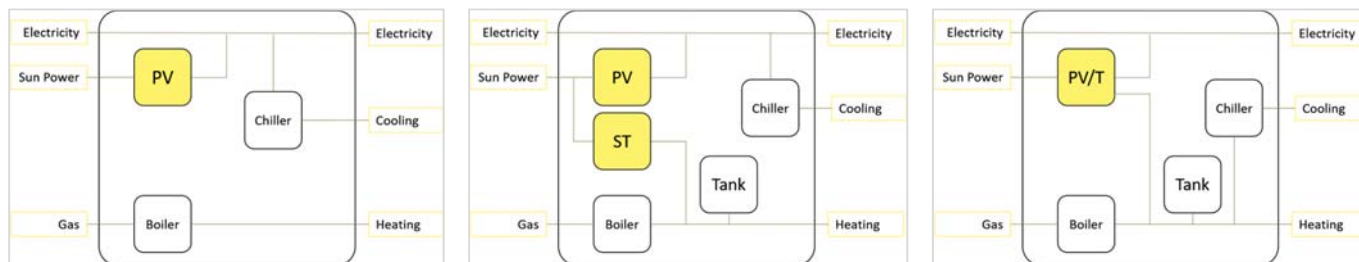


شکل ۳ پروفیل بار ساختمان در هر مترمربع - ماهانه

### ۳. روش مطالعه

سه نسخه از مدل ساختمان برای مطالعه عملکرد سامانه‌های انرژی خورشیدی مختلف شبیه‌سازی شده‌اند. ساختمان A یک سیستم با سطح پوشیده شده از ماژول‌های فتوولتائیک دارد. ساختمان B سامانه‌ای متشکل از ماژول‌های فتوولتائیک و کلکتورهای حرارتی خورشیدی دارد. باین حال در سیستم B کلکتورهای خورشیدی صرفاً برای تأمین گرمایش آب مصرفی مورداستفاده قرار می‌گیرد. ساختمان C یک سیستم با سطح کاملاً پوشیده شده از سیستم‌های هیبرید فتوولتائیک- حرارتی دارد.

سامانه‌های کنترلی تهویه مطبوع دمای رفاه در تابستان و زمستان را به ترتیب ۲۵ و ۱۸ درجه تنظیم می‌کند. بخش مرکزی سیستم گرمایش یک مخزن ذخیره آب عایق است که انرژی و بافر بین منابع گرما و بارها در ماه‌های مختلف ذخیره می‌کند. گنجایش این مخزن در سامانه‌های تعریف شده تفاوت می‌کند. در ساختمان‌های C, B استراتژی کنترل، گرمایش را از سامانه‌های انرژی خورشیدی اولویت‌بندی می‌کند. هنگامی که لازم است انرژی حرارتی کمکی توسط بویلر تأمین می‌شود. در ساختمان A و B از خنک‌کننده‌های تراکمی استفاده می‌شود و در ساختمان C از خنک‌کننده‌های جذبی استفاده می‌شود. هیچ منبع ذخیره انرژی الکتریکی در سیستم مورداستفاده قرار نمی‌گیرد. سیستم گرمایش خورشیدی در تمام نسخه‌های ساختمان به‌جز ابعاد



شکل ۵ مدل انرژی هاب ساختمان انرژی صفر - مدل A تا C به ترتیب از سمت چپ

$$(۸) \quad \eta_{stc} = \frac{Esol}{G \cdot A}$$

که در آن  $G$  تابش خورشید (وات بر مترمربع) و  $A$  مساحت ماژول (مترمربع) است. سامانه‌های فتوولتاییک به‌طور متوسط بازدهی بین ۱۰ تا ۲۰ درصد دارند. پارامترهای زیادی بر این بازده مؤثر هستند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دمای عملیاتی سلول اشاره کرد. بازدهی سلول‌های خورشیدی رابطه تقریباً خطی با دمای عملیاتی سلول ( $NOCT^*$ ) دارد و با افزایش دما به توان خروجی سلول به‌طور متوسط ۰٫۵ درصد کاهش می‌یابد. دمای سلول از رابطه زیر به دست می‌آید [۲].

$$(۹) \quad T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT-20}{800} G$$

که در آن  $T_{cell}$  دمای سلول فتوولتاییک،  $T_{air}$  دمای محیط و  $NOCT$  دمای عملکرد ماژول در شرایط استاندارد است که توسط سازنده اعلام می‌شود.  $G$  تابش خورشیدی (وات بر مترمربع) است؛ بنابراین بازدهی الکتریکی فتوولتاییک از رابطه زیر به دست می‌آید [۹].

$$(۱۰) \quad \eta_e = (1 - (T_{cell} - T_{cell}(stc)) * Ct) * \eta_{stc}$$

که در آن  $\eta_{stc}$  بازدهی در شرایط استاندارد دمایی (STC) سیستم فتوولتاییک است.  $Ct$  ضریب کاهش بازدهی (درصد بر درجه سانتی‌گراد) است. در معادله (۱۰) حداکثر بازدهی سیستم فتوولتاییک برابر با بازده  $\eta_{stc}$  است. در سامانه‌های هیبرید-فتوولتاییک با توجه به مکانیسم جمع‌آوری گرمای ماژول تغییرات دما متعادل‌تر است. همچنین سیستم کنترلی از افزایش بیش‌ازاندازه دمای ماژول جلوگیری می‌کند که در مناطق با دمای هوای و تابش خورشیدی زیاد احتمالاً باعث افزایش عملکرد الکتریکی سیستم می‌شود- معادله (۱۱).

$$(۱۱) \quad T_{cell} < \frac{T_i + T_o}{2}$$

که در آن  $T_{cell}$  دمای سلول،  $T_i$  دمای آب ورودی به ماژول و  $T_o$  دمای آب خروجی از ماژول (درجه سانتی‌گراد) است [۹].

### ۴٫۳. بازدهی حرارتی کلکتور

میزان انرژی حرارتی که می‌توان از یک کلکتور خورشیدی کسب کرد در معادله (۱۲) آمده است.

در این مدل ماتریس تبدیل، شامل ضرایب تبدیل (بازدهی) انرژی از حامل ورودی به شکل موردنیاز در خروجی است. مجموع انرژی ورودی و خروجی باهم برابر است. پس از ایجاد سیستم انرژی ماتریس تبدیل با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید. در معادلات (۴) تا (۶) روابط صرفاً برای ساختمان  $A$  نوشته شده است. نحوه به دست آوردن ماتریس تبدیل (۷) به‌طور کامل در مطالعه‌ی Geidl در مطالعه‌ای شرح داده شده است [۸].

روابط برای سیستم  $A$  نوشته شده است. با همین روش ماتریس تبدیل برای سایر سامانه‌ها نیز به دست می‌آید.

$$(۴) \quad P_{eo} = v \cdot (P_{ei} + \eta_e \cdot P_{sun})$$

$$(۵) \quad P_{cool} = \eta_{ch} \cdot (1 - v) \cdot (P_{ei} + \eta_e \cdot P_{sun})$$

$$(۶) \quad P_{heat} = P_{gas} \cdot \eta_{bo}$$

$$\begin{bmatrix} P_{eo} \\ P_{cool} \\ P_{heat} \end{bmatrix} = C * \begin{bmatrix} P_{ei} \\ P_{sun} \\ P_{gas} \end{bmatrix}$$

(۷)

$$C = \begin{bmatrix} v & v \cdot \eta_e & 0 \\ \eta_{ch} \cdot (1 - v) & \eta_{ch} \cdot \eta_e \cdot (1 - v) & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{bo} \end{bmatrix}$$

که در اینجا  $P_{eo}$ ،  $P_{cool}$  و  $P_{heat}$  به ترتیب دیماند الکتریکی، برودتی و حرارتی ساختمان (کیلووات ساعت) است.  $P_{sun}$ ،  $P_{ei}$  و  $P_{gas}$  نیز توان‌های ورودی به سیستم از شبکه الکتریکی، تابش خورشیدی و شبکه گاز (کیلووات ساعت) است. همچنین  $v$  ضریبی است بین ۰ تا ۱. در این معادلات  $\eta_e$ ،  $\eta_{ch}$  و  $\eta_{bo}$  به ترتیب بازدهی الکتریکی فتوولتاییک، بازدهی چیلر و بازدهی بویلر می‌باشند. ماتریس تبدیل (C) در (۷) خروجی‌های سیستم را به ورودی‌ها ارتباط می‌دهد.

### ۴٫۲. بازدهی الکتریکی فتوولتاییک

بازدهی ماژول‌های فتوولتاییک به نسبت انرژی الکتریکی خروجی به انرژی نور خورشید دریافتی گفته می‌شود. بدین ترتیب بازده تبدیل انرژی یک سلول خورشیدی در شرایط استاندارد دمایی ( $STC^*$ ) از معادله (۸) به دست می‌آید.

<sup>4</sup> Nominal operating cell temperature

<sup>3</sup> Standard thermal condition:  $G = 1000w/m^2$   $T_{cell} = 25 C$

در این مطالعه سایه‌اندازی در زمستان قابل صرف نظر کردن است. طول هر ردیف برابر طول ساختمان و ۱۸ متر است.

### ۵. طراحی سیستم خورشیدی

خلاصه‌ای از ویژگی‌های ماژول‌های انتخاب شده در جدول ۲ ارائه شده است. بازار ماژول PV / T هنوز در مقایسه با انرژی خورشیدی و PV نسبتاً کوچک است. همچنین هنوز فقدان مقررات در مورد آزمایش و صدور گواهی تاییدیه ماژول PV/T وجود دارد، اما از سال ۲۰۱۳ امکان تایید ماژول‌ها بر اساس استاندارد Keymark وجود دارد. بر اساس دستورالعمل‌های گواهی، بازده اتلاف صفر حرارتی باید با سلول‌های PV که در نقطه حداکثر توان کار می‌کنند اندازه‌گیری شود. به علاوه، از آنجاکه عملکرد ماژول PV / T به ویژگی‌های حرارتی و الکتریکی بستگی دارد، پیدا کردن یک ماژول که نشان‌دهنده میانگین بازار است، دشوار است.

جدول ۳ مشخصات سیستم انرژی

Model	PV /ST/PV/T	Tank Volume(L)	ηbo	ηch (COP)
A	72/0/0	-	-	-
B	8/64/0	300	0.75	2.8
C	0/0/64	2500	0.75	0.65

پارامترهای اصلی و ابعاد سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی ساختمان‌ها A، B و C در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. ابعاد سیستم در ساختمان بر اساس سیستم حرارتی کلکتور خورشیدی اندازه‌گیری شده است. طبق دستورالعمل‌های طراحی متداول، سیستم حرارتی خورشیدی برای دریافت بیشتر انرژی گرمایی در ماه‌های زمستان (در اینجا به‌عنوان ماه دی تا اسفند) طراحی شده است. بازدهی متوسط کلکتورها ۲۵ تا ۳۰ درصد است. همچنین منبع ذخیره بایستی بتواند حدود دو برابر توان حرارتی مورد نیاز در یک روز در ساختمان را ذخیره کند. این استراتژی برای هر سه مدل ساختمان مشابه است.

جدول ۲ مشخصات ماژول‌های فتوولتائیک

Module	Technology	brand	Gross area(m <sup>2</sup> )	ηstc	η0	α1	α2	Ct(%/C)
PV	Flat plate	Solon SE	1.63	0.156	-	-	-	- 0.38
ST	Flat plate	Baymak	1.59	-	0.75	4.05	0.009	-
PV/T	Covered	SST Solar	1.67	0.155	0.48	5.2	0.006	- 0.34

$$Q_{heat} = A \cdot (\eta_0 \cdot G - \alpha_1 \cdot \Delta T - \alpha_2 \cdot \Delta T^2) \quad (12)$$

$$\eta h = \eta_0 - \frac{\alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \cdot \Delta T^2}{G} \quad (13)$$

که در آن  $\Delta T$  اختلاف دمای میانگین آب ورودی و خروجی در ماژول با دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) است.  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  ضرایب اتلاف حرارتی ماژول (وات بر درجه سانتی‌گراد) است. کلکتورهای خورشیدی دارای سیستم کنترل است تا از افزایش بیش‌از اندازه دمای آب در حالت ایستا جلوگیری کند. [۹]

### ۴.۴. اهداف و شرایط مرزی

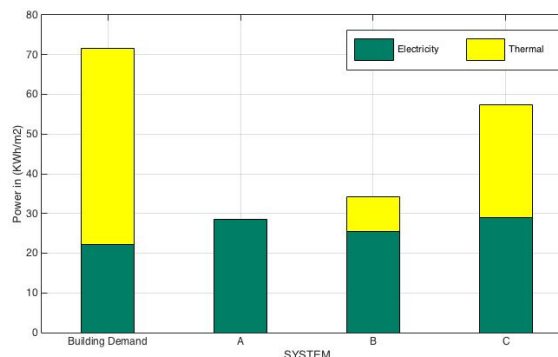
انرژی گرمایی و الکتریسیته کاربردهای متفاوتی در ساختمان‌ها و در نتیجه ارزش متفاوت دارند؛ بنابراین شرایط عینی و مرزی تأثیر قابل توجهی بر نتایج به دست آمده خواهد داشت. مروری بر روش‌شناسی‌ها برای ارزیابی سامانه‌های PV / T در مقایسه با فتوولتائیک و کلکتور حرارتی خورشیدی توسط Kummert و Delisle ارائه شده است [۱۰]. در این مطالعه ما انتخاب کرده‌ایم که از فضای در دسترس موجود به‌عنوان شرایط مرزی استفاده کنیم، اما مقایسه بر اساس انرژی خالص در معادله (۱) محاسبه شده است. در اینجا فرض می‌شود که هیچ ساختمان یا ساختاری اطراف تأسیسات وجود ندارد. فاصله مورد نیاز d (متر) بین ردیف پانل‌های خورشیدی می‌تواند بر اساس معادله (۱۴) محاسبه شود [۲].

$$d = b \cdot \frac{\sin(180-\beta-\gamma)}{\sin(\gamma)} \quad (14)$$

جهت‌گیری بهینه در تهران ۳۳ درجه (β) مایل و در سمت جنوب است. پایین‌ترین زاویه خورشید در تهران حدود ۲۸ درجه (γ) است [۱۱]، به این معنی که ماژول‌ها باید بیشتر از ۳ متر فاصله داشته باشند تا از سایه‌اندازی کاملاً جلوگیری کنند. سقف ۱۴ متر عرض دارد بنابراین ۴ ردیف مناسب است.

## ۶. نتایج شبیه‌سازی

ساختمان‌ها مطابق با شرایط شرح داده‌شده در بخش‌های قبلی شبیه‌سازی شدند. خروجی سالانه این سیستم‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ انرژی تولیدی خورشیدی و تقاضای ساختمان

سیستم‌های با بالاترین خروجی همان سیستم‌های دارای بالاترین تولید انرژی حرارتی (سیستم C) با این روش ارزیابی هستند. بخش‌های انرژی خورشیدی و الکتریکی در جدول ۴، به همراه محاسبات موازنه انرژی واردات / صادرات نشان داده شده‌اند. هیچ‌یک از سیستم‌ها به تعادل انرژی صفر خالص نمی‌رسند. نسبت Eexp / Edel در ستون دوم جدول ۴ درصد انرژی تحویلی را که می‌تواند توسط انرژی صادر شده پوشش داده شود را نشان می‌دهد. این پارامتر می‌تواند نشان دهد یک ساختمان تا چه اندازه نزدیک رسیدن به تعادل انرژی صفر است. سیستمی که خالص انرژی کمتری دارد، سیستم C، با ماژول‌های PV/T است. این سیستم ۶۹ درصد از انرژی دریافتی را به‌وسیله انرژی برق خورشیدی صادر شده جایگزین می‌کند. سیستم A سیستم با ماژول‌های فتوولتائیک کمترین تعادل خالص انرژی و کمترین نفوذ حرارتی خورشیدی را دارد. این‌حال نسبت به سیستم B که دارای تعادل خالص انرژی بیشتر است به ساختمان انرژی صفر نزدیک‌تر است زیرا نسبت صادرات واردات انرژی آن ۳ درصد بیشتر از ساختمان B است. نتایج از این ایده حمایت می‌کند که استفاده از PV/T در ترکیب با پمپ‌های گرما برای ساختمان‌های مسکونی، نسبت به استفاده از جمع‌کننده‌های حرارتی خورشیدی و فتوولتائیک جداگانه، مؤثرتر است.

جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی

Model	Enet	Eexp.Fpi / Edel.Fpi	SFth	SFel
A	-36.4	56%	7.5%	37%
B	-35.7	53%	14%	36%
C	-22.1	69%	57%	37%

## ۷. نتیجه‌گیری

سه سیستم انرژی خورشیدی جایگزین برای یک ساختمان از طریق شبیه‌سازی عملکرد انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. سیستم‌های مورد مطالعه ترکیبی از حرارت خورشیدی و PV (ساختمان A)، ترکیبی از ST و PV (ساختمان B) و سیستمی تنها با PV/T (ساختمان C) هستند. سیستم‌های مبتنی بر ماژول‌های تجاری موجود و الگوهای استاندارد هستند. هدف از مطالعه مقایسه‌ای، ارزیابی این بود که آیا ساختمان با تأسیسات مختلف به تعادل انرژی صفر خالص می‌رسد؟ هدف از این کار موازنه تقاضای انرژی در زمان بهره‌برداری ساختمان، بر اساس سطح nZEB - O، به‌عنوان تعریف ساختمان انرژی صفر بود. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به این تعریف، سیستم C سیستمی است که تنها با ماژول‌های PV/T بیشترین تعادل خالص انرژی صفر را به دست می‌آورد. با این‌حال، تفسیر نتایج بستگی زیادی به معیارهای مورد استفاده در تعریف nZEB دارد، این‌که چه شرایط مرزی استفاده می‌شود و تجهیزات کمکی و تبدیل انرژی چگونه انتخاب می‌شوند.

## ۸. منابع

- [1] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraoui and Y. Mourad, "Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends", Journal of Cleaner Production, vol. 109, pp. 118-130, 2016.
- [2] C. Good, I. Andresen and A. Hestnes, "Solar energy for net zero energy buildings – A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic-thermal (PV/T) systems", Solar Energy, vol. 122, pp. 986-996, 2015.
- [3] S. Joshi and A. Dhoble, "Photovoltaic -Thermal systems (PV/T): Technology review and future trends", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 92, pp. 848-882, 2018.
- [4] M. Lämmle, A. Oliva, M. Hermann, K. Kramer and W. Kramer, "PV/T collector technologies in solar thermal systems: A systematic assessment of electrical and thermal yields with the novel characteristic temperature approach", Solar Energy, vol. 155, pp. 867-879, 2017.
- [5] I. Sartori, A. Napolitano and K. Voss, "Net zero energy buildings: A consistent definition framework", Energy and Buildings, vol. 48, pp. 220-232, 2012.
- [6] D. Das, P. Kalita and O. Roy, "Flat plate hybrid photovoltaic- thermal (PV/T) system: A review on design and development", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 84, pp. 111-130, 2018.
- [7] T.H. Dokka, I. Sartori, M. Tyholt, K. Lien, K. Byskov Lindberg, A Norwegian Zero Emission Building Definition. In: Passivhus Norden, Gothenburg, Sweden, 2013
- [8] M. Geidl Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [9] "ESTIF - European Solar Thermal Industry Federation", Estif.org, [Online]. [Accessed: 13- Aug- 2018].
- [10] V. Delisle and M. Kummert, "A novel approach to compare building-integrated photovoltaics/thermal air collectors to side-by-side PV modules and solar thermal collectors", Solar Energy, vol. 100, pp. 50-65, 2014.
- [11] "SunCalc sun position and sunlight phases calculator", Suncalc.net, [Online]. [Accessed: 13- Aug- 2018].