

بررسی شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

راحیل وفايي^۱

کلیدواژگان: انرژی خورشیدی، سیستم‌های فتوولتائیک، ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک، شیوه‌های طراحی

چکیده

در کشور ایران به سبب مشکلات منابع انرژی فسیلی (محدودیت و آلودگی‌های زیست‌محیطی)، محدودیت‌های برق‌رسانی، لزوم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، و وجود منبع عظیم انرژی خورشیدی در سرتاسر ایران و ضرورت حداکثر بهره‌برداری از این انرژی، امروزه یکی از بهترین راه‌ها به کارگیری سیستم‌های فتوولتائیک به صورت «ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک»^۲ است. نمونه‌های بسیاری از این رویکرد را در کشورهای مختلف می‌توان دید که رشدی چشم‌گیر داشته و همچنان رو به پیشرفت است.

معماران و طراحانی که در پی طراحی ساختمان‌های بی‌آی‌پی‌وی هستند، باید طریقه ترکیب فتوولتائیک‌ها با بنا و مسائلی را که در طراحی باید به آنها توجه شود و به طور کلی شیوه‌های طراحی بی‌آی‌پی‌وی را بدانند؛ اینکه فرایند طراحی بی‌آی‌پی‌وی را چگونه آغاز کنند، در طی این فرایند چگونه عمل کنند، و به پرسش‌هایی که در این زمینه پیش می‌آید چگونه پاسخ درست و مناسب دهند. در این مقاله، شیوه‌های طراحی ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک

از قبیل تعیین جهت و شیب فتوولتائیک‌ها، سایه‌اندازی‌ها، هماهنگی با سیستم‌های غیرفعال خورشیدی، تهویه سیستم، ترکیب فتوولتائیک‌ها با ساختمان و تأثیراتی که بر یکدیگر می‌گذارند، تأثیر فرم پلان و شیب دیوار نمای ساختمان بر نیروی سیستم فتوولتائیک، تعیین نوع و توان سیستم، هماهنگی میان معمار و دیگر مهندسان دست‌اندرکار ساختمان و به طور کلی مسائلی که در طول فرایند طراحی ساختمان یکپارچه با فتوولتائیک مطرح می‌شود، بررسی و در هر زمینه پیشنهادها و راهکارهایی عرضه شده است.

مقدمه

امروزه استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک^۳ در ترکیب با ساختمان، اهمیت و جذابیت زیادی در میان طراحان و معماران یافته است؛ از همین رو، این ساختمان‌ها را باید به گونه‌ای صحیح و با طراحی مناسب ساخت که پس از نصب، برای خود سیستم فتوولتائیک یا برای ساختمان مشکلی ایجاد نکند. بر این اساس، به منظور اجتناب از آلودگی معمارانه لازم است که سیستم‌های فتوولتائیک را به منزله طرحی خود تعریف شده یا یک عنصر معماری در نظر گیریم تا

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده است: «سیستم‌های فتوولتائیک در ترکیب با معماری (ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک (BIPV))»، استاد راهنما: دکتر منصوره طاهباز، تهران، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی، شهریور ۱۳۸۸. rahilvafaei@yahoo.com
2. BIPV (Building Integrated Photovoltaic)

پرسش‌های تحقیق

عوامل مؤثر بر ترکیب یکپارچه سیستم‌های فتوولتائیک با معماری کدام‌اند؟
 آیا یکپارچگی سیستم‌های فتوولتائیک با ساختمان بر طراحی معماری اثر می‌گذارد؟
 چگونه می‌توان از سیستم فتوولتائیک همچون عاملی در کنار دیگر عوامل طراحی ساختمان استفاده کرد؟

فتوولتائیک‌ها در مسیر طراحی، به بخشی معلوم (بدیهی) از ساختمان و کاملاً یکپارچه با آن تبدیل شوند.

همان‌گونه که در طراحی عناصر ساختمان مانند دیوار، پنجره، و سایبان به عرض جغرافیایی محل و اقلیم، همسایگی‌ها، هماهنگی با سیستم‌های غیر فعال خورشیدی، اندازه‌ها، جهت‌ها، زاویه‌ها، و مواردی دیگر توجه می‌شود، فتوولتائیک‌ها نیز در مقام عناصر ساختمانی با این مسائل مرتبط هستند. از این رو، در طراحی و ترکیب فتوولتائیک‌ها با ساختمان نیز باید به تمامی مواردی که یک طراح معمار در طول فرایند طراحی با عوامل مختلف پشت سر می‌نهد، توجه شود.

هدف از این مقاله، بیان شیوه‌های^۴ لازم برای طراحی ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک و توجه به فتوولتائیک‌ها، از ابتدای فرایند طراحی، به عنوان جزء لاینفک ساختمان است.

شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

۱. تعیین جهت و شیب بهینه پنل‌های فتوولتائیک

با افزایش شدت تابش پرتوهای خورشید، مقدار خروج نیروی الکتریکی سیستم فتوولتائیک نیز افزایش می‌یابد؛ بنا بر این، بازده نیروی سیستم فتوولتائیک با میزان دریافت انرژی خورشید رابطه‌ای مستقیم دارد (ت ۱). از طرفی دیگر، تغییر زاویه تابش خورشید و مقدار تابش در زمانهای مختلف در طول روز نیز بر تولید نیروی فتوولتائیک‌ها اثر می‌گذارد؛ از این رو، بازده سیستم فتوولتائیک به جهت و شیب پنل‌های مستقر شده (در رابطه با تابش خورشید) بستگی دارد و در نتیجه جهت‌گیری و شیب پنل‌های فتوولتائیک متأثر از میزان دریافت انرژی خورشید است.

میزان دریافت انرژی خورشید در نقاط مختلف بر اساس تفاوت عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، پدیده‌های جوی، و غیره، متفاوت است؛ بدین سبب، برای کسب اطلاعات مربوط به تابش، باید ایستگاه هواشناسی (عرض و ارتفاع جغرافیایی) آن مکان مشخص شود تا بتوان میانگین ماهانه و سالانه

3 . Photovoltaic (PV)

فتوولتائیک سیستمی است که می‌تواند انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریسیته تبدیل کند.

4 . Concept

5 . Solar Disk

۶. در این کردار، نقطه‌ای که به یک میزان تابش خورشید را دریافت می‌کنند (نقاط هم‌انرژی) در محدوده هم‌رنگ هستند و بدین‌سان، هر محدوده از نظر میزان دریافت انرژی خورشید و تبدیل و تولید آن به نیروی برق، امتیازی به خود اختصاص داده است.

۷. در لندن با عرض جغرافیایی ۵۱ درجه شمالی، حداکثر تابش سالانه روی سطحی ثابت به سمت جنوب با زاویه شیب ۳۱° است.

8. Randall Thomas & Max Fordham, *Photovoltaics and Architecture*, London, Spon Press, 2003, p.18

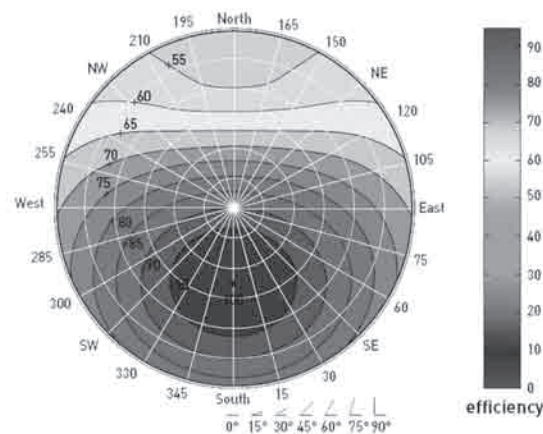
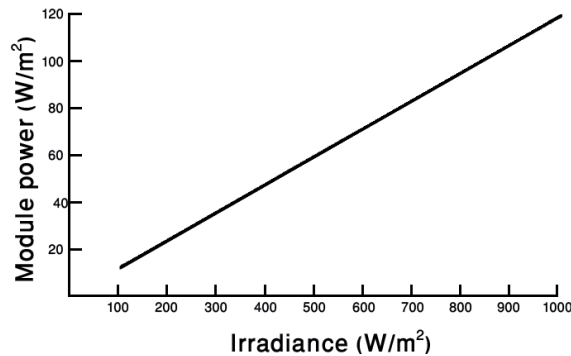
ت.۱. کردار تغییر نیروی پنل‌های فتوولتائیک با شدت تابش خورشید (مأخذ: Randall Thomas & Max Fordham, (p. 141

ت.۲. نمونه کردار تابش خورشید (مأخذ: CLEFS CEA, *Building Integrated Photovoltaic System*, p. 124

کرد، لیکن زاویه شیب پنل‌ها (نسبت به افق) مسئله مهمتری است. با تعیین زاویه شیب بهینه (بسته به زمان‌های استفاده از سیستم) میتوان حدود ۹۵٪ حداکثر انرژی خروجی را به دست آورد.^۸

۲. تأثیر سایه‌اندازها بر پنل‌های فتوولتائیک

سایه یکی از عواملی است که بر میزان دسترس به خورشید اثر می‌گذارد. انعکاس زمین، سایه ساختمان‌های اطراف، سایه خود ساختمان، و سایه پنل‌ها روی یکدیگر ممکن است بر سیستم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان تأثیر بنهد. طراح معمار باید

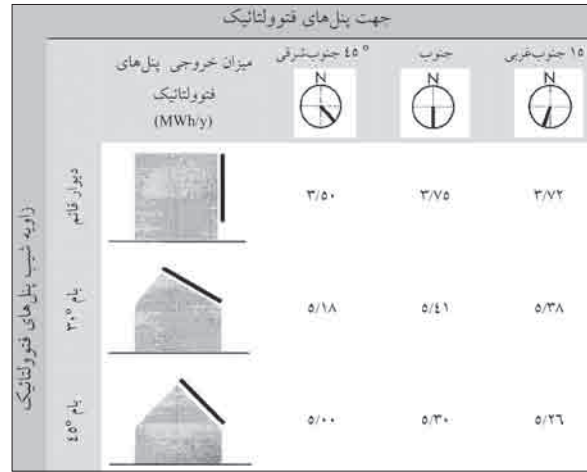


تابش دریافتی از خورشید را در سطح افق و تمامی سطوح با جهت‌ها و شیب‌های مختلف، برای مکان مورد نظر تعیین کرد. به منظور حداکثر بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و حداکثر خروجی سیستم‌های فتوولتائیک، پنل‌های ثابت در چه جهت و با چه زاویه‌ای نسبت به افق باید شیب داشته باشند؟ یکی از روش‌هایی که برای دستیابی به جهت و شیب مناسب پنل‌های فتوولتائیک در دنیا کاربرد دارد، استفاده از کردارهای تابش^۵ است. در این روش بر اساس داده‌های هواشناسی (تابش مستقیم و پراکنده خورشید) و با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای، میزان تابش خورشید بر کلیه سطوح افقی و عمودی در جهت‌ها و شیب‌های مختلف در کرداری به صورت ماهانه یا سالانه ترسیم می‌شود.^۶ چنانچه پنل‌های فتوولتائیک متناسب با زاویه هر یک از این شیب‌ها قرار گیرند، بر اساس میزان انرژی‌ای که از خورشید دریافت می‌کنند، بازدهی متفاوتی خواهند داشت. بر همین اساس می‌توان جهت‌ها و زوایای شیب بهینه پنل‌های فتوولتائیک را تعیین کرد.

نقطه حداکثر در این کردار جایی است که در طول سال بیشترین میزان انرژی را از خورشید دریافت میکنند؛ زیرا هر چه خورشید بر یک سطح عمودتر بتابد، میزان انرژی‌ای که به آن سطح می‌رسد بیشتر خواهد بود. در نتیجه چنانچه یک پنل فتوولتائیک در این جهت و زاویه شیب قرار گیرد، حداکثر انرژی الکتریسیته را تولید خواهد کرد.

در «ت۳» خروجی تعدادی از پنل‌های فتوولتائیک با مساحت ۲۵۰ مترمربع با جهت‌ها و زوایای شیب مختلف، بر اساس اطلاعات و داده‌های شهر لندن^۷ صورت گرفته است که با مقایسه آنها می‌توان به حداکثر میزان تولید انرژی پنل‌ها با جهت و زاویه شیب بهینه دست یافت.

بنا بر این، جهت‌یابی پنل‌های فتوولتائیک مسئله‌ای مهم است اما تعیین زاویه آن نیازمند دقت زیادی نیست؛ چرا که کمی اختلاف انحراف نسبت به جهت بهینه اشکالی ایجاد نخواهد



ت۳. جدول مقایسه خروجی پنل‌های فتوولتائیک در شهر لندن (مأخذ: ترسیم نگارنده، برگرفته از Randall Thomas & Max Fordham, Ibid, p. 14) MWh/y (مگاوات ساعت در سال) یکی از واحدهای توان (خروجی) سیستم فتوولتائیک است.

موقعیت و محل پنل‌های فتوولتائیک را چنان طراحی کند که اثر سایه به هیچ وجه روی آنها نباشد؛ بدان سبب که سایه روی سلول‌های فتوولتائیک، علاوه بر کاهش یا عدم بازدهی، باعث آسیب دیدن سلول‌ها نیز خواهد شد. بنا بر این، در طراحی چنین ساختمانی باید از ابتدا به مسئله سایه‌اندازی توجه کرد و تحلیل دقیق سایه را قبل از اینکه سیستم فتوولتائیک با ساختمان ترکیب شود، به انجام رساند تا حداکثر تولید برق به دست آید. در زمینه سایه‌اندازی در طراحی ساختمان بی‌آی‌پی‌وی به چه مسائلی باید توجه شود و چه راهکارهایی وجود دارد؟

۲-۱. سایه‌اندازی خود ساختمان، همسایگی‌ها، و موانع

از سایه‌اندازی بین ساختمان‌ها باید دوری جست. تراکم ساختمانی یک ناحیه تأمل برانگیز است. در فضاهای پُر تراکم، مثل مراکز شهری، فاصله بین ساختمان‌ها محدود می‌شود؛ بنا بر این، سیستم‌های نما نسبت به سایه‌اندازی حساسیت بیشتری دارند و در مقایسه با سیستم‌های بام، به فاصله‌های بیشتری بین ساختمان‌ها نیاز است.^۹

از سایه‌اندازی خود بنا به سبب فرم‌های معماری باید پیش‌گیری کرد. فاصله بین بام‌های فتوولتائیک و اشیای دیگر باید چنان

9 . deo Prasad & mark snow, *Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics "BIPV"*, Australia, Earthscan, 2005, p. 32
10 . Ibid.

باشد که به ایجاد سایه متصل (پیوسته) نینجامد. - جایی که سایه‌اندازی اجتناب‌ناپذیر است، انتخاب دقیق اجزا و شکل و موقعیت پنل‌ها از اتلاف نیرو می‌کاهد.

۲-۲. سایه‌اندازی درختان

سایه پوشش گیاهی نیز ممکن است بر سیستم‌های فتوولتائیک اثری نامناسب بگذارد. پس تا حد ممکن، در طراحی منظر باید گیاهان و درختان را در جهتی کاشت که مانع تابش خورشید به پنل‌ها نگردد، یا از درختچه‌های کوتاه‌تر با رشد محدود استفاده کرد. برنامه‌ریزی در این زمینه برای پیش‌گیری از مشکلات سایه‌اندازی در سال‌های بعد از ساخت ساختمان بی‌آی‌پی‌وی و رشد درختان مهم است.

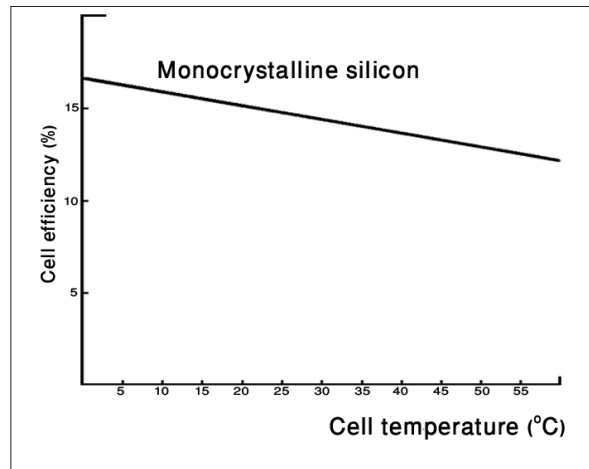
- بهتر است در نیم‌کره شمالی درختان را در شمال و در نیم‌کره جنوبی در جنوب ساختمان کاشت.
- با توجه به ارتفاع ساختمان، از درختانی با رشد محدود استفاده کرد.^{۱۰}
- اگر درختانی در جانب شرقی محوطه وجود دارد اما در جانب غربی چنین نیست، شاید بهتر باشد که پنلهای فتوولتائیک کمی متمایل به غرب قرار گیرند.

۲-۳. سایه‌اندازی آسمان ابری

محیط‌های ابری نیز بر پنل‌های فتوولتائیک سایه می‌اندازند. به سبب کاهش تابش پرتوهای خورشید و کاهش درخشندگی نور از آسمان ابری، خروجی فتوولتائیک‌ها کاهش می‌یابد.
- اگر آسمان محوطه بعدازظهرها بیشتر ابری و صبح‌ها بیشتر آفتابی است، پنل‌ها را می‌توان کمی به سمت شرق چرخاند.

۲-۴. سایه‌اندازی آلودگی‌ها

آلودگی نیز نوعی سایه‌اندازی است. چنانچه آلودگی مانع رسیدن نور به سلول‌های خورشیدی شود، محیط پُر گرد و خاک ممکن است بازدهی پنل فتوولتائیک را تا حدود ۴٪ یا بیشتر کاهش



ت ۴. کردار تغییر بازدهی سلول‌های فتوولتائیک با افزایش دما (مأخذ: Ibid: p. 143)

(بازتابنده باشد)؛ اما اگر سیستم فتوولتائیک در پوشش ساختمان درست ترکیب شود، هم می‌توان جلو نفوذ آفتاب را گرفت، هم برق مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری را تولید کرد.

طراحان می‌توانند سیستم‌های فتوولتائیک را چنان با ساختمان یکپارچه کنند که امکان تهویه، استفاده از گرمای خورشید در زمستان، استفاده از نور طبیعی (مستقیم و غیرمستقیم)، دید به منظر خارج، و مواردی دیگر، با هم فراهم شود. نتیجه اینکه، بهترین کارآیی زمانی حاصل می‌شود که سیستم‌های فعال و غیر فعال خورشیدی در یک ساختمان با یکدیگر هماهنگ و تطبیق داده شوند. برای رسیدن به این هدف، باید پیش از شروع فرایند طراحی، راهکار کلی انرژی برای ساختمان پیش‌بینی شود.

۴. تهویه سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

همچنان که سلول‌های فتوولتائیک نور خورشید را تسخیر و آن را به الکتریسته تبدیل می‌کنند، آن را به گرمایی تبدیل می‌کنند که می‌باید استفاده، کنترل، یا تهویه شود؛ زیرا پنل‌های فتوولتائیک، همچون سایر دستگاه‌های الکتریکی، در صورت خنکی هوا، بهتر کار می‌کنند و در دماهای پایین‌تر،

دهد. اگر چه پنل‌هایی با زاویه بیش از ۲۰ درجه از طریق باران خود به خود شسته و تمیز خواهند شد، انواعی خاص از آلودگی (مثل ذرات دوده) را با روش‌هایی دیگر باید نظافت کرد.^{۱۱} بنا بر این، کاهش مقدار برق تولیدی سیستم را در اثر تجمع گرد و غبار روی پنل‌ها، هنگام طراحی باید در نظر گرفت و برای نظافت دوره‌ای آنها راهکاری مناسب پیش‌بینی کرد. با توجه به تأثیر سایه در کاهش بازدهی سیستم‌های فتوولتائیک، باید تا حد ممکن از ایجاد سایه روی پنل‌ها به واسطه عوامل طبیعی و مصنوعی مانند تپه‌ها و درختان و عناصر شهری و ساختمان‌های اطراف و حتی قسمت‌هایی از خود پنل‌های فتوولتائیک جلوگیری کرد.

۳. هماهنگی میان سیستم‌های فتوولتائیک با سیستم‌های غیر فعال خورشیدی در ساختمان بی‌آی‌بی‌وی

معمولاً طراحان، طراحی خورشیدی را یک محدودیت می‌دانند تا یک فرصت! چنانچه معمار ساختمان را مطابق شرایط اقلیمی محل و منطبق بر سیستم‌های غیر فعال خورشیدی طراحی کند، شرایط آن ساختمان به مرز آسایش ساکنان نزدیک خواهد شد؛ و اگر سیستم فتوولتائیک (که یک سیستم فعال خورشیدی است) را نیز به شکلی مناسب با ساختمان ترکیب کند، نتیجه کار بهتر و بازده انرژی ساختمان بسیار بیشتر خواهد شد. او بدین طریق می‌تواند شرایط خرد اقلیم ساختمان را به مرز آسایش نزدیکتر و آن را به بنایی خودکفا تبدیل کند.

در طراحی باید توجه کرد که کاربرد سیستم‌های فتوولتائیک با استفاده از سیستم‌های غیر فعال خورشیدی (مثل گرمایش خورشیدی) تناقض نداشته باشد و هر دو سیستم کاملاً با پروژه هم‌ساز شوند. مثلاً طراحان به منظور کاهش مصرف انرژی سرمایه‌گذاری ساختمان، پوشش ساختمان را به گونه‌ای طراحی میکنند که میزان نزول تابش روی سطح ساختمان کم باشد

۵. شیوه‌های ترکیب سیستم‌های فتوولتائیک با ساختمان

سیستم‌های فتوولتائیک را می‌توان در ساختمان‌های بی‌آی‌پی‌وی با بام‌ها، پنجره‌های سقفی، آتریوم‌ها، نماها، سایبان‌ها و غیره ادغام و یکپارچه کرد.

۵-۱. سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با بام

پنل‌های فتوولتائیک در بام‌های مسطح را می‌توان به صورت سلول‌های فیلم‌نازک^{۱۴} به صورت انعطاف‌پذیر، و در بام‌های شیب‌دار به شکل سفال‌های فتوولتائیک ترکیب کرد. همچنین آنها را می‌توان به عنوان پوستهٔ ساختمان با سیستم سازهٔ بام شیب‌دار یا سطح ترکیب و مستقیماً به سازهٔ بام متصل کرد.

عناصر فتوولتائیک باید با هر عنصر غیر فتوولتائیک دیگر سازگار شوند تا مسائل سازه‌ای و زیبایی در معماری با هم ترکیب گردد و محصولی آگاهانه و معمارانه به دست آید.

در طراحی سیستم‌های بام، مسئلهٔ انباشت برف و رفع رطوبت حائز اهمیت است. بدین منظور باید برای رفع آب باران و انباشت برف روی پنل‌های فتوولتائیک، راه‌حلهایی مناسب و مطابق با شرایط اقلیم محل را برگزید.

۵-۲. سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با پنجره‌های سقفی و آتریوم‌ها

در ساختمان بی‌آی‌پی‌وی برای ترکیب فتوولتائیک‌ها با بام، معمار می‌تواند بام را به صورت نورگیرهای دندانه‌دندانهٔ یکپارچه با فتوولتائیک طراحی کند (ت ۷). همچنین پنل‌های فتوولتائیک نیمه‌شفاف را می‌توان جای‌گزین شیشهٔ پنجره‌های سقفی و آتریوم‌ها کرد که طراح خلاق و مجرب بدین وسیله از کیفیت نور به صورت لکه‌لکه استفاده می‌کند.

نورگیرهای روی بام^{۱۵} از راه تأمین روشنایی غیر مستقیم، نیاز به نورپردازی الکتریکی را به هنگام روز یا کاهش می‌دهند یا

برق بیشتری تولید می‌کنند. مطابق تصویر ۴، با افزایش دما قدرت خروج از سلولها کاهش می‌یابد و در نتیجه از بازده پنل‌های فتوولتائیک کاسته می‌شود.

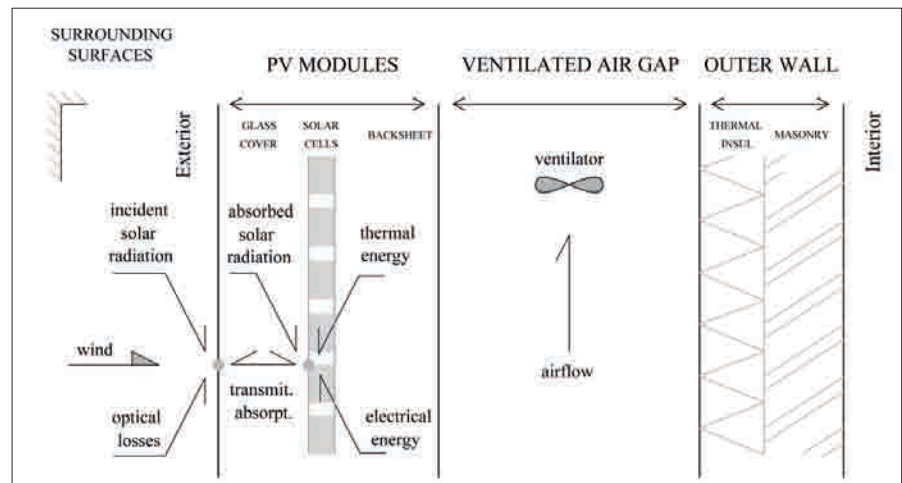
بنا بر این، در ترکیب فتوولتائیک‌ها با ساختمان باید به مسئلهٔ تهویهٔ طبیعی یا مکانیکی آنها در فرایند طراحی توجه کرد تا به دمای پایین‌تر برسند و کارایی (بازده) مطلوب آنها ادامه یابد.

در طراحی بام‌های دندان‌های^{۱۲} ترکیب شده با فتوولتائیک‌ها میتوان با ایجاد بازشو در سمت مقابل پنل‌ها، گرمای حاصل از آنها (پشت پنل‌ها) را دفع کرد یا در بام‌های شیب‌دار ترکیب شده با مصالح فتوولتائیک (به صورت سفال خورشیدی) می‌توان با ایجاد دریچه‌هایی در زیر لبهٔ بام و روی بام عبور جریان هوا از پشت سفال‌های فتوولتائیک را تسهیل کرد.

در سیستم‌های نما با اتصال پنلها به دیوارهای پرده‌ای^{۱۳} (به صورت دولایه)، امکان تهویهٔ پشت آنها فراهم خواهد شد. در این حالت، با استفاده از فضای بین دو لایه، تهویهٔ پشت فتوولتائیک‌ها انجام می‌شود و از انتقال گرمای حاصل از فتوولتائیک‌ها به لایهٔ داخلی جلوگیری می‌کند. بدین‌سان، عملکرد بهتر و بازدهی مطلوب پنل‌های فتوولتائیک حاصل می‌گردد (ت ۵).

- 12 . Saw-Tooth Roofs
- 13 . Curtain Wall
- 14 . Thin Film
- 15 . Roof Monitors

ت ۵. مدل تهویهٔ نمای BIPV (مأخذ: ترسیم نگارنده، برگرفته از <http://www.fotovoltaika.com> / http://www.fsv.cvut.cz/download/K_Stanek_W2-510_posterA4.pdf)



عمودی یا دندانه‌دندانه ترکیب کرد تا بدین ترتیب هم نور طبیعی به میزان لازم به فضای داخل راه یابد و هم پنل‌های فتوولتائیک الکتریسیته تولید کنند. همچنین به هنگام گرمی هوا، از ورود نور ناخواسته آفتاب به داخل فضا جلوگیری شود. بر این اساس، تعادل بین میزان و کیفیت شیشه و کمیت و نوع سلول‌های به کار رفته در پنل‌های فتوولتائیک، بخشی از فرایند طراحی است. در این حالت، مزیت‌های رویکرد غیر فعال خورشیدی در کنار رویکرد فعال خورشیدی، به همراه دید به منظر بیرون و تأمین نور طبیعی حاصل می‌شود (ت.۹).

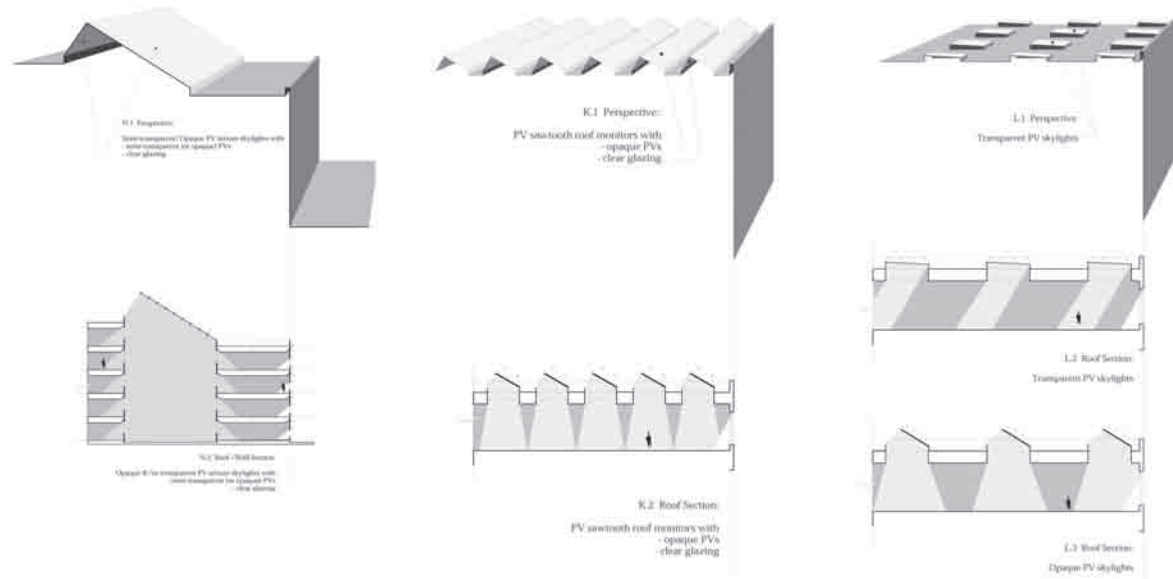
۴-۵. سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با سایبان‌ها

پنل‌های فتوولتائیک غیرشفاف را در ترکیب با ساختمان به عنوان سایبان^{۱۶} پنجره، لور،^{۱۷} یا رف نور^{۱۸} نیز در نما نصب و فضای داخل را از پرتوهای مستقیم خورشید

کاملاً رفع می‌کنند. در صورتی که با فتوولتائیک‌ها یکپارچه شوند، بر عملکردشان افزوده می‌شود و به تأمین انرژی الکتریکی برای نورپردازی مصنوعی در ساعات روز و شب نیز کمک می‌کنند. طراح ساختمان می‌تواند فتوولتائیک‌ها را با آتریوم‌ها یکپارچه کند (ت.۸)؛ به گونه‌ای که فتوولتائیک‌های مات یا نیمه‌شفاف در سمت رو به آفتاب و شیشه شفاف در سمت پشت به آنها قرار گیرد. به این صورت، فتوولتائیک‌ها از ورود نور مستقیم خورشید به فضای داخل جلوگیری و هم‌زمان از پرتوهای خورشید نیروی برق نیز تولید می‌کنند.

۳-۵. سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با نما

شیوه‌های مختلفی برای ترکیب سیستم‌های فتوولتائیک با نما وجود دارد که هر یک را بسته به نوع طرح و انتخاب طراحان، میتوان در فرایند طراحی مطرح کرد و بهترین گزینه را مطابق با شرایط ساختمان به کار بست. در سیستم‌های نما می‌توان پنل‌های غیرشفاف، نیمه‌شفاف، و شیشه را در کنار هم به صورت



- 16. Shading
- 17. Louver
- 18. Light-Shelf

ت.۶ (راست) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با نورگیرهای سقفی (مأخذ: P.C. Kiss Cathcart, Anders Architects, Ibid, p. 22)

ت.۷ (وسط) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با نورگیرهای دندانه‌ای (مأخذ: Ibid, p. 21)

ت.۸ (چپ) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با آتریوم‌ها (مأخذ: Ibid, p. 24)

۱۹. در این آزمایش، مبنای کار فقط بر مقدار تولید نیروی فتوولتائیک استوار شده است.

20. P.C. Kiss Cathcart Anders Architects, "Building-Integrated Photovoltaics", in: *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, (January 1993), p. 30

۹.ت (چپ) ترکیب انواع پنل‌های فتوولتائیک با دیوار پرده‌ای نما (مأخذ: p. 12, Ibid)

۱۰.ت (راست) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با سایبان نما (مأخذ: p. 14, Ibid)

حفاظت می‌کنند و در همان حال شرایط ورود نور پراکنده و غیرمستقیم را به درون فضا تأمین می‌کنند. سایبان‌های فتوولتائیک را می‌توان به صورت افقی، شیبدار (تصویر ۱۰)، یا پل‌های روی دیوار قائم نما قرار داد.

– هنگامی که از سیستم‌های فتوولتائیک به عنوان سایبان استفاده می‌شود، تأثیر سایه سایر پنل‌های فتوولتائیک را باید در نظر گرفت.

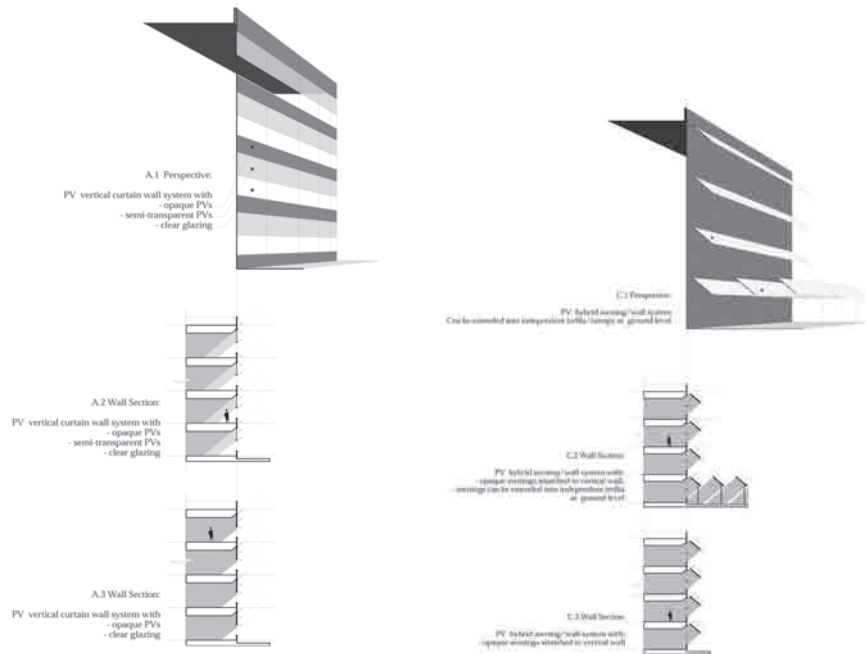
– مزیت سایبان‌های فتوولتائیک در مقایسه با سایر سایبان‌ها یا پرده‌ها آن است که علاوه بر اینکه مانع ورود گرما به داخل ساختمان می‌شود و بار دستگاه‌های سرماساز را کاهش می‌دهد، خود نیز نیروی برق مورد نیاز سیستم‌های سرمایش را تولید می‌کند.

۶. تأثیر فرم پلان ساختمان بر نیروی سیستم فتوولتائیک

برای آزمایش^{۱۹} تأثیر فرم پلان ساختمان بر میزان تولید برق سالانه، یک بنای اداری چهار طبقه را در لس‌آنجلس (عرض جغرافیایی ۳۳/۹ درجه شمالی) با مساحت ۳۷۱۶ مترمربع و زیربنای ۲۹۲۹ مترمربع و ارتفاع هر طبقه ۳/۶۵ متر در نظر گرفته می‌گیریم. فرض بر این است که کل چهار طبقه ساختمان در نما با پنل‌های عمودی فتوولتائیک پوشانده شده است. اقلیم این محل گرم و خشک است و نیاز سرمایشی زیادی دارد. برای این ساختمان می‌توان دو حالت در نظر گرفت: در یک حالت مساحت کف ثابت است و با تغییر فرم پلان، مساحت دیوارهای محیطی تغییر می‌کند؛ در حالت دوم، مساحت دیوارهای محیطی ثابت و مساحت کف متغیر فرض شده است. در این تغییر فرم، پنج نوع پلان به صورت دیاگرام «ت ۱۱» بررسی می‌شود. به طور کلی در این حالت‌ها تأثیر فرم پلان ساختمان بر کارایی و میزان تولید سیستم فتوولتائیک مشخص می‌گردد.^{۲۰}

با توجه به دیاگرام‌ها و محاسبات نیروی تولید شده، مشخص است که هر چه فرم پلان کشیده‌تر (باریک‌تر) باشد، محیط افزایش می‌یابد و میزان دریافت تابش خورشید و تولید انرژی برق بیشتر می‌شود و هر چه به فرم مربع نزدیکتر شویم، این میزان کاهش می‌یابد؛ به این معنا که در فرم‌هایی که دیوارهای محیطی مساحت بیشتری پیدا می‌کنند، میزان تولید انرژی بیشتر است. مسئله دیگر اینکه در کشیدگی فرم پلان به صورت شرقی – غربی و شمالی – جنوبی، تفاوت چشم‌گیری در میزان تولید انرژی برق وجود دارد.

با توجه به دیاگرام‌ها، در صورتی که پلان این ساختمان لس‌آنجلسی را به فرم کشیده در جهت شمالی – جنوبی درآوریم، به حداکثر تولید برق در کل سال خواهد رسید البته باید توجه کرد که دیوارهای این ساختمان در چهار جهت شمال، شرق،



افق، بر مساحت دیوار نیز افزوده و در نتیجه تولید برق بیشتر می‌شود (در این دیاگرام‌ها مساحت سطح دیوار فتوولتائیک از ۲۷۸/۷ مترمربع با شیب ۹۰ درجه تا ۴۳۳/۵ مترمربع با شیب ۴۰ درجه افزایش می‌یابد). اما این افزایش نیروی حاصل از شیب‌دار کردن سطح دیوار را باید با هزینه‌های دیگر بررسی کرد؛ از آن جمله هزینه‌های ساخت دیوار شیب‌دار که بیشتر است، یا کاهش مساحت کف در طبقات بالاتر. داخل طبقات نیز در قسمت محیطی، نور مستقیم بیشتری دریافت می‌کند که این مسئله در طول ساعات نیم‌روز نیاز به مراقبت بیشتری دارد.

21. Glare

22. Ibid.

23. Ibid., p. 32

۱۱. مقایسه فرم پلان ساختمان BIPV از نظر تولید انرژی (مأخذ: ترسیم نگارنده، برگرفته از (Ibid, p. 30)

پلان A	(مساحت کف ثابت)	دیاگرام ۱	دیاگرام ۲	(مساحت دیوار ثابت)
کل مساحت کف	۳۷۱۶ m ²			۲۷۸۷ m ²
کل مساحت سطح دیوار	۲۲۲۹ m ²			۱۷۸۳ m ²
کل کیلووات ساعت در سال	۹۲۵۱۴ kWh			۷۴۸۶۲ kWh
پلان B				
کل مساحت کف	۳۷۱۶ m ²			۳۴۸۳ m ²
کل مساحت سطح دیوار	۱۸۵۵ m ²			۱۷۸۳ m ²
کل کیلووات ساعت در سال	۷۹۸۹۹ kWh			۷۶۹۸۹ kWh
پلان C				
کل مساحت کف	۳۷۱۶ m ²			۳۷۱۶ m ²
کل مساحت سطح دیوار	۱۷۸۳ m ²			۱۷۸۳ m ²
کل کیلووات ساعت در سال	۷۹۱۱۷ kWh			۷۹۱۱۷ kWh
پلان D				
کل مساحت کف	۳۷۱۶ m ²			۳۴۸۳ m ²
کل مساحت سطح دیوار	۱۸۵۵ m ²			۱۷۸۳ m ²
کل کیلووات ساعت در سال	۸۴۶۳۳ kWh			۸۱۲۳۲ kWh
پلان E				
کل مساحت کف	۳۷۱۶ m ²			۲۷۸۷ m ²
کل مساحت سطح دیوار	۲۲۲۹ m ²			۱۷۸۳ m ²
کل کیلووات ساعت در سال	۱۰۵۲۲۷ kWh			۸۳۳۷۰ kWh



جنوب، و غرب با فتوولتائیک پوشانده شده است. به عبارت دیگر، مشخص می‌شود که دیوارهای شرقی و غربی در طول سال نور زیادی از خورشید دریافت و در نتیجه نیروی بیشتری تولید می‌کنند. اما این آنالیز تنها منحصر به کارایی فتوولتائیک است و در آن به آثار منفی حاصل از این جهت‌یابی توجهی نشده است؛ از آن جمله کسب گرمای خورشید، خیرگی^{۲۱} آفتاب صبح و عصر، و بهره‌وری کمتر در انتخاب پلان کف.^{۲۲}

۷. تأثیر شیب دیوار نمای ساختمان بر نیروی سیستم فتوولتائیک

به منظور بررسی تأثیر شیب‌های مختلف یک دیوار پرده‌ای نمای جنوبی بر میزان تولید نیروی فتوولتائیک، ساختمانی چهار طبقه با دیوار جنوبی به طول ۳۰/۵ متر و به ارتفاع ۱۴/۶ متر و با ۲۷۸/۷ مترمربع کل مساحت فتوولتائیک، در جهت قائم فرض شده است.^{۲۳} تأثیر شیب‌های مختلف این دیوار (از شیب ۹۰ درجه قائم تا ۴۰ درجه) بر میزان تولید برق در دو حالت بررسی می‌شود (ت ۱۲). در حالت اول، مساحت پنل‌های فتوولتائیک ثابت است و با تغییر شیب مساحت کف طبقات و مساحت دیوار جنوبی تغییر می‌کند. در حالت دوم، با تغییر شیب دیوار، مساحت فتوولتائیک نیز تغییر می‌یابد؛ به طوری که هر چه شیب دیوار به افق نزدیک‌تر می‌شود، مساحت پنل‌های فتوولتائیک نیز افزایش می‌یابد — البته ارتفاع طبقات ثابت است.

با توجه به دیاگرام‌ها و محاسبات نیروی تولید شده توسط پنل‌های فتوولتائیک، مشخص است که هر چه شیب دیوار از حالت قائم به سطح افق نزدیک‌تر می‌شود، سطح فتوولتائیک انرژی خورشید را بیشتر دریافت می‌کند (به سبب زاویه‌ای که با پرتوهای خورشید می‌سازد). بنا بر این، تولید نیروی برق و بازده آن بیشتر خواهد بود.

همچنین در صورتی که بخواهیم کل سطح دیوار با پنل‌های فتوولتائیک پوشیده باشد، با نزدیک‌تر شدن شیب دیوار به سطح

دیوار پرده‌ای نما در طبقات که منجر به کاهش مقدار فضای ساختمان می‌شود و همچنین هزینه‌های بیشتر برای ساخت دیوار مایل و غیره.

۸. تعیین نوع و توان سیستم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

نوع یک سیستم فتوولتائیک تابع شرایطی چون نوع بارهای متصل به سیستم (ای سی یا دی سی یا هر دو)، وجود یا عدم وجود مولد کمکی برق، اتصال یا عدم اتصال به شبکه محلی یا سراسری، و چگونگی ارتباط با آن شبکه (یک طرفه یا دو طرفه) است. قبل از طراحی ابتدا باید تصمیم گرفت که سیستم فتوولتائیک مستقل خوداتکاء^{۲۴} باشد یا متصل به شبکه برق شهری^{۲۵}؟

سیستم‌های مستقل به باتری‌های ویژه برای ذخیره الکتریسیته نیاز دارند و تولید برق آنها نسبت به سیستم‌های متصل به شبکه کمتر است و اغلب در نقاط دورافتاده از شبکه برق استفاده می‌شود. اگر سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه برق شهری باشد، تضمینی برای تأمین برق وجود خواهد داشت؛ زیرا نیروی برق بین سیستم و شبکه مبادله می‌شود و شبکه همچون ذخیره‌سازی نامحدود عمل می‌کند. سیستم‌های باتری‌دار هم نیاز به تعمیر و نگهداری باتری‌ها دارند؛ اما در مقابل سیستم‌های متصل به شبکه نیازمند نگهداری خاصی نیستند. البته در تصمیم‌گیری برای نوع سیستم، باید هزینه‌های باتری و نگهداری را در نظر گرفت و بر اساس نیاز و نوع زندگی تعیین کرد که چه نوع سیستمی مناسب‌تر خواهد بود.

توان یک سیستم فتوولتائیک، به اندازه حداکثر بازده جریان مستقیم (دی سی) سیستم خورشیدی به کیلووات معین شده است؛ بنا بر این، یک سیستم ۲ کیلووات هنگامی که کاملاً در معرض پرتوهای خورشید قرار گیرد، ۲۰۰۰ وات الکتریسیته دی سی تولید می‌کند، سپس این جریان مستقیم از طریق یک

دیوار شیب‌دار، کارایی نیروی دیوارهای جنوبی و شرقی و غربی را در سرتاسر سال بهبود می‌بخشد؛ در حالی که کارایی دیوار شمالی شیب‌دار فقط در طول تابستان افزایش می‌یابد. چنان‌که از این کردارها پیداست، نماهای شیب‌دار یکپارچه با فتوولتائیک‌ها بر میزان بازدهی بهینه آنها اثر می‌گذارد. اما در طراحی نما باید به تأثیرات آن بر جنبه‌های دیگر طرح ساختمان نیز توجه شود؛ مسائلی چون فشرده شدن فضای کف در پیرامون

ت ۱۲. مقایسه شیب دیوار نمای ساختمان BIPV از نظر تولید انرژی (مأخذ: ترسیم نگارنده، برگرفته از (Ibid, p. 32

۹۰° قائم	دیوار ۱ گرام (مساحت PV ثابت)	دیوار ۲ گرام (مساحت PV افزایشی)	
کل مساحت PV دیوار جنوبی	۲۷۸/۷ m ²	۲۷۸/۷ m ²	
کل مساحت کف از دست رفته	۰ m ²	۰ m ²	
کل کیلووات ساعت در سال	۱۵۴۳۳ kWh	۱۵۴۳۳ kWh	
شیب ۸۰°			
کل مساحت PV دیوار جنوبی	۲۷۸/۷ m ²	۲۸۲/۹ m ²	
کل مساحت کف از دست رفته	۱۱۹/۸ m ²	۱۱۹/۸ m ²	
کل کیلووات ساعت در سال	۱۸۴۴۴ kWh	۱۸۷۲۸ kWh	
شیب ۷۰°			
کل مساحت PV دیوار جنوبی	۲۷۸/۷ m ²	۲۹۶/۶ m ²	
کل مساحت کف از دست رفته	۲۴۶/۲ m ²	۲۴۶/۲ m ²	
کل کیلووات ساعت در سال	۲۱۱۸۴ kWh	۲۲۵۴۴ kWh	
شیب ۶۰°			
کل مساحت PV دیوار جنوبی	۲۷۸/۷ m ²	۳۲۱/۸ m ²	
کل مساحت کف از دست رفته	۵۰۲/۳ m ²	۵۰۲/۳ m ²	
کل کیلووات ساعت در سال	۲۳۴۴۵ kWh	۲۷۰۷۷ kWh	
شیب ۵۰°			
کل مساحت PV دیوار جنوبی	۲۷۸/۷ m ²	۳۶۳/۸ m ²	
کل مساحت کف از دست رفته	۵۶۸/۵ m ²	۵۶۸/۵ m ²	
کل کیلووات ساعت در سال	۲۵۰۹۸ kWh	۳۲۸۱۵ kWh	
شیب ۴۰°			
کل مساحت PV دیوار جنوبی	۲۷۸/۷ m ²	۴۳۳/۵ m ²	
کل مساحت کف از دست رفته	۸۰۷/۳ m ²	۸۰۷/۳ m ²	
کل کیلووات ساعت در سال	۲۶۱۴۶ kWh	۴۰۶۷۶ kWh	

و دیگر مهندسان، را نیز به رقابت می‌طلبید تا برای یکپارچگی سیستم پشتیبانی ساختمان با نیروی تأمین شده فتوولتائیک، راه‌حل‌های ابتکاری خود را گسترش دهند.

طراح معمار به آن همچون جزئی از نما یا بام و کلاً ظاهر ساختمان توجه می‌کند؛ وسیله‌ای که نه تنها مولد نیروست، بلکه نور روز را نیز به داخل فضا هدایت می‌کند. مهندس سازه به آن همچون عنصری در پوشش (پوسته) ساختمان می‌نگرد که برای حمل آن نیازمند حمایت سازه است. مهندس تعمیر و نگهداری ساختمان آن را همچون یک سیستم الکتریکی می‌نگرد که نیازمند طراحی، ارتباطات، و نظارت خاص است. از معمار و مهندسانی که با یکدیگر سر و کار دارند، خواسته می‌شود که فتوولتائیک را در طی برنامه‌ریزی و شناخت ساختمان، دست کم در چهار سطح ادغام (یکپارچه) کنند:

۱. طراحی یک ساختمان (شکل، اندازه، جهت‌یابی، رنگ)

مبدل به جریان متناوب (ای‌سی) قابل استفاده تبدیل می‌شود و خروجی آن به ۱/۷ کیلووات کاهش می‌یابد.

توان سیستم‌های فتوولتائیک وابسته به این موارد است: میزان بار الکتریکی مصرفی (و نیازهای شخصی)، زمان استفاده (همه سال، فقط تابستان و غیره)، مکان سیستم و اقلیم (تابش خورشید)، و مساحت فضای موجود در بام یا نما. اما مهم‌ترین محدودیت برای توان سیستم فتوولتائیک بودجه موجود است.

برای تعیین توان سیستم باید الگوی بار مصرفی ساختمان را مشخص کرد تا بتوان بر اساس آن سیستم مورد نیاز را به کار گرفت.

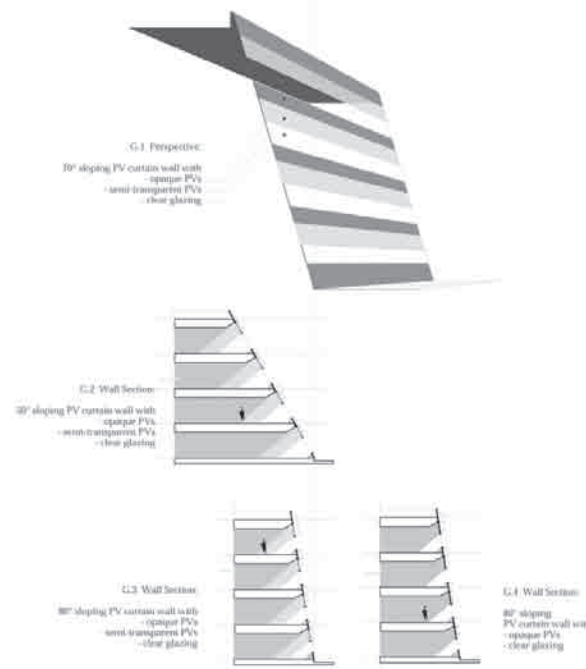
مطمئناً مصرف انرژی با نوع و ساختمان منحصر به فرد تغییر می‌کند؛ بنا بر این، نیازمند یک سیستم طراحی است تا از تحلیل‌های مقدماتی و الگوی مصرف انرژی مخصوص آن ساختمان استفاده کند.

باید هماهنگی مطلوبی میان الگوی تقاضای انرژی ساختمان و انرژی قابل دست‌یابی از راه آرایه‌های فتوولتائیک برقرار گردد.

۹. هماهنگی میان معمار و دیگر مهندسان دست‌اندر کار طرح ساختمان بی‌آی‌پی‌وی

مسئله معماری فناوری یکپارچگی فتوولتائیک نیازمند یک رویکرد طراحی میان‌رشته‌ای است. این امر منوط به حضور و همکاری متخصصان ویژه در گروه کار است. بدون شک چنین سیستم‌هایی حتی بهترین معماران را هم به رقابت می‌طلبند و داشتن سطح شایسته‌ای از مهارت برای موفقیت در برنامه‌ریزی سیستم‌های بی‌آی‌پی‌وی ضروری است و این نکته نه فقط در خصوص معماران، بلکه در مورد مهندسان عمران و برق و مکانیک هم صدق می‌کند.

این سیستم افزون بر اینکه بر معماری و طراحی آن اثر می‌کند، دست‌اندرکاران طرح و فرایند طراحی، یعنی معماران



۲۴. به سیستم‌های مستقل خوداتکاء می‌گویند که انرژی مورد نیاز به طور کامل از طریق پنل‌های فتوولتائیک تأمین می‌شود و نیازی به شبکه سراسری برق یا منبع تغذیه‌ای دیگر نیست.

۲۵. سیستم‌های متصل به شبکه سراسری به سیستم‌هایی گفته می‌شود که انرژی الکتریکی حاصل از پنل‌های فتوولتائیک در صورت مازاد بر مصرف، مستقیماً به شبکه سراسری برق تزریق می‌شود. این سیستم‌ها به باتری ذخیره نیازی ندارند، چون شبکه برق عمل ذخیره‌سازی انرژی را انجام می‌دهد.

ت ۱۳. ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با نمای

شیب‌دار (مأخذ: Ibid, p. 18)

از جنبه‌های مختلف با بنا ترکیب و یکپارچه کنند. بنا بر این، طراحان ساختمان در فرایند طراحی باید عوامل مختلف را با یکدیگر هماهنگ کنند تا بهترین و کارآمدترین گزینه انتخاب شود.

کتابنامه

وفائی، راحیل. «سیستم‌های فتوولتائیک در ترکیب با معماری (ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک BIPV)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۸.

CLEFS CEA. *Building Integrated Photovoltaic System*, No 50-51 (winter 2004-2005), pp. 124-126.

Kiss Cathcart Anders Architects, P.C. "Building-Integrated Photovoltaics", in: *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, (January 1993).

Prasad, deo & mark snow. *Designing with solar power (a source book for building integrated photovoltaics "BIPV")*, Australia, Earthscan, 2005.

Sick, Friedrich & Thomas Erge. *Photovoltaics in Buildings: A design handbook for Architects & Engineers*, London, James & James, 1996.

Thomas, Randall & Max Fordham & Partners, *Photovoltaics and Architecture*, London, Spon Press, 2003.

۲. یکپارچگی مکانیکی (چند عملکردی بودن یک عنصر فتوولتائیک)

۳. یکپارچگی الکتریکی (متصل به شبکه یا استفاده مستقیم از برق)

۴. سیستم باید با مراقبت و نگهداری ساختمان معمولی یکپارچه شود.

چنانکه گفتیم، راهکار کلی انرژی را برای یک ساختمان باید پیش از شروع فرایند طراحی مشخص کرد. برای حل این مسئله باید معمار و دیگر متخصصانی که با فرایند طراحی و برنامه‌ریزی سر و کار دارند، درست از ابتدای فرایند برنامه‌ریزی و طراحی با یکدیگر همکاری کنند. بدین‌سان آنان ناگزیر می‌شوند که از همان آغاز کار، بهترین طرح را برای یک پروژه ساختمانی جستجو کنند.

نتیجه

برای احداث به یک ساختمان بی‌آی‌پی‌وی باید سیستم فتوولتائیک را در کار طراحی و در ترکیب با معماری بنا وارد کرد. به منظور یکپارچه شدن صحیح فتوولتائیک‌ها با ساختمان، باید فتوولتائیک‌ها را همچون عنصری از ساختمان، از ابتدای طراحی در نظر گرفت. بر این اساس، لازم است که بین اجزای سیستم‌های فتوولتائیک و سایر اجزای ساختمان هماهنگی و یکپارچگی پدید آید. از این جهت، فتوولتائیک‌ها باید بخشی از طرح‌مایه‌های اولیه ساختمان و مطابق با طرح معمار باشند. همچنین لازم است آنها را بخشی کامل از راهبرد انرژی ساختمان و جزئی مهم از سیستم زیست‌محیطی آن شمرد.

نکته دیگر اینکه، ترکیب سیستم‌های فتوولتائیک با ساختمان که بر فرایند طراحی آن اثر می‌گذارد، نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای متخصصان مختلف است. حضور گروه طراحی متشکل از معمار و متخصصان دیگر رشته‌های مرتبط با ساختمان از ابتدای فرایند طراحی ضروری است تا با مشارکت یکدیگر فتوولتائیک‌ها را