بررسی شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

راحیل وفایی[1]

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

چکیده

در کشـور ایران به سبب مشکلات منابع انرژی فسیلی (محدودیت و آلودگی‌های زیست‌محیطی)، محدودیت‌های برق‌رسانی، لزوم استفاده از انرژی‌هـای تجدیدپذیر، و وجود منبع عظیم انرژی خورشـیدی در سرتاسـر ایران و ضرورت حداکثر بهره‌بـرداری از این انرژی، امروزه یکی از بهترین راه‌ها به کار گیری سیستم‌های فتوولتائیک به صورت «ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک»[2] است. نمونه‌های بسیاری از این رویکرد را در کشورهای مختلف می‌توان دید که رشدی چشم‌گیر داشته و همچنان رو به پیشرفت است.

معمـاران و طراحانی که در پی طراحی سـاختمان‌های بی‌آی‌پی‌وی هسـتند، باید طریقـهٔ ترکیب فتوولتائیک‌ها با بنا و مسـائلی را که در طراحـی باید بـه آنها توجه شـود و به طور کلی شـیوه‌های طراحی بی‌آی‌پـی‌وی را بدانند؛ اینکه فرایند طراحـی 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، تهویهٔ سیسـتم، ترکیب فتوولتائیک‌ها با ساختمان و تأثیراتی که بر یکدیگر می‌گذارند، تأثیر فرم پلان و شـیب دیوار نمای سـاختمان بر نیروی سیسـتم فتوولتائیک، تعیین نوع و توان سیسـتم، هماهنگی میـان 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 اسـتفاده از سیسـتم‌های فتوولتائیک[3] در ترکیب با ساختمان، اهمیـت و جذابیت زیـادی در میان طراحان و معماران یافته اسـت؛ از همین رو، این سـاختمان‌ها را باید بـه گونه‌ای صحیح و با طرحی مناسـب سـاخت که پس از نصب، برای خود سیسـتم فتوولتائیک یا برای ساختمان مشـکلی ایجاد نکند. بر این اساس، به منظور اجتناب از آلودگی معمارانه لازم اسـت که سیستم‌های فتوولتائیک را به منزلهٔ طرحـی خود تعریف شـده یا یک عنصـر معماری در نظـر گیریم تا

۱. ایـن مقالـه برگرفتـه از پایان‌نامهٔ کارشناسـی ارشـد نگارنـده اسـت: «سیسـتم‌های فتوولتائیک در ترکیب بـا معماری (سـاختمان‌های یکپارچه بـا فتوولتائیـک BIPV)»، اسـتاد راهنما: دکتر منصوره طاهباز، تهران، دانشـکدهٔ معمـاری و شهرسـازی دانشگاه شهید بهشتی، شهریور ۱۳۸۸.

rahilvafaei@yahoo.com

2 . BIPV (Building Integrated Photovoltaic)

پرسش‌های تحقیق

عوامل مؤثر بر ترکیب یکپارچهٔ 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[4] 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 بهینهٔ 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 (ت۱). از طرفی دیگر، تغییر زاویهٔ 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 سالانهٔ

3 . Photovoltaic (PV)
فتوولتائیک سیستمی است که می‌تواند انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریسیته تبدیل کند.
4 . Concept
5 . Solar Disk

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 پراکندهٔ خورشید) و با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای، میزان تابش خورشید بر کلیهٔ سطوح افقی و عمودی در جهت‌ها و شیب‌های مختلف در کرداری به صورت ماهانه یا سالانه ترسیم می‌شود.[۶] چنانچه پنل‌های فتوولتائیک متناسب با زاویهٔ 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 بهینهٔ پنل‌های فتوولتائیک را تعیین کرد.

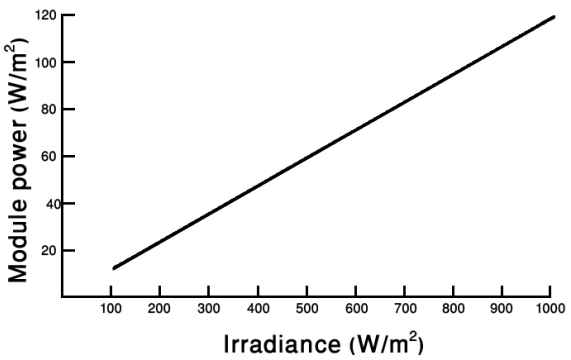
نقطهٔ حداکثر در این کردار جایی است که در طول سال بیشترین میزان انرژی را از خورشید دریافت میکند؛ زیرا هر چه خورشید بر یک سطح عمودتر بتابد، میزان انرژی‌ای که به آن سطح می‌رسد بیشتر خواهد بود. در نتیجه چنانچه یک پنل فتوولتائیک در این جهت و زاویهٔ شیب قرار گیرد، حداکثر انرژی الکتریسیته را تولید خواهد کرد.

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

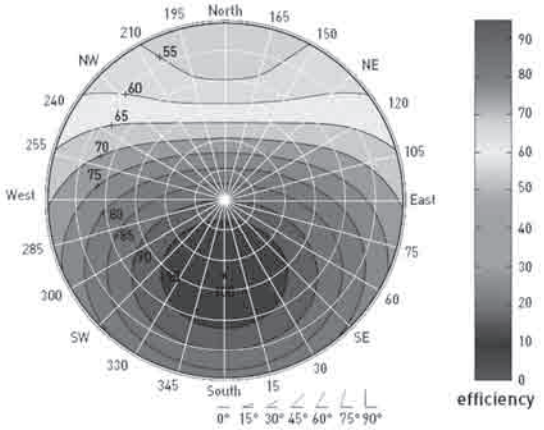
بنا بر این، جهت‌یابی پنل‌های فتولتائیک مسئله‌ای مهم است اما تعیین زاویهٔ آن نیازمند دقت زیادی نیست؛ چرا که کمی اختلاف انحراف نسبت به جهت بهینه اشکالی ایجاد نخواهد کرد، لیکن زاویهٔ شیب پنل‌ها (نسبت به افق) مسئلهٔ مهمتری است. با تعیین زاویهٔ شیب بهینه (بسته به زمان‌های استفاده از سیستم) میتوان حدود ۹۵٪ 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، سایهٔ ساختمان‌های اطراف، سایهٔ خود ساختمان، و سایهٔ پنلها روی یکدیگر ممکن است بر سیستم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان تأثیر بنهد. طراح معمار باید



ت۱. کردار تغییر نیروی پنل‌های فتوولتائیک با شدت تابش خورشید (مأخذ: Randall Thomas & Max Fordham, (p. 141

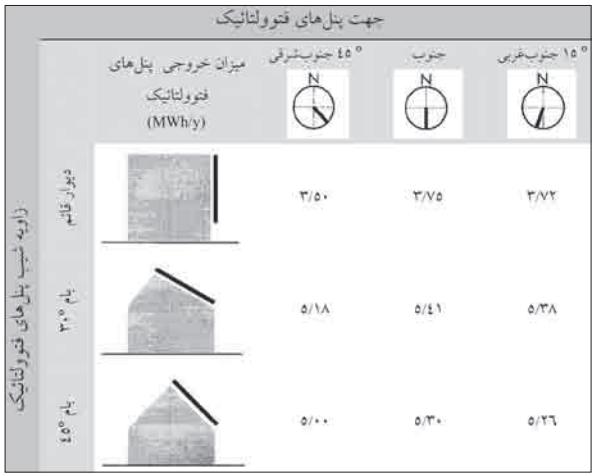


ت۲. نمونه کردار تابش خورشید (مأخذ: CLEFS CEA, *Building Integrated Photovoltaic System*, p. 124)

۶. در این کردار، نقاطی که به یک میزان تابش خورشید را دریافت می‌کنند (نقاط هم‌انرژی) در محدودهٔ 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 درجهٔ شمالی، حداکثر تابش سالانه روی سطحی ثابت به سمت جنوب با زاویهٔ شیب ۳۱° است.

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



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 سایهٔ 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 مسئلهٔ 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 زمینهٔ سایه‌اندازی در طراحی ساختمان بی‌آی‌پی‌وی به چه مسائلی باید توجه شود و چه راهکارهایی وجود دارد؟

۲ـ۱. سایه‌اندازی خود ساختمان، همسایگی‌ها، و موانع

ـ از سایه‌اندازی بین ساختمان‌ها باید دوری جست. تراکم ساختمانی یک ناحیه تأمل‌برانگیز است. در فضاهای پُر تراکم، مثل مراکز شهری، فاصلهٔ 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.[9]

ـ از سایه‌اندازی خود بنا به سبب فرم‌های معماری باید پیش‌گیری کرد. فاصلهٔ بین بام‌های فتوولتائیک و اشیای دیگر باید چنان باشد که به ایجاد سایهٔ متصل (پیوسته) نینجامد.

ـ جایی که سایه‌اندازی اجتناب‌ناپذیر است، انتخابِ دقیق اجزا و شکل و موقعیت پنل‌ها از اتلاف نیرو می‌کاهد.

۲ـ۲. سایه‌اندازی درختان

سایهٔ 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 نگردند، 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.

ـ بهتر است در نیم‌کرهٔ شمالی درختان را در شمال و در نیم‌کرهٔ جنوبی در جنوب ساختمان کاشت.

ـ با توجه به ارتفاع ساختمان، از درختانی با رشد محدود استفاده کرد.[10]

ـ 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.

۲ـ۳. 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.

ـ اگر آسمان محوطه بعدازظهرها بیشتر ابری و صبح‌ها بیشتر آفتابی است، پنل‌ها را می‌توان کمی به سمت شرق چرخاند.

۲ـ۴. سایه‌اندازی آلودگی‌ها

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

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

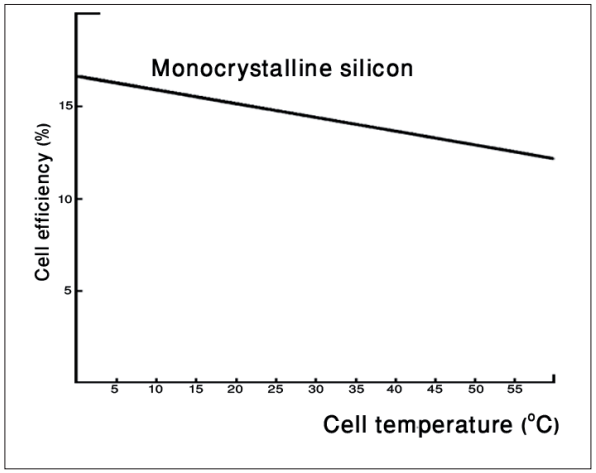
10 . Ibid.

دهـد. اگر چه پنل‌هایی با زاویهٔ بیش از ۲۰ درجه از طریق باران خود به خود شســته و تمیز خواهند شد، انواعی خاص از آلودگی (مثـل ذرات دوده) را با روش‌هایی دیگــر باید نظافت کرد.[11] بنا بــر این، کاهش مقدار برق تولیدی سیســتم را در اثر تجمع گرد و غبــار روی پنل‌ها، هنگام طراحی بایــد در نظر گرفت و برای نظافت دوره‌ای آنها راهکاری مناسب پیش‌بینی کرد. با توجه به تأثیر ســایه در کاهش بازدهی سیســتم‌های فتوولتائیک، باید تا حد ممکن از ایجاد سایه روی پنل‌ها به واسطهٔ 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 بی‌آی‌پی‌وی

معمولاً طراحان، طراحی خورشــیدی 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، نتیجهٔ کار بهتر و بازده انرژی ســاختمان 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 اســتفاده از سیســتم‌های غیر فعال خورشیدی (مثل گرمایش خورشــیدی) تناقض نداشته باشد و هر دو سیستم کاملاً با پروژه هم‌ســاز شــوند. مثلاً طراحان به منظور کاهــش مصرف انرژی سرمایشی ســاختمان، پوشش ســاختمان را به گونه‌ای طراحی میکنند که میزان نزول تابش روی ســطح ســاختمان کم باشد



ت۴. کردار تغییر بازدهی سلول‌های فتوولتائیک با افزایش دما (مأخذ: Ibid: p. 143)

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

طراحان می‌توانند سیستم‌های فتوولتائیک را چنان با ساختمان یکپارچه کنند که امکان تهویه، اســتفاده از گرمای خورشــید در زمستان، اســتفاده از نور طبیعی (مستقیم و غیرمستقیم)، دید به منظــر خارج، و مواردی دیگر، با هم فراهم شــود. 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. تهویهٔ سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

همچنان‌که ســلول‌های فتوولتائیکْ نور خورشــید را تســخیر و آن را به الکتریســته تبدیــل می‌کنند، آن را بــه گرمایی تبدیل می‌کننــد که می‌بایــد اســتفاده، کنترل، یــا تهویه شــود؛ زیرا پنل‌هــای فتوولتائیک، همچون ســایر دســتگاه‌های الکتریکی، در صورت خنکی هوا، بهتــر کار می‌کنند و در دماهای پایین‌تر،

11 . Ibid. p. 31.

بـرق بیشـتری تولید می‌کننـد. مطابـق تصویر ۴، بـا افزایش دمـا قدرت خـروج از سـلولها کاهـش می‌یابـد و در نتیجه از بازده پنل‌های فتوولتائیک کاسته می‌شود.

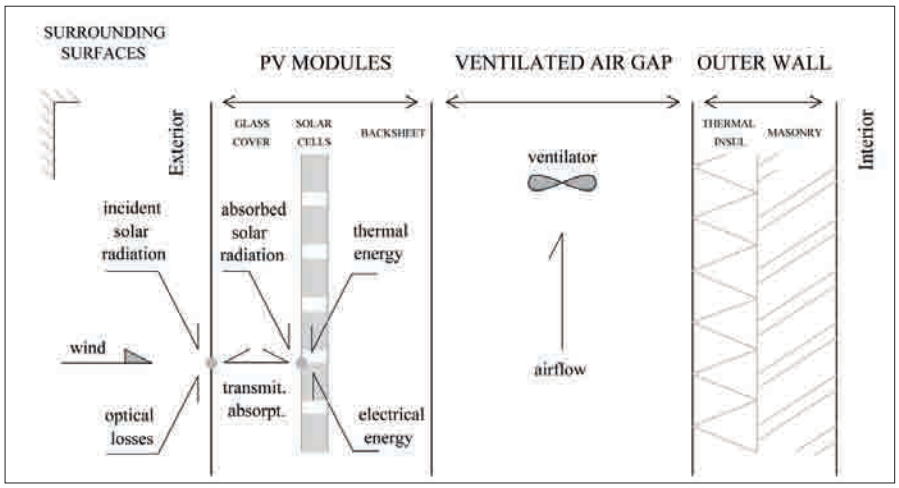
بنا بر این، در ترکیب فتوولتائیک‌ها با سـاختمان باید به مسـئلهٔ تهویـهٔ طبیعی یا مکانیکی آنها در فرایند طراحی توجه کرد تا به دمای پایین‌تر برسند و کارآیی (بازده) مطلوب آنها ادامه یابد.

ـ در طراحی بام‌های دندان‌های[12] ترکیب شـده 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 سـفال خورشیدی) می‌توان با ایجاد دریچه‌هایی در زیر لبهٔ بام و روی بام عبور جریان هوا از پشت سفال‌های فتوولتائیک را تسهیل کرد.

ـ در سیسـتم‌های نمـا با اتصـال پنلها به دیوارهـای پرده‌ای[13] (به صـورت دولایه)، امکان تهویهٔ پشـت آنهـا فراهم خواهد شـد. در این حالت، با اسـتفاده از فضای بیـن دو لایه، تهویهٔ پشـت فتوولتائیک‌ها انجام می‌شـود و از انتقال گرمای حاصل از فتوولتائیک‌ها به لایهٔ داخلی جلوگیری می‌کند. بدین‌سـان، عملکـرد بهتر و بازدهی مطلوب پنل‌هـای فتوولتائیک حاصل می‌گردد (ت۵).

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

ت۵. مـدل تهویـهٔ نمـای BIPV (مأخذ: ترسـیم نگارنـده، برگرفته از http://www.fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/K_Stanek_W2-510_posterA4.pdf)



۵. شیوه‌های ترکیب سیستم‌های فتوولتائیک با ساختمان

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

۵ـ۱. سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با بام

پنل‌هـای فتوولتائیک در بام‌های مسـطح را می‌توان به صورت سلول‌های فیلم‌نازک[14] به صورت انعطاف‌پذیر، و در بام‌های شیب‌دار به شکل سفال‌های فتوولتائیک ترکیب کرد. همچنین آنها را می‌توان به عنوان پوسـتهٔ ساختمان با سیستم سازهٔ بام شیبدار یا مسطح ترکیب و مستقیماً به سازهٔ بام متصل کرد.

ـ عناصـر فتوولتائیک بایـد با هر عنصر غیـر فتوولتائیک دیگر سـازگار شـوند تا مسائل سـازهای و زیبایی در معماری با هم ترکیب گردد و محصولی آگاهانه و معمارانه به دست آید.

ـ در طراحی سیسـتم‌های بام، مسئلهٔ انباشت برف و رفع رطوبت حائز اهمیت اسـت. بدیـن منظور باید برای رفـع آب باران و انباشـت برف روی پنل‌های فتوولتائیک، راه‌حلهایی مناسب و مطابق با شرایط اقلیم محل را برگزید.

۵ـ۲. سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با پنجره‌های سقفی و آتریوم‌ها

در سـاختمان بی‌آی‌پی‌وی بـرای ترکیـب فتوولتائیک‌ها با بام، معمار می‌تواند بام را به صورت نورگیرهای دندانه‌دندانهٔ یکپارچه با فتوولتائیک طراحی کند (ت ۷). همچنین پنل‌های فتوولتائیک نیمه‌شـفاف را می‌توان جای‌گزین شیشـهٔ پنجره‌های سـقفی و آتریوم‌هـا کرد که طراح خلاق و مجرب بدین وسـیله از کیفیت نور به صورت لکه‌لکه استفاده می‌کند.

نورگیرهای روی بام[15] از راه تأمین روشـنایی غیر مسـتقیم، نیاز به نورپردازی الکتریکی را به هنگام روز یا کاهش می‌دهند یا

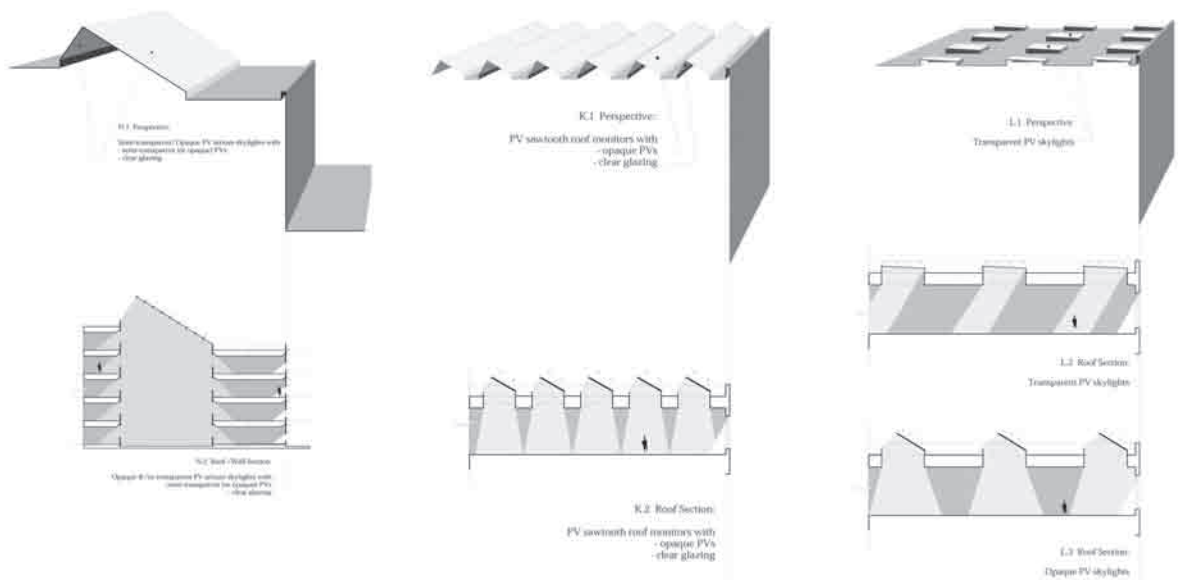
کاملاً رفع می‌کنند. در صورتی که با فتوولتائیک‌ها یکپارچه شوند، بر عملکردشان افزوده می‌شود و به تأمین انرژی الکتریکی برای نورپردازی مصنوعی در ساعات روز و شب نیز کمک می‌کنند. طراح ساختمان می‌تواند فتوولتائیک‌ها را با آتریوم‌ها یکپارچه کند (ت۸)؛ به گونه‌ای که فتوولتائیک‌های مات یا نیمه‌شفاف در سمت رو به آفتاب و شیشهٔ 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.

۵ـ۳. 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 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 ناخواستهٔ 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 (ت۹).

۵ـ۴. سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با سایبان‌ها

پنل‌های فتوولتائیک غیرشفاف را در ترکیب با ساختمان به عنوان سایبان[16] پنجره، لوور،[17] یا رف نور[18] نیز در نما نصب و فضای داخل را از پرتوهای مستقیم خورشید



16. Shadowing
17 . Louver
18 . Light-Shelf

ت۶. (راست) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با نورگیرهای سقفی (مأخذ: P.C. Kiss Cathcart Anders Architects, Ibid, p. 22)
ت۷. (وسط) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با نورگیرهای دندانه‌ای (مأخذ: Ibid, p. 21)
ت۸. (چپ) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با آتریوم‌ها (مأخذ: Ibid, p. 24)

حفاظـت می‌کننـد و در همان حال شـرایط ورود نـور پراکنده و غیرمسـتقیم را بـه درون فضـا تأمیـن می‌کننـد. سـایبان‌های فتوولتائیـک را می‌تـوان بـه صـورت افقـی، شـیبدار (تصویـر۱۰)، یـا پل‌هـای روی دیـوار قائم نمـا قرار داد.

ـ هنگامی کـه از سیسـتم‌های فتوولتائیک به عنوان سـایبان استفاده می‌شود، تأثیر سـایهٔ سایر پنل‌های فتوولتائیک را باید در نظر گرفت.

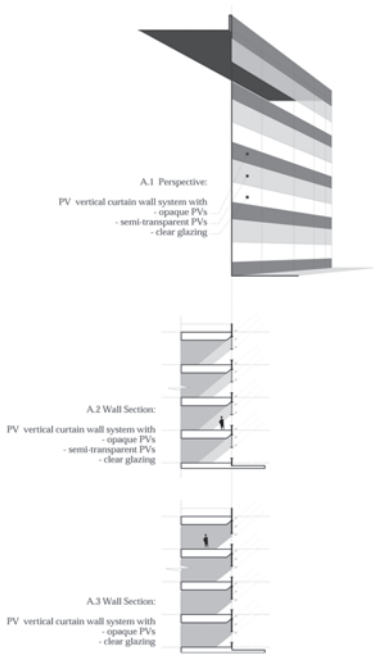
ـ مزیـت سـایبان‌های فتوولتائیـک در مقایسـه بـا سـایر سـایبان‌ها یـا پرده‌هـا آن اسـت کـه عـلاوه بـر اینکـه مانـع ورود گرمـا بـه داخـل سـاختمان می‌شـود و بـار دسـتگاه‌های سرماسـاز را کاهـش می‌دهـد، خـود نیز نیـروی برق مـورد نیاز سیسـتم‌های سـرمایش را تولید می‌کند.

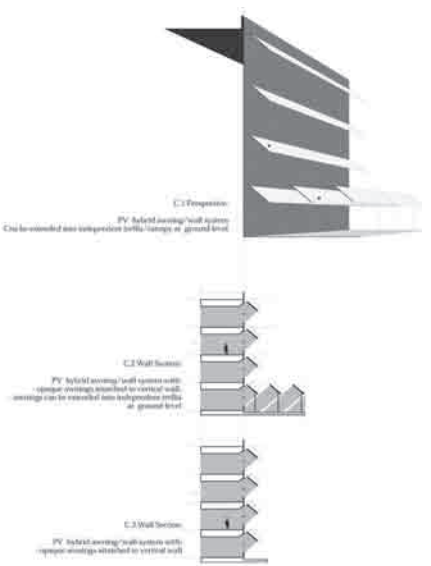
۶. تأثیر فرم پلان ساختمان بر نیروی سیستم فتوولتائیک

برای آزمایش[۱۹] تأثیر فرم پلان سـاختمان بـر میزان تولید برق سـالانه، یک بنای اداری چهار طبقـه را در لس‌آنجلس (عرض جغرافیایـی ۳۳/۹ درجه شـمالی) با مسـاحت۳۷۱۶ مترمربع و زیربنـای ۲۹۲۹ مترمربـع و ارتفاع هر طبقـه ۳/۶۵ متر در نظر گرفته می‌گیریم. فرض بر این است که کل چهار طبقهٔ ساختمان در نما با پنل‌های عمودی فتوولتائیک پوشـانده شده است. اقلیم این محل گرم و خشک است و نیاز سرمایشی زیادی دارد. برای این سـاختمان می‌توان دو حالت در نظـر گرفت: در یک حالت مساحت کفْ ثابت است و با تغییر فرم پلان، مساحت دیوارهای محیطی تغییر میکند؛ در حالت دوم، مساحت دیوارهای محیطیْ ثابت و مسـاحت کفْ متغیر فرض شده است. در این تغییر فرم، پنج نوع پلان به صورت دیاگرام «ت ۱۱» بررسـی می‌شود. به طور کلی در این حالت‌ها تأثیر فرم پلان سـاختمان بر کارآیی و میزان تولید سیستم فتوولتائیک مشخص می‌گردد.[۲۰]

با توجه به دیاگرام‌ها و محاسبات نیروی تولید شده، مشخص اسـت که هر چه فرم پلانِ کشـیده‌تر (باریک‌تر) باشـد، محیطْ افزایـش می‌یابد و میزان دریافت تابش خورشـید و تولید انرژی برق بیشـتر می‌شـود 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. مسئلهٔ دیگر اینکه در کشیدگی فرم پلان به صورت شرقی ـ غربی و شـمالی ـ جنوبی، تفاوت چشـم‌گیری در میزان تولید انرژی برق وجود دارد.

با توجه بـه دیاگرام‌ها، در صورتی که پلان این سـاختمان لس‌آنجلسی را به فرم کشیده در جهت شمالی ــ جنوبی درآوریم، به حداکثر تولید برق در کل سال خواهد رسید ــ البته باید توجه کرد که دیوارهای این سـاختمان در چهار جهتِ شـمال، شرق،





۱۹. در ایـن آزمایش، مبنای کار فقط بـر مقدار تولیـد نیـروی فتوولتائیک استوار شده است.

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

ت۹. (چپ) ترکیب انواع پنل‌های فتوولتائیـک با دیوار پـرده‌ای نما (مأخذ: Ibid, p. 12)

ت۱۰. (راسـت) ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با سـایبان نما (مأخذ: Ibid, p. 14)

جنوب، و غرب با فتوولتائیک پوشـانده شـده اسـت. به عبارت دیگر، مشـخص می‌شـود که دیوارهای شرقی و غربی در طول سـال نور زیادی از خورشید دریافت و در نتیجه نیروی بیشتری تولیـد می‌کنند. اما این آنالیز تنها منحصر به کارآیی فتوولتائیک است و در آن به آثار منفی حاصل از این جهت‌یابی توجهی نشده اسـت؛ از آن جمله کسب گرمای خورشید، خیرگی[21] آفتاب صبح و عصر، و بهره‌وری کمتر در انتخاب پلان کف.[22]

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 فتوولتائی، سـاختمانی چهارطبقه با دیـوار جنوبی بـه طول ۳۰/۵ متـر و به ارتفـاع ۱۴/۶ متر و با ۲۷۸/۷ مترمربع کل مسـاحت فتوولتائیک، در جهت قائم فرض شـده اسـت.[23] تأثیر شـیب‌های مختلف این دیوار (از شیب ۹۰ درجهٔ قائم تا ۴۰ درجه) بر میزان تولید برق در دو حالت بررسـی می‌شـود (ت۱۲). در حالت اول، مسـاحت 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 ــ البته ارتفاع طبقات ثابت است.

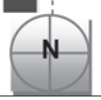
با توجه به دیاگرام‌ها و محاسـبات نیروی تولید شده توسط پنل‌های فتوولتائیک، مشـخص اسـت که هر چه شیب دیوار از حالت قائم به سـطح افق نزدیکتر می‌شـود، سـطح فتوولتائیک انرژی خورشید را بیشتر دریافت می‌کند (به سبب زاویه‌ای که با پرتوهای خورشید می‌سازد). بنا بر این، تولید نیروی برق و بازده آن بیشتر خواهد بود.

همچنین در صورتی که بخواهیم کل سطح دیوار با پنل‌های فتوولتائیک پوشـیده باشد، با نزدیکتر شدن شیب دیوار به سطح افق، بر مسـاحت دیوار نیز افزوده و در نتیجه تولید برق بیشـتر می‌شـود (در این دیاگرام‌ها مساحت سـطح 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 شـیبدار کردن سـطح دیوار را باید با هزینه‌های دیگر بررسی کرد؛ از آن جمله هزینه‌های سـاخت دیوار شیبدار که بیشتر است، یا کاهش مسـاحت کف در طبقات بالاتـر. داخل طبقات نیز در قسـمت 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

ت۱۱. 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	۹۲۵۱۴kWh			۷۴۸۶۲kWh
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			۷۶۹۸۹kWh
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



دیوار شـیب‌دار، کارآیی نیروی دیوارهای جنوبی و شرقی و غربی را در سرتاسـر سـال بهبود می‌بخشد؛ در حالی که کارآیی دیوار شمالی شیب‌دار فقط در طول تابستان افزایش می‌یابد.

چنان‌که از این کردارها پیداسـت، نماهای شیب‌دار یکپارچه با فتوولتائیک‌ها بر میزان بازدهی بهینهٔ 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 دیـوار پرده‌ای نما در طبقات که منجـر به کاهش مقدار فضای ساختمان می‌شـود و همچنین هزینه‌های بیشـتر برای ساخت دیوار مایل و غیره.

ت۱۲. مقایسه شـیب دیوار نمای ساختمان BIPV از نظر تولید انرژی (مأخذ: ترسیم نگارنده، برگرفته از Ibid, p. 32)

۹۰° قائم	دیاگرام ۱ (مساحت PV ثابت)	دیاگرام ۲ (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	۱۵۴۳۳kWh	۱۵۴۳۳kWh	
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	۱۸۷۲۸kWh	
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	

۸. تعیین نوع و توان سیستم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

نوع یک سیسـتم فتوولتائیک تابع شـرایطی چـون نوع بارهای متصل به سیسـتم (ای‌سی یا دی‌سـی یا هر دو)، وجود یا عدم وجـود مولد کمکی برق، اتصال یا عدم اتصال به شـبکهٔ محلی یا سراسـری، و چگونگی ارتباط با آن شـبکه (یک طرفه یا دو طرفه) اسـت. قبل از طراحی ابتدا باید تصمیم گرفت که سیستم فتوولتائیک مسـتقل خوداتکاء[۲۴] باشـد یا متصل به شـبکه برق شهری؟[۲۵]

سیسـتم‌های مسـتقل بـه باتری‌هـای ویژه بـرای ذخیرهٔ الکتریسـیته نیاز دارند و تولید برق آنها نسـبت به سیسـتم‌های متصل به شـبکه کمتر است و اغلب در نقاط دورافتاده از شبکهٔ برق اسـتفاده می‌شود. اگر سیسـتم فتوولتائیک متصل به شبکهٔ برق شـهری باشـد، تضمینی بـرای تأمین برق وجـود خواهد داشـت؛ زیرا نیروی برق بین سیسـتم و شبکه مبادله می‌شود و شبکه همچون ذخیره‌سازی نامحدود عمل می‌کند. سیستم‌های باتـری‌دار هم نیاز بـه تعمیر و نگهداری باتری‌هـا دارند؛ اما در مقابل سیسـتم‌های متصل به شـبکه 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 اندازهٔ حداکثر بازده جریان مستقیم (دی‌سـی) سیستم خورشـیدی به کیلووات معین شده اسـت؛ بنا بر این، یک سیسـتم ۲ کیلـووات هنگامی که کاملاً در معرض پرتوهای خورشـید قرار گیرد، ۲۰۰۰ وات الکتریسیتهٔ دی‌سـی تولید می‌کند، سپس این جریان مستقیم از طریق یک

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 (همهٔ 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 بودجهٔ 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.

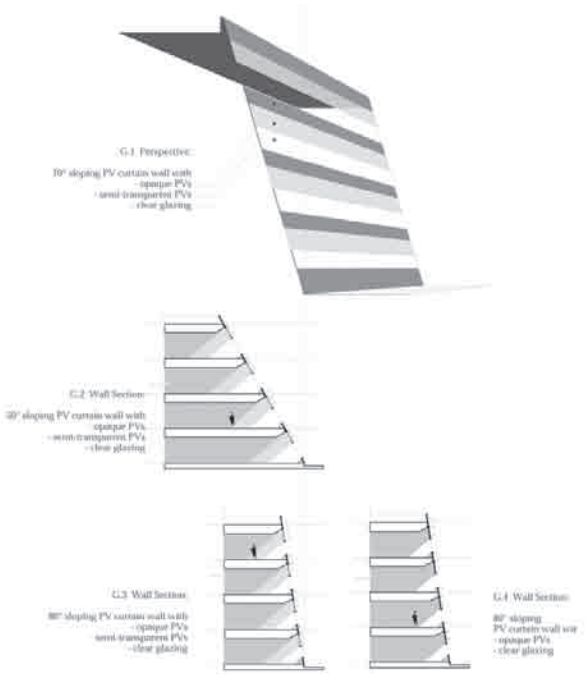
۹. هماهنگی میان معمار و دیگر مهندسان دست‌اندرکار طرح ساختمان بی‌آی‌پی‌وی

مسئلهٔ معمارانهٔ 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 و دیگر مهندسان، را نیز به رقابت می‌طلبد تا برای یکپارچگی سیستم پشتیبانی ساختمان با نیروی تأمین شدهٔ 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)



ت ۱۳. ترکیب پنل‌های فتوولتائیک با نمای شیب‌دار(مأخذ: Ibid, p. 18)

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

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

۲. یکپارچگی مکانیکی (چند عملکردی بودن یک عنصر فتوولتائیک)
۳. یکپارچگی الکتریکی (متصل به شبکه یا استفادهٔ 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 پروژهٔ 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 اولیهٔ 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.

نکتهٔ 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 از جنبه‌های مختلف با بنا ترکیب و یکپارچه کنند. بنا بر این، طراحان ساختمان در فرایند طراحی‌باید 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)»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، تهران، دانشکدهٔ 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.