

مروری تحلیلی بر راهبردهای فرم و طراحی پوسته در سیستم های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (BIPV) در اقلیم های معتدل و مرطوب (منطقه خزری)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷

کد مقاله: ۴۷۶۲۶

ملیکا زارعی^{۱*}، فاطمه مظفری قادیکلایی^۲

چکیده

سیستم های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (Building-Integrated Photovoltaics – BIPV) به عنوان یکی از رویکردها به عنوان راهبردهایی مؤثر، نقش اساسی در تسهیل گذار به معماری کم کربن و بهبود بهره وری انرژی ایفا می کنند. با این حال، عملکرد این سیستم ها به شدت متأثر از شرایط اقلیمی و تصمیمات طراحی معماری، به ویژه در مراحل اولیه شکل دهی فرم و پوسته، قرار دارد. اقلیم معتدل و مرطوب خزری، با ویژگی هایی مانند تابش پراکنده بالا، پوشش ابری گسترده، رطوبت نسبی زیاد و بارندگی مداوم، شرایط متفاوتی نسبت به اقلیم های خشک و آفتابی ایجاد می کند و محدودیت های خاصی برای راهبردهای متعارف طراحی فتوولتائیک به همراه دارد. این مطالعه، با رویکرد مرور نظام مند، به تحلیل و طبقه بندی راهبردهای فرم و طراحی پوسته در سیستم های BIPV متناسب با اقلیم خزری می پردازد. برای این منظور، مجموعه ای از منابع علمی معتبر فارسی و انگلیسی در حوزه BIPV، طراحی پوسته و عملکرد اقلیمی ساختمان ها به طور دقیق بررسی و تحلیل شده است. در این پژوهش، ابتدا انواع سیستم های BIPV بر اساس محل نصب، نقش های عملکردی و فناوری های رایج معرفی می شوند. سپس، راهبردهای فرم محور شامل جهت گیری و زاویه نصب، هندسه بام و نما، توده گذاری و بهره گیری از عناصر سایه انداز و پوسته های نیمه شفاف، از منظر تأثیر بر دریافت تابش خورشیدی، عملکرد حرارتی و یکپارچگی معماری تحلیل می شوند. یافته ها نشان می دهند که در اقلیم خزری، بهینه سازی دریافت تابش پراکنده، مدیریت رطوبت و ارتقای تهویه طبیعی پوسته نقش تعیین کننده ای در موفقیت سیستم های BIPV دارند و راهبردهای مبتنی بر بیشینه سازی تابش مستقیم، کارایی محدودی دارند. همچنین، یکپارچگی هم زمان اهداف انرژی، حرارتی و معماری در مراحل اولیه طراحی، عامل کلیدی در ارتقای عملکرد و دوام بلندمدت سیستم های BIPV محسوب می شود. در پایان، خلأهای پژوهشی موجود و مسیرهای پیش رو برای توسعه آتی پوسته های اقلیم محور و هوشمند BIPV در نواحی معتدل و مرطوب پیشنهاد شده اند.

واژگان کلیدی: سیستم های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان (BIPV)، پوسته اقلیم محور، اقلیم معتدل و مرطوب، انرژی خورشیدی

۱ - دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران (نویسنده مسئول)
melika.zarei@iau.ac.ir

۲ - استادیار، گروه معماری، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۱- مقدمه

افزایش فزاینده مصرف انرژی در بخش ساختمان و سهم قابل توجه آن در انتشار گازهای گلخانه‌ای، این بخش را به یکی از مهم‌ترین حوزه‌های مداخله در مسیر توسعه پایدار تبدیل کرده است. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند که در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، ساختمان‌ها سهم عمده‌ای در مصرف نهایی انرژی دارند و در برخی موارد حتی از بخش‌های صنعت و حمل‌ونقل پیشی می‌گیرند. (Bougda & Sharples, 2009) این روند، در کنار کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و تشدید اثرات زیست‌محیطی، ضرورت بازنگری در رویکردهای طراحی معماری و سیستم‌های تأمین انرژی ساختمان را برجسته می‌سازد.

معماری معاصر، به‌ویژه در دهه‌های گذشته، غالباً با اتکا بر راهکارهای مکانیکی و فناورانه و بدون توجه کافی به شرایط اقلیمی شکل گرفته است؛ رویکردی که اغلب به افزایش بارهای گرمایشی و سرمایشی و اتلاف انرژی منجر شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که پوسته ساختمان، به‌عنوان واسطه اصلی میان محیط بیرونی و فضای داخلی، نقش کلیدی در کنترل تبادلات حرارتی، تأمین نور طبیعی و تهویه دارد و می‌تواند مستقیماً بر میزان مصرف انرژی تأثیر بگذارد. (Knaack & Klein, 2009)، (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴)

در این زمینه، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبعی پاک، تجدیدپذیر و در دسترس، جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌های انرژی و طراحی پایدار یافته است. سیستم‌های فتوولتائیک به دلیل تولید مستقیم برق و قابلیت ادغام در اجزای ساختمانی، یکی از کارآمدترین راهکارهای استفاده از انرژی خورشیدی در محیط‌های ساخته‌شده به‌شمار می‌روند. (Prasad & Snow, 2005)

با توجه به تراکم بالای ساخت‌وساز و محدودیت فضا برای نصب سامانه‌های مستقل، ادغام سیستم‌های فتوولتائیک با بام و نما اهمیت فزاینده‌ای یافته است. (Wu et al., 2015) بر اساس نحوه نصب و میزان یکپارچگی با کالبد ساختمان، سیستم‌های فتوولتائیک به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: فتوولتائیک‌های متصل به ساختمان (BAPV) و فتوولتائیک‌های یکپارچه با پوسته ساختمان (BIPV). در حالی که سیستم‌های BAPV به‌صورت الحاقی نصب می‌شوند، سیستم‌های BIPV بخشی از پوسته ساختمان هستند و به‌طور هم‌زمان نقش مصالح و مولد انرژی را ایفا می‌کنند. (Biyik et al., 2017؛ Toledo et al., 2016) پژوهش‌های داخلی نیز بر این نکته تأکید دارند که یکپارچگی مؤثر سیستم‌های فتوولتائیک با معماری، مستلزم در نظر گرفتن آن‌ها از مراحل ابتدایی طراحی و هماهنگی میان معمار و سایر تخصص‌هاست (وفايي، ۱۳۸۸؛ وفايي، ۱۳۹۱).

اگرچه بسیاری از مطالعات پیشین بر بهبود فناوری پنل‌ها و افزایش راندمان الکتریکی تمرکز کرده‌اند. (Kurtz et al., 2011؛ Osseweijer et al., 2018) شواهد نشان می‌دهند که عملکرد واقعی سیستم‌های BIPV به‌شدت تحت تأثیر راهبردهای طراحی فرم و پوسته معماری قرار دارد. عواملی مانند جهت‌گیری و شیب پنل‌ها، هندسه و شکستگی حجم، الگوی پوسته و تهویه طبیعی پشت پنل‌ها، نقش تعیین‌کننده‌ای در دریافت تابش خورشیدی، رفتار حرارتی و کارایی کلی سیستم دارند. (Gonçalves et al., 2018) اهمیت این موضوع در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، از جمله اقلیم خزری در شمال ایران، دوچندان می‌شود. ویژگی‌هایی مانند رطوبت نسبی بالا، پوشش ابری گسترده، تابش پراکنده و بارش فراوان، شرایطی ایجاد می‌کنند که تمرکز صرف بر بیشینه‌سازی تابش مستقیم خورشید، رویکرد رایج در اقلیم‌های خشک و آفتابی، کارایی محدودی دارد (Brito et al., 2017). al., 2017) چنین شرایطی، راهبردهای فرم‌محور و پوسته‌محور، از جمله تنظیم هندسه سطوح برای جذب تابش پراکنده، شیب‌بندی مناسب برای دفع رطوبت و استفاده از پوسته‌های تهویه‌پذیر، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت سیستم‌های BIPV ایفا می‌کنند. (یوردشاهی و همکاران، ۱۴۰۲)

با وجود گسترش پژوهش‌ها در حوزه فتوولتائیک، مرور ادبیات نشان می‌دهد که هنوز خلأ معناداری در تحلیل انتقادی ارتباط میان راهبردهای طراحی فرم و پوسته معماری با عملکرد انرژی سیستم‌های BIPV در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، به‌ویژه اقلیم خزری، وجود دارد. بسیاری از مطالعات یا بر جنبه‌های فناورانه پنل‌ها متمرکز بوده‌اند یا نتایج آن‌ها محدود به اقلیم‌های تابشی متفاوت است. بر این اساس، مقاله حاضر با رویکرد مروری انتقادی به تحلیل راهبردهای فرم و طراحی پوسته در ادغام سیستم‌های BIPV با ساختمان در اقلیم‌های معتدل و مرطوب می‌پردازد. هدف اصلی، شناسایی، مقایسه و ارزیابی راهبردهای مؤثر برای بهبود عملکرد انرژی BIPV و استخراج ملاحظات کلیدی طراحی در اقلیم خزری است.

سؤالات پژوهش:

- ۱) سیستم‌های BIPV چگونه می‌توانند به‌عنوان مؤلفه‌های پاسخ‌گوی اقلیم در مناطق معتدل و مرطوب عمل کنند؟
- ۲) کدام راهبردهای طراحی فرم و پوسته بیشترین تأثیر را بر عملکرد انرژی سیستم‌های فتوولتائیک در این اقلیم‌ها دارند؟

۲- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع مرور انتقادی است و با هدف تحلیل، مقایسه و تلفیق راهبردهای طراحی فرم و پوسته معماری در ادغام سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (BIPV) در اقلیم‌های معتدل و مرطوب انجام شده است. تمرکز این رویکرد بر شناسایی الگوهای مفهومی، تبیین ارتباط میان تصمیمات معماری و عملکرد انرژی سیستم‌های BIPV و ارزیابی انتقادی رویکردهای طراحی موجود است. منابع علمی مورد استفاده از پایگاه‌های معتبر بین‌المللی و داخلی گردآوری شده‌اند. جستجوی منابع با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌هایی مرتبط با Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)، طراحی پوسته معماری، راهبردهای فرم‌محور، طراحی اقلیم‌محور و عملکرد انرژی ساختمان انجام شده است. انتخاب منابع بر اساس میزان ارتباط مستقیم آن‌ها با موضوع پژوهش و تمرکز بر نقش تصمیمات معماری در عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک صورت گرفته است. در این فرآیند، مطالعاتی که صرفاً بر بهبود فناوری پنل‌ها، مشخصات الکتریکی یا تحلیل‌های مهندسی مستقل از طراحی معماری متمرکز بوده‌اند، از دامنه تحلیل کنار گذاشته شده‌اند.

منابع منتخب با بهره‌گیری از تحلیل محتوای کیفی و روش مقایسه تطبیقی بررسی شده‌اند. در این مرحله، راهبردهای طراحی استخراج و بر اساس مؤلفه‌های فرم‌محور و پوسته‌محور، از جمله جهت‌گیری و هندسه سطوح، زاویه و شیب استقرار پنل‌ها، الگوی توده‌گذاری، نوع پوسته و نقش تهویه طبیعی در پشت پنل‌ها، دسته‌بندی شده‌اند. سپس، این راهبردها از منظر تأثیر بر دریافت تابش خورشیدی (مستقیم و پراکنده)، رفتار حرارتی پوسته، مدیریت رطوبت و عملکرد کلی انرژی سیستم‌های BIPV مورد ارزیابی انتقادی قرار گرفته‌اند.

در نهایت، بر پایه نتایج این تحلیل، یک چارچوب تحلیلی مفهومی برای طبقه‌بندی و تفسیر راهبردهای طراحی فرم و پوسته در سیستم‌های BIPV ارائه شده است. این چارچوب، مبنای سازمان‌دهی بخش‌های تحلیلی مقاله و بررسی کاربرد راهبردهای استخراج‌شده در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، با تأکید ویژه بر اقلیم خزری، را فراهم می‌کند.

۳- مبانی نظری

۳-۱- ویژگی‌های اقلیم معتدل و مرطوب خزری

عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (BIPV) به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های اقلیمی محل استقرار قرار دارد. اقلیم معتدل و مرطوب خزری، که نوار ساحلی جنوب دریای خزر و بخش‌هایی از استان‌های گیلان، مازندران و گلستان را دربرمی‌گیرد، به‌واسطه ترکیب خاصی از رطوبت نسبی بالا، بارش‌های مکرر، پوشش ابری گسترده و الگوی متفاوت تابش خورشیدی، شرایطی متمایز از اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران ایجاد می‌کند. این تمایز اقلیمی سبب می‌شود که راهبردهای متعارف طراحی فتوولتائیک، که عمدتاً بر اقلیم‌های آفتابی مبتنی هستند، نیازمند بازتعریف و تطبیق در این منطقه باشند.

۳-۲- مشخصات اقلیمی منطقه خزری

برخلاف مناطق مرکزی و جنوبی ایران که از شدت بالای تابش مستقیم خورشید برخوردارند، اقلیم خزری با فراوانی روزهای ابری و نیمه‌ابری شناخته می‌شود. در این منطقه، مقدار کل تابش سالانه خورشید کمتر است، اما سهم تابش منتشر نسبت به تابش مستقیم افزایش می‌یابد. مطالعات کلاسیک حوزه انرژی خورشیدی نشان می‌دهند که در چنین شرایطی، سطوح مایل، شکسته و فرم‌های چندوجهی می‌توانند نقش مؤثری در بهبود دریافت انرژی خورشیدی ایفا کنند (Duffie & Beckman, 1980).

از این رو، هندسه و فرم پوسته‌های BIPV در اقلیم خزری به عاملی کلیدی در ارتقای بازده سیستم تبدیل می‌شود. اقلیم خزری بالاترین میزان رطوبت نسبی را در میان اقلیم‌های ایران داراست. رطوبت بالا، همراه با بارش‌های مکرر و گاه طولانی‌مدت، نه تنها بر آسایش حرارتی فضاها و داخلی اثرگذار است، بلکه دوام مصالح، عملکرد اتصالات و پایداری بلندمدت اجزای پوسته ساختمان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. پژوهش‌های داخلی در حوزه BIPV تأکید می‌کنند که در چنین شرایطی، انتخاب مصالح مقاوم در برابر رطوبت، طراحی دقیق جزئیات اجرایی و نحوه اتصال پنل‌ها به پوسته، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد موفق این سیستم‌ها ایفا می‌کند (وفایی، ۱۳۸۸؛ وفایی، ۱۳۹۱).

از دیگر شاخصه‌های مهم اقلیم خزری، تداوم پوشش ابری، به‌ویژه در فصول پاییز و زمستان است. این ویژگی موجب کاهش ساعات تابش مستقیم و افزایش نقش تابش پراکنده در تأمین انرژی خورشیدی می‌شود. در نتیجه، الگوهای متداول طراحی BIPV که عمدتاً بر بیشینه‌سازی تابش مستقیم متکی هستند، در این اقلیم کارایی محدودی داشته و نیازمند بازنگری اساسی متناسب با شرایط اقلیمی منطقه هستند (Brito et al., 2017).

۳-۳- تأثیر شرایط اقلیمی بر عملکرد سیستم‌های BIPV

ویژگی‌های اقلیمی منطقه خزری به‌طور هم‌زمان چالش‌ها و فرصت‌هایی را برای عملکرد سیستم‌های BIPV ایجاد می‌کنند که به‌شدت به راهبردهای طراحی فرم و پوسته معماری وابسته‌اند. افزایش سهم تابش منتشر و کاهش تابش مستقیم می‌تواند منجر به کاهش توان خروجی سیستم‌های فتوولتائیک نسبت به اقلیم‌های آفتابی شود. با این حال، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در صورت طراحی مناسب فرم پوسته، از جمله استفاده از سطوح مایل، شکسته و چندوجهی، امکان بهبود جذب تابش پراکنده و جبران بخشی از این افت عملکرد وجود دارد (Nagy et al., 2015)؛ (بروزی و همکاران، ۱۳۹۹).

رطوبت بالای هوا می‌تواند موجب نفوذ رطوبت به لایه‌های پنل، خوردگی اتصالات الکتریکی و کاهش عمر مفید سیستم‌های BIPV شود. بنابراین، طراحی دقیق جزئیات اجرایی، پیش‌بینی تهویه مناسب در پشت پنل‌ها و استفاده از مصالح مقاوم در برابر رطوبت، از الزامات اساسی طراحی BIPV در اقلیم خزری محسوب می‌شود. (Biyik et al., 2017)

در اقلیم معتدل و مرطوب، بار سرمایشی تابستانه در کنار رطوبت بالا یکی از چالش‌های اصلی طراحی ساختمان است. در این شرایط، پوسته‌های BIPV می‌توانند فراتر از نقش تولید انرژی الکتریکی، به‌عنوان پوسته‌ای پاسخ‌گوی اقلیم عمل کنند. ایجاد فاصله تهویه‌شده میان پنل‌ها و جداره اصلی ساختمان، علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی پنل‌ها، به کاهش انتقال گرما به فضای داخلی و ارتقای آسایش حرارتی کمک می‌کند. (Kalogirou et al., 2014)؛ (Gonçalves et al., 2018)

در مجموع، ویژگی‌های اقلیمی منطقه خزری نشان می‌دهد که موفقیت سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (BIPV) در این اقلیم، نه صرفاً به انتخاب فناوری پنل، بلکه به نحوه فرم‌دهی و طراحی پوسته معماری وابسته است. در چنین بستری، طراحی BIPV باید بر جذب مؤثر تابش منتشر، مدیریت رطوبت، تهویه پوسته و یکپارچگی کامل سیستم با فرم معماری تمرکز داشته باشد؛ رویکردی که می‌تواند به ارتقای هم‌زمان عملکرد انرژی و کیفیت محیطی ساختمان منجر شود.

بر این اساس و با توجه به تفاوت‌های بنیادین اقلیم معتدل و مرطوب خزری با اقلیم‌های خشک و آفتابی که اغلب مبنای مطالعات پیشین BIPV قرار گرفته‌اند، استخراج یک چارچوب تحلیلی برای تبیین ارتباط میان مؤلفه‌های اقلیمی و راهبردهای طراحی معماری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، بر پایه تحلیل تطبیقی منابع منتخب، ویژگی‌های کلیدی اقلیم خزری و پیامدهای آن‌ها بر تصمیمات طراحی فرم و پوسته در سیستم‌های BIPV شناسایی و دسته‌بندی شده‌اند. حاصل این تحلیل در قالب جدول ۱ ارائه می‌شود که ارتباط میان شرایط اقلیمی، الزامات طراحی، پیامدهای معماری-عملکردی و نوع راهبردهای طراحی را به‌صورت یکپارچه و نظام‌مند نشان می‌دهد.

جدول ۱. تطبیق ویژگی‌های اقلیم خزری با راهبردهای طراحی فرم و پوسته در سیستم‌های BIPV - (نگارندگان)

منابع	نوع راهبرد طراحی	پیامدهای معماری و عملکردی	الزامات طراحی BIPV	بعد طراحی	ویژگی اقلیمی منطقه خزری
Duffie & Beckman, 1980; بروزی و همکاران، ۱۳۹۹	فرم‌محور	فرم‌محور شدن طراحی نسبت به سطوح تخت و صرفاً جنوبی، افزایش سطح مؤثر جذب تابش	اولویت به هندسه‌هایی با قابلیت جذب تابش منتشر (سطوح مایل، شکسته و چندوجهی)	تابش خورشیدی	سهم بالای تابش منتشر به دلیل پوشش ابری مداوم
بروزی و همکاران، ۱۳۹۹؛ غفوریان و احمدنژاد، ۱۴۰۴	فرم‌محور	استفاده از حجم‌های شکسته، زیگزاگی یا الگوهای چندجهته برای افزایش دریافت سالانه انرژی	پرهیز از اتکای صرف به نماهای عمودی رو به جنوب	دسترسی به خورشید	ساعات محدود تابش مستقیم نسبت به اقلیم‌های خشک
وفایی، ۱۳۸۸	پوسته‌محور	جزئیات اجرایی به عامل کلیدی دوام و یکپارچگی معماری-فنی تبدیل می‌شود	استفاده از مصالح مقاوم در برابر رطوبت و محافظت از اتصالات الکتریکی	رطوبت و مصالح	رطوبت نسبی بالا در اغلب ایام سال
وفایی، ۱۳۹۱	پوسته‌محور	فرم و شیب بام یا نما باید از تجمع آب و نفوذ رطوبت جلوگیری کند	طراحی سطوح BIPV با شیب مناسب برای هدایت و دفع آب	آب و زهکشی	بارندگی مکرر و طولانی‌مدت
Kalogirou et al., 2014	ترکیبی (فرم)	افزایش راندمان پنل،	پیش‌بینی فضای	عملکرد	دمای معتدل همراه

منابع	نوع راهبرد طراحی	پیامدهای معماری و عملکردی	الزامات طراحی BIPV	بعد طراحی	ویژگی اقلیمی منطقه خزری
Gonçalves et al., 2018	+ پوسته)	کاهش تنش حرارتی پوسته و بار سرمایشی ساختمان	تهویه شده در پشت پنل های BIPV	حرارتی	با رطوبت بالا
Reijenga & Kaan, 2012 وفایی، ۱۳۸۸	پوسته محور	BIPV هم زمان نقش مولد انرژی و تنظیم کننده محیطی را ایفا می کند	در نظر گرفتن BIPV به عنوان بخشی از پوسته پاسخ گوی اقلیم	نقش پوسته	تعامل شدید پوسته با شرایط بیرونی (باد، باران، رطوبت)
Prasad & Snow, 2005; وفایی، ۱۳۸۸	فرآیند محور	تمایز بنیادین BIPV از BAPV: عدم امکان الحاق مؤثر پس از طراحی	ادغام BIPV از مراحل اولیه طراحی معماری	فرآیند طراحی	وابستگی شدید عملکرد PV به تصمیمات اولیه معماری
بروزی و همکاران، ۱۳۹۹	فرم محور	تولید فرم به راهبردی مبتنی بر عملکرد انرژی تبدیل می شود	افزایش سطح مؤثر جذب از طریق مفصل بندی هندسی پوسته	سطح مؤثر جذب	محدودیت سطوح مناسب در بافت متراکم شهری خزری
غفوریان و احمدنژاد، ۱۴۰۴	پوسته محور	تأثیر مستقیم بر مازولار بودن نما و طراحی جزئیات اتصال	پیش بینی دسترسی مناسب برای بازرسی، تعمیر و نگهداری	نگهداری و دوام	افزایش خطر فرسایش و کاهش دوام در اقلیم مرطوب

۴- معرفی و طبقه بندی سیستم های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (BIPV)

۴-۱- معرفی و تمایز مفهومی BIPV

سیستم های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (Building-Integrated Photovoltaics – BIPV) به سامانه هایی اطلاق می شوند که در آن ها اجزای فتوولتائیک، به طور هم زمان نقش مولد انرژی و بخشی از اجزای اصلی پوسته معماری را ایفا می کنند. در این رویکرد، مازول های فتوولتائیک نه به عنوان تجهیزاتی افزوده شده، بلکه به مثابه عناصر عملکردی-معماری در نظر گرفته می شوند که می توانند وظایف اقلیمی، فیزیکی و زیبایی شناختی پوسته را به صورت هم زمان بر عهده داشته باشند. (Prasad & Snow, 2005) این رویکرد، تمایزی بنیادین با سیستم های فتوولتائیک الحاقی (Building-Applied Photovoltaics – BAPV) دارد که معمولاً پس از تکمیل طراحی معماری و بدون تأثیرگذاری بر منطق شکل گیری پوسته به ساختمان افزوده می شوند. در مقابل، در سیستم های BIPV، تصمیم گیری درباره جایگاه، هندسه و نوع پنل ها از مراحل اولیه طراحی معماری صورت می گیرد و مستقیماً با فرم، عملکرد اقلیمی و سازمان دهی پوسته ساختمان پیوند می خورد. از این منظر، پوسته ساختمان از یک عنصر نسبتاً منفعل به یک «سطح فعال انرژی» تبدیل می شود که قادر است در پاسخ به شرایط اقلیمی، الگوی تابش خورشیدی و نیازهای حرارتی-نوری فضاهای داخلی عمل کند. (Reijenga & Kaan, 2012)



شکل ۱. تفاوت نحوه استقرار پنل ها در سیستم های BIPV و BAPV در پوسته ساختمان (غفوریان و احمدنژاد، ۱۴۰۴)

اهمیت این رویکرد به‌ویژه در اقلیم‌هایی با سهم بالای تابش منتشر و محدودیت دسترسی به تابش مستقیم، نظیر اقلیم‌های معتدل و مرطوب، برجسته‌تر می‌شود؛ جایی که هم‌زمان‌سازی اهداف انرژی، اقلیمی و معماری در پوسته، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد واقعی سیستم‌های فتوولتائیک ایفا کند.

با توجه به این تفاوت‌های مفهومی و عملکردی، تمایز میان سیستم‌های BIPV و BAPV صرفاً به شیوه نصب پنل‌ها محدود نمی‌شود، بلکه به فرآیند طراحی معماری، میزان تعامل سیستم با پوسته و نقش آن در پاسخ‌گویی اقلیمی ساختمان بازمی‌گردد. جدول ۲ با مقایسه این دو رویکرد از منظر نقش معماری، زمان تصمیم‌گیری در فرآیند طراحی، میزان تعامل با شرایط اقلیمی و عملکرد انرژی واقعی، نشان می‌دهد که چرا سیستم‌های BIPV به‌ویژه در اقلیم‌های معتدل و مرطوب—ظرفیت بالاتری برای یکپارچگی میان انرژی، فرم و عملکرد اقلیمی نسبت به سیستم‌های فتوولتائیک الحاقی دارند.

جدول ۲: مقایسه مفهومی و عملکردی سیستم‌های فتوولتائیک الحاقی (BAPV) و فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان (BIPV) در فرآیند طراحی معماری – (نگارندگان)

ویژگی	BAPV	BIPV
نقش در معماری	الحاقی و مستقل از طراحی پوسته	جزئی جدایی‌ناپذیر از پوسته ساختمان
زمان تصمیم‌گیری در فرآیند طراحی	پس از تکمیل طراحی معماری	مراحل اولیه طراحی معماری
میزان تعامل با اقلیم	محدود و غیرسیستماتیک	بالا و اقلیم‌محور
نقش به‌عنوان مصالح ساختمانی	ندارد	دارد (جایگزین اجزای پوسته)
عملکرد انرژی واقعی	وابسته به شرایط نصب؛ اختلاف قابل توجه با راندمان اسمی	وابسته به طراحی پوسته؛ قابلیت بهینه‌سازی عملکرد واقعی
عملکرد حرارتی پوسته	تأثیر محدود؛ امکان تشدید بار سرمایشی	قابلیت کنترل تبادل حرارتی و کاهش بار انرژی
پاسخ‌گویی به تابش منتشر (اقلیم‌های ابری)	ضعیف	بالا (به‌واسطه فرم و هندسه پوسته)

۴-۲- طبقه‌بندی سیستم‌های BIPV بر اساس محل استقرار

۴-۲-۱- سیستم‌های BIPV یکپارچه با بام

در این گروه، ماژول‌های فتوولتائیک به‌عنوان جایگزین مستقیم پوشش بام عمل کرده و علاوه بر تولید انرژی الکتریکی، وظایف محافظتی و اقلیمی بام را نیز بر عهده می‌گیرند. در اقلیم‌های مرطوب، شیب بام نه‌تنها از منظر دریافت تابش خورشیدی، بلکه به‌عنوان عاملی مؤثر در هدایت و دفع آب باران و کاهش نفوذ رطوبت اهمیت می‌یابد. (Sick & Erge, 1996) با وجود راندمان نسبتاً بالاتر سیستم‌های بامی نسبت به نماهای عمودی، محدودیت سطح مفید بام در بافت‌های متراکم شهری و ساختمان‌های چندطبقه، نقش طراحی فرم بام و هندسه آن را در بهینه‌سازی عملکرد BIPV برجسته می‌سازد.

۴-۲-۲- سیستم‌های BIPV یکپارچه با نما

سیستم‌های BIPV نمایی شامل ماژول‌هایی هستند که به‌عنوان بخشی از پوسته عمودی یا مایل ساختمان عمل کرده و می‌توانند جایگزین مصالح نما، سایه‌بان‌ها یا پوسته دوم شوند. این دسته بیشترین وابستگی را به فرم، هندسه و راهبردهای طراحی پوسته دارد و در اقلیم‌های معتدل و مرطوب—که سهم تابش منتشر قابل توجه است—نیازمند رویکردهای فرم‌محور نظیر شکستگی، زاویه‌گذاری و چندوجهی‌سازی پوسته است (بروزی و همکاران، ۱۳۹۹). در این چارچوب، BIPV می‌تواند هم‌زمان به‌عنوان سامانه تولید انرژی و ابزاری برای کنترل تابش، تهویه طبیعی و تنظیم شرایط رطوبتی پوسته عمل کند. (Reijenga & Kaan, 2012)

۴-۲-۳- سیستم‌های BIPV شفاف و نیمه‌شفاف

این گروه شامل شیشه‌های فتوولتائیک و پنل‌های نیمه‌شفاف است که در پنجره‌ها، نورگیرها و پوسته‌های دوپوسته به کار می‌روند. این سیستم‌ها امکان عبور کنترل‌شده نور طبیعی را فراهم کرده و هم‌زمان در تولید انرژی مشارکت دارند؛ قابلیتی که آن‌ها را برای فضاهای عمومی، آتریوم‌ها و نماهای با نیاز نوری بالا مناسب می‌سازد. (Thomas et al., 2003)

۴-۳- فناوری‌ها و نقش‌های عملکردی

فناوری‌های مورد استفاده سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان (BIPV) عموماً مبتنی بر سلول‌های سیلیکونی کریستالی و فناوری‌های لایه‌نازک هستند که انتخاب آن‌ها به شرایط اقلیمی، سهم تابش منتشر، محدودیت‌های وزنی و الزامات طراحی معماری وابسته است. در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، دمای متوسط همراه با رطوبت بالا، اهمیت تهویه پشت پنل‌ها و کنترل شرایط حرارتی را افزایش می‌دهد؛ به گونه‌ای که ایجاد جریان هوا در پشت ماژول‌های BIPV می‌تواند به بهبود راندمان الکتریکی و افزایش دوام سیستم منجر شود. (Kalogirou et al., 2014)

از منظر عملکردی، سیستم‌های BIPV در پوسته ساختمان نقش‌های چندگانه‌ای ایفا می‌کنند که فراتر از تولید انرژی الکتریکی است و شامل نقش‌های اقلیمی، سازه‌ای-فیزیکی و معماری-زیبایی‌شناختی می‌شود. بر این اساس، BIPV باید به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از راهبرد طراحی پوسته و نه به عنوان تجهیز الحاقی تلقی شود؛ رویکردی که مستلزم همکاری بین‌رشته‌ای معماران، مهندسان انرژی و طراحان پوسته از مراحل اولیه طراحی است. (Prasad & Snow, 2005)

۵- شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

۵-۱- شاخص‌های عملکرد انرژی

شاخص‌های عملکرد انرژی، رایج‌ترین و در عین حال بنیادی‌ترین معیار برای ارزیابی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان (BIPV) به شمار می‌روند. مرور ادبیات نشان می‌دهد که در اغلب مطالعات، شاخص‌هایی نظیر میزان تولید سالانه انرژی الکتریکی، راندمان عملیاتی پنل‌ها در شرایط بهره‌برداری واقعی، و نسبت تولید انرژی به سطح مؤثر پوسته (kWh/m^2) به عنوان معیارهای اصلی گزارش می‌شوند. (Toledo et al., 2016) این شاخص‌ها امکان مقایسه عملکرد سیستم‌های BIPV را در مقیاس معماری فراهم کرده و ابزار مناسبی برای تحلیل تأثیر تصمیمات طراحی پوسته بر بازده انرژی محسوب می‌شوند.

با این حال، یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهد که در سیستم‌های BIPV، عملکرد انرژی به شدت به نحوه ادغام پنل‌ها با پوسته ساختمان وابسته است و ارزیابی آن صرفاً بر مبنای راندمان اسمی پنل‌ها، تصویر دقیقی از عملکرد واقعی ارائه نمی‌دهد. پژوهش غفوریان و احمدنژاد (۱۴۰۴) در مقایسه سیستم‌های BIPV و BAPV نشان می‌دهد که اگرچه راندمان اسمی پنل‌ها در هر دو سیستم مشابه است، اما در BIPV عواملی نظیر زاویه و جهت‌گیری نصب، کیفیت یکپارچه‌سازی با پوسته و شرایط تهویه پشت پنل‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده واقعی انرژی ایفا می‌کنند. در نتیجه، فاصله قابل‌توجهی میان مقادیر اسمی و عملکرد واقعی سیستم‌های BIPV در بسیاری از پروژه‌ها مشاهده می‌شود.

ایجاد جریان هوای مؤثر در پشت پنل‌های یکپارچه می‌تواند افت راندمان ناشی از افزایش دمای سلول‌ها را به‌طور معناداری کاهش دهد؛ عاملی که در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، به دلیل هم‌زمانی دمای متوسط و رطوبت بالا، اهمیت مضاعفی دارد. (Kalogirou et al., 2014) افزون بر این، پژوهش‌های مرتبط با فرم‌های پوسته غیرمتعارف—نظیر هندسه‌های تاخورد، شکسته و چندوجهی—حاکمی از آن است که این فرم‌ها با افزایش دریافت تابش منتشر، قادرند عملکرد انرژی سیستم‌های BIPV را در اقلیم‌های ابری بهبود بخشند (برزویی و همکاران، ۱۳۹۹). این مجموعه شواهد نشان می‌دهد که در اقلیم‌هایی با سهم بالای تابش منتشر، عملکرد انرژی BIPV بیش از آنکه تابع فناوری پنل باشد، به راهبردهای فرم‌دهی و طراحی پوسته معماری وابسته است.

۵-۲- عملکرد حرارتی پوسته

عملکرد حرارتی پوسته ساختمان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی سیستم‌های BIPV است، به‌ویژه در شرایطی که پنل‌های فتوولتائیک به عنوان جایگزین مستقیم اجزای پوسته به کار گرفته می‌شوند. این شاخص معمولاً از طریق تحلیل تغییرات دمای سطح داخلی پوسته، میزان شار حرارتی عبوری و تأثیر سیستم بر بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. (Reijenga & Kaan, 2012) مطالعات نشان می‌دهند که در اقلیم‌های مرطوب، عدم پیش‌بینی تهویه مناسب در پشت پنل‌های BIPV می‌تواند منجر به تجمع حرارت، افزایش دمای پوسته و در نتیجه تشدید بار سرمایشی ساختمان شود. (Kalogirou et al., 2014) در مقابل، استفاده از نماهای دوپوسته فتوولتائیک یا پوسته‌های تهویه‌شونده، امکان کنترل مؤثرتر تبادل حرارتی میان محیط بیرونی و فضای داخلی را فراهم کرده و می‌تواند هم‌زمان به کاهش تنش حرارتی پنل‌ها و بهبود عملکرد حرارتی کلی پوسته منجر شود. (Frontini et al., 2015)

عملکرد حرارتی سیستم‌های BIPV به شدت وابسته به نوع یکپارچه‌سازی آن‌ها در بام، نما یا عناصر سایه‌انداز، و نیز به جزئیات اجرایی و شرایط اقلیمی محل پروژه است. از این رو، تعمیم یک راهکار حرارتی واحد برای تمامی اقلیم‌ها یا تمامی انواع BIPV امکان‌پذیر نیست و طراحی حرارتی پوسته باید به صورت اقلیم‌محور و پروژه‌محور انجام شود (Adami, 2018).

۵-۳- روشنایی روز و آسایش بصری

روشنایی روز و آسایش بصری، به‌ویژه در سیستم‌های BIPV نمایی و نیمه‌شفاف، از شاخص‌های مهم ارزیابی عملکرد محسوب می‌شوند. در این حوزه، معیارهایی نظیر سطح روشنایی داخلی، توزیع نور طبیعی در فضا، میزان خیرگی و کیفیت دید بصری کاربران مورد بررسی قرار می‌گیرند. (Thomas & Fordham, 2003) مطالعات نشان می‌دهند که استفاده نادرست از سلول‌های خورشیدی در نمای ساختمان می‌تواند منجر به کاهش نفوذ نور طبیعی و افت کیفیت فضایی فضاهای داخلی شود. منصوری و موسوی (۱۳۹۸) تأکید می‌کنند که در صورت طراحی نامناسب، BIPV نمایی ممکن است به‌عنوان مانعی برای نور طبیعی عمل کند؛ در حالی که طراحی هوشمندانه پوسته‌های فتوولتائیک، از طریق کنترل شفافیت، الگوی استقرار سلول‌ها و نسبت سطح فعال، می‌تواند به‌طور هم‌زمان نقش فیلتر نور، سایه‌انداز و مولد انرژی را ایفا کند.

مطالعات تطبیقی میان سیستم‌های BIPV و BAPV نیز نشان می‌دهد که در سیستم‌های یکپارچه، به‌واسطه امکان کنترل هندسه پوسته و زاویه سطوح، ظرفیت بالاتری برای کاهش خیرگی و بهبود کیفیت نور طبیعی -به‌ویژه در نماهای جنوبی و غربی- وجود دارد. (Toledo et al., 2016) این موضوع در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، که بهره‌گیری از نور طبیعی برای کاهش مصرف انرژی روشنایی اهمیت ویژه‌ای دارد، نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند.

۵-۴- ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی

ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی از جمله شاخص‌های کلیدی در تصمیم‌گیری برای به‌کارگیری سیستم‌های BIPV در مقیاس معماری و شهری محسوب می‌شود. این ارزیابی‌ها معمولاً شامل تحلیل چرخه عمر (Life Cycle Assessment - LCA)، میزان کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، دوره بازگشت سرمایه و هزینه چرخه عمر سیستم (Life Cycle Cost - LCC) هستند. (Prasad & Snow, 2005) گزارش‌های فنی نشان می‌دهند که اگرچه هزینه اولیه اجرای BIPV در مقایسه با سیستم‌های فتوولتائیک الحاقی بالاتر است، اما حذف بخشی از مصالح پوسته، کاهش مصرف انرژی عملیاتی ساختمان و افزایش عمر مفید سیستم می‌تواند توجیه‌پذیری اقتصادی آن را در بلندمدت بهبود بخشد. غفوریان و احمدنژاد (۱۴۰۴) نیز تأکید می‌کنند که در تحلیل اقتصادی BIPV، ارزش‌های معماری، صرفه‌جویی در مصالح پوسته و منافع زیست‌محیطی باید به‌صورت هم‌زمان لحاظ شوند و مقایسه صرف هزینه نصب اولیه، تصویر دقیقی از عملکرد واقعی و مزایای بلندمدت این سیستم‌ها ارائه نمی‌دهد.

به‌منظور ایجاد چارچوبی منسجم برای تحلیل مطالعات پیشین، شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان (BIPV) در این پژوهش در چهار دسته اصلی شامل عملکرد انرژی، عملکرد حرارتی پوسته، روشنایی روز و آسایش بصری، و ارزیابی‌های زیست‌محیطی-اقتصادی طبقه‌بندی شده‌اند. لازم به تأکید است که شاخص‌ها و پیامدهای ارائه‌شده در جدول ۳ مبتنی بر تحلیل تطبیقی منابع منتخب بوده و به‌منزله استخراج الگوهای غالب در ادبیات موضوع تلقی می‌شوند، نه تعمیم مستقیم نتایج هر مطالعه به تمامی اقلیم‌ها یا شرایط طراحی. این رویکرد امکان مقایسه نظام‌مند یافته‌ها و شناسایی حساسیت شاخص‌ها نسبت به تصمیمات معماری و نحوه یکپارچه‌سازی BIPV با پوسته ساختمان را فراهم می‌سازد.

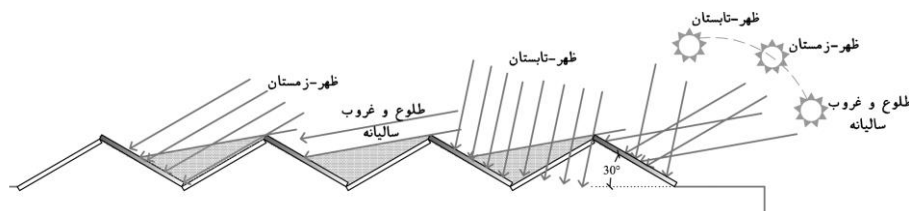
جدول ۳: شاخص‌های اصلی ارزیابی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان (BIPV) در مطالعات منتخب - (نگارندگان)

منابع	ملاحظات در BIPV	شاخص‌های متداول ارزیابی	جنبه ارزیابی
Frontini et al., 2015 Toledo et al., 2016	عملکرد واقعی به‌شدت وابسته به زاویه نصب، هندسه پوسته و شرایط تهویه پشت پنل است؛ شاخص‌های صرفاً الکتریکی بدون در نظر گرفتن ادغام معماری، تصویر کاملی ارائه نمی‌دهند.	تولید سالانه انرژی (kWh)، نسبت تولید به سطح پوسته (kWh/m ²)، ضریب عملکرد (PR)	عملکرد انرژی
Nagy et al., 2015 برزویی و همکاران، ۱۳۹۹	استفاده از هندسه‌های غیرصفحه‌ای، شکسته و تطبیقی می‌تواند دریافت تابش منتشر را افزایش داده و عملکرد انرژی را در شرایط ابری بهبود دهد	تغییرات تولید انرژی نسبت به هندسه مرجع، مقایسه فرم‌های تخت و چندوجهی	اثر فرم و هندسه پوسته
Kalogirou et al., 2014 Maturi & Adami, 2018	عدم تهویه مناسب پشت پنل می‌تواند موجب افزایش دمای پوسته و تشدید بار سرمایشی شود؛ پوسته‌های تهویه‌شونده عملکرد حرارتی بهتری دارند	دمای سطح داخلی پوسته، شار حرارتی عبوری، تأثیر بر بار سرمایش و گرمایش	عملکرد حرارتی پوسته

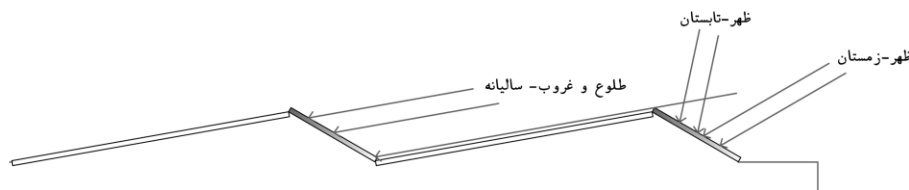
جنبه ارزیابی	شاخص‌های متداول ارزیابی	ملاحظات در BIPV	منابع
روشنایی روز و آسایش بصری	سطح روشنایی داخلی، توزیع نور طبیعی، خیرگی (Glare)، کیفیت دید	طراحی نادرست BIPV می‌تواند موجب افت نور طبیعی و افزایش خیرگی شود؛ طراحی اقلیم‌محور امکان کنترل هم‌زمان نور و انرژی را فراهم می‌کند	Thomas & Fordham, 2003 Toledo et al., 2016 منصوری و موسوی، ۱۳۹۸
ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی	تحلیل چرخه عمر (LCA)، کاهش انتشار CO ₂ ، دوره بازگشت سرمایه، هزینه چرخه عمر (LCC)	هزینه اولیه بالاتر BIPV می‌تواند با حذف مصالح پوسته، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر سیستم جبران شود؛ نتایج LCA وابسته به بستر اقلیمی است	Kylili & Fokaides, 2015 غفوریان و احمدنژاد، ۱۴۰۴

۶- راهبردهای طراحی پوسته در اقلیم معتدل و مرطوب خزری

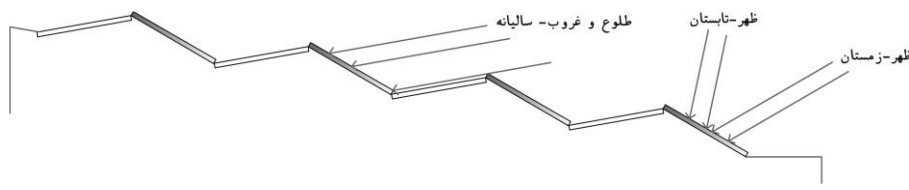
اقلیم معتدل و مرطوب خزری، موفقیت عملکردی سیستم‌های BIPV بیش از آنکه صرفاً به ارتقای فناوری پنل‌های فتوولتائیک وابسته باشد، به راهبردهای طراحی پوسته، کیفیت جزئیات اجرایی، و نحوه تعامل حرارتی-رطوبتی پوسته با محیط پیرامون وابسته است. (Frontini et al., 2015) از این رو، طراحی پوسته در این اقلیم مستلزم رویکردی یکپارچه است که هم‌زمان تولید انرژی، دوام مصالح، کنترل رطوبت و پاسخ‌گویی اقلیمی را در چارچوبی منسجم مورد توجه قرار دهد.



شکل ۲. نورگیر یکپارچه با پنل‌های فتوولتائیک با زاویه شیب. (وفایی، ۱۳۹۱)



شکل ۳. راهکار جلوگیری از سایه اندازی پنل‌های فتوولتائیک یکپارچه با نورگیر. (وفایی، ۱۳۹۱)



شکل ۴. قرارگیری نورگیر یکپارچه با پنل‌های فتوولتائیک روی شیب. (وفایی، ۱۳۹۱)

۶-۱- طراحی نماهای سازگار با رطوبت بالا

نما در اقلیم خزری به‌طور پیوسته در معرض بارش‌های مایل، بخار آب و رطوبت ماندگار قرار دارد. مرور ادبیات نشان می‌دهد که نصب مستقیم پنل‌های فتوولتائیک بر روی جدارهای ساختمانی، بدون پیش‌بینی لایه‌های واسط و سازوکارهای تهویه مناسب، می‌تواند منجر به تجمع رطوبت، افت راندمان الکتریکی و کاهش دوام بلندمدت سیستم شود (Thomas & Fordham, 2003). در پاسخ به این چالش، استفاده از نماهای فاصله‌دار، پوسته‌های چندلایه و نماهای تهویه‌شونده (Ventilated Facades) به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی طراحی BIPV در اقلیم‌های مرطوب مطرح شده است. (Reijenga, 2012)

Kaan,212)

ایجاد فاصله هوایی کنترل شده میان پنل فتوولتائیک و لایه پستی پوسته، علاوه بر تسهیل تخلیه رطوبت، امکان خنک‌سازی طبیعی پنل‌ها را فراهم کرده و به بهبود عملکرد الکتریکی آن‌ها می‌انجامد. در مطالعات داخلی نیز تأکید شده است که در سیستم‌های BIPV نمایی، یکپارچگی پنل‌ها با پوسته باید به گونه‌ای تعریف شود که رفتار اقلیمی نما بخشی از منطق عملکرد انرژی ساختمان تلقی گردد، نه صرفاً بستری برای استقرار تجهیزات فتوولتائیک (غفوریان و احمدنژاد، ۱۴۰۴).

۶-۲- طراحی بام و سایبان‌های فتوولتائیک

بام به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین اجزای پوسته برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های BIPV شناخته می‌شود؛ با این حال، در اقلیم معتدل و مرطوب، بام‌های تخت با شیب ناکافی، به دلیل تجمع آب و افزایش رطوبت سطحی، می‌توانند عملکرد و دوام سیستم را با چالش مواجه سازند. (Frontini et al., 2015) پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بام‌های شیب‌دار، چندشیبه یا تاخورد، علاوه بر بهبود دریافت تابش خورشیدی، امکان هدایت مؤثر آب باران، کاهش تنش‌های رطوبتی و حفاظت بهتر از اتصالات الکتریکی را فراهم می‌کنند. (Maturi & Adami, 2018) در این میان، سایبان‌های فتوولتائیک به‌عنوان عناصر ترکیبی پوسته، ظرفیت ایفای نقش هم‌زمان در تولید انرژی، کنترل تابش مستقیم و حفاظت از جداره‌ها را دارند. (Thomas & Fordham, 2003) یافته‌ها نشان می‌دهد که سایبان‌های BIPV، در مقایسه با سیستم‌های الحاقی، توازن بهتری میان عملکرد انرژی، کیفیت فضایی و بیان معماری ایجاد می‌کنند؛ ویژگی‌ای که در اقلیم‌های مرطوب و ابری از اهمیت مضاعفی برخوردار است. (Toledo et al., 2016)

۶-۳- تهویه پشت پنل‌ها و مدیریت حرارتی پوسته

یکی از چالش‌های اساسی سیستم‌های BIPV در اقلیم‌های مرطوب، افزایش دمای عملکردی پنل‌ها به دلیل محدودیت در تبادل حرارتی مؤثر است. افزایش دمای سلول‌های فتوولتائیک به‌طور مستقیم موجب افت راندمان الکتریکی می‌شود. مطالعات تجربی نشان می‌دهند که جریان هوای کنترل شده در پشت پنل‌های یکپارچه می‌تواند کاهش دمای معناداری ایجاد کرده و در نتیجه بازده الکتریکی سیستم را بهبود بخشد. (Sick & Erge, 1996) استفاده از نماهای دوپوسته فتوولتائیک، پوسته‌های تهویه‌شونده و پنل‌های مایل با فاصله مناسب از لایه عایق، به‌عنوان راهبردهای مؤثر مدیریت حرارتی مطرح شده‌اند (Reijenga & Kaan, 2012). افزون بر این، پژوهش‌های مرتبط با نماهای تطبیقی و نیمه‌فعال نشان می‌دهد که سیستم‌های متحرک یا قابل تنظیم، امکان انطباق بهتر پوسته با شرایط متغیر تابش و رطوبت را فراهم کرده و می‌توانند عملکرد انرژی را در مقیاس سالانه بهینه سازند. (Nagy et al., 2015)

۶-۴- ملاحظات دوام، خوردگی و نگهداری سیستم‌ها

در اقلیم خزری، دوام و نگهداری سیستم‌های BIPV نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت بلندمدت آن‌ها ایفا می‌کند. رطوبت مداوم، بارندگی‌های شدید و آلودگی‌های زیستی می‌توانند خطر خوردگی اتصالات فلزی، فرسایش لایه‌های محافظ و افت تدریجی عملکرد الکتریکی را افزایش دهند. گزارش‌های فنی تأکید می‌کنند که انتخاب مصالح مقاوم در برابر رطوبت، طراحی جزئیات اجرایی قابل دسترس برای تعمیر و نگهداری، و پیش‌بینی مسیرهای مؤثر تخلیه آب و تهویه، از الزامات اساسی طراحی پوسته‌های BIPV در اقلیم‌های مرطوب است. (Frontini et al., 2015) مطالعات اخیر همچنین نشان می‌دهند که در سیستم‌های BIPV، فناوری فتوولتائیک باید به‌عنوان بخشی از چرخه عمر پوسته ساختمان در نظر گرفته شود و ملاحظات مربوط به دوام، نگهداری و جایگزینی، از مراحل اولیه طراحی معماری لحاظ گردد (غفوریان و احمدنژاد، ۱۴۰۴).

جدول ۴. راهبردهای طراحی پوسته BIPV در اقلیم معتدل و مرطوب خزری و پیامدهای عملکردی آن‌ها - (نگارندان)

منابع	پیامد عملکردی	راهبرد طراحی BIPV	چالش طراحی پوسته	ویژگی اقلیمی غالب
Reijenga & Kaan, 2012	افزایش دوام، بهبود راندمان	نماهای تهویه‌شونده، فاصله هوایی	تجمع رطوبت و خوردگی	رطوبت بالا و بارندگی مداوم
Nagy et al., 2015	افزایش جذب تابش منتشر	فرم‌های شکسته، چندوجهی	کاهش تابش مستقیم	پوشش ابری گسترده
Sick & Erge, 1996	کاهش افت راندمان	تهویه پشت پنل، دوپوسته	افزایش دمای پنل	دمای متوسط و

رطوبت بالا				
بارندگی شدید	آسیب اتصالات	بام‌های شیب‌دار، سایبان BIPV	افزایش دوام سیستم	Maturi & Adami, 2018

۷- چالش‌ها و محدودیت‌های سیستم‌های BIPV در اقلیم خزری

با وجود پتانسیل قابل توجه سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته ساختمان (BIPV) در ارتقای پایداری انرژی، به کارگیری مؤثر این سیستم‌ها در اقلیم معتدل و مرطوب خزری با مجموعه‌ای از محدودیت‌ها و چالش‌ها مواجه است. بررسی این محدودیت‌ها و چالش‌ها، گامی ضروری برای طراحی واقع‌بینانه و موفق BIPV در این منطقه محسوب می‌شود.

۷-۱- محدودیت‌های اقلیمی: رطوبت، ابرناکی و بارندگی

یکی از مهم‌ترین موانع پیش روی BIPV در اقلیم خزری، غالب بودن تابش منتشر نسبت به تابش مستقیم خورشید است. پوشش ابری گسترده، مه‌گرفتگی‌های فصلی و بارندگی‌های متناوب، سهم تابش مستقیم را کاهش داده و شدت تابش خورشیدی را به شکل نوسانی تغییر می‌دهد. این شرایط باعث کاهش بازده سیستم‌های فتوولتائیک متعارف می‌شود. در چنین بستر اقلیمی، راهبردهای طراحی کلاسیک مبتنی بر جهت‌گیری جنوبی و زاویه بهینه ثابت که برای اقلیم‌های خشک و آفتابی توسعه یافته‌اند، کارایی محدودی دارند. (Kalogirou, 2014; Skoplaki & Palyvos, 2009). رطوبت نسبی بالا نیز یکی از ویژگی‌های شاخص اقلیم خزری است که می‌تواند فرایند خوردگی اجزای فلزی، کاهش دوام اتصالات الکتریکی و افت تدریجی عملکرد پنل‌ها را تسریع کند. (Frontini et al., 2015; Köntges et al., 2020). بارندگی شدید و مداوم، به‌ویژه در صورتی که شیب بام، درزها و جزئیات اتصال به‌درستی طراحی نشده باشند، می‌تواند باعث تجمع آب، نفوذ رطوبت به لایه‌های پوسته و کاهش طول عمر سیستم BIPV شود. (Jelle et al., 2012).

۷-۲- چالش‌های فنی و اجرایی

مدیریت حرارتی ماژول‌ها، یکی از کلیدی‌ترین چالش‌های فنی BIPV در اقلیم‌های مرطوب است. افزایش دمای عملکردی پنل‌ها، به‌ویژه در سیستم‌های یکپارچه فاقد تهویه مناسب پشت ماژول، موجب کاهش راندمان الکتریکی و تسریع فرسودگی اجزای سیستم می‌شود. (Kalogirou, 2014). ترکیب رطوبت بالا و تهویه ناکافی در اقلیم خزری، این مشکل را تشدید می‌کند و نیاز به راهکارهایی مانند پوسته‌های دوپوسته، فاصله تهویه‌ای و جزئیات اجرایی هوشمند را پررنگ‌تر می‌سازد. پیچیدگی جزئیات اجرایی سیستم‌های BIPV نسبت به سیستم‌های فتوولتائیک الحاقی (BAPV) نیز از دیگر چالش‌هاست. یکپارچه‌سازی پنل‌ها با پوسته ساختمان نیازمند هماهنگی دقیق میان معمار، مهندس سازه و مهندس تأسیسات الکتریکی است، امری که در بسیاری از پروژه‌ها به‌ویژه در بسترهای اجرایی متداول، به‌طور کامل محقق نمی‌شود. (وفایی، ۱۳۸۸). بی‌توجهی به این هماهنگی می‌تواند به مشکلاتی مانند نشی آب، ایجاد پل‌های حرارتی و اختلال در عملکرد سازه‌ای یا الکتریکی منجر شود. همچنین در معماری معاصر، تعارض میان الزامات زیبایی‌شناختی نما و محدودیت‌های فنی پنل‌ها—مانند ابعاد ماژول، الگوی سلول‌ها و محدودیت‌های نصب—یکی از موانع اصلی گسترش BIPV محسوب می‌شود. (Peng et al., 2019).

۷-۳- چالش‌های بهره‌برداری و نگهداری بلندمدت

در مرحله بهره‌برداری، شرایط خاص اقلیم خزری مشکلات قابل توجهی را برای نگهداری سیستم‌های BIPV ایجاد می‌کند. آلودگی سطح پنل‌ها، رسوب رطوبت، رشد جلبک‌ها و تجمع ذرات زیستی می‌تواند دریافت تابش خورشیدی را کاهش داده و عملکرد سیستم را به‌ویژه در نماهای عمودی و سطوح کم‌شیب تضعیف کند. (Toledo et al., 2016; Kimber et al., 2006). همچنین، دسترسی دشوار به پنل‌های یکپارچه‌شده با نما، فرآیندهای نظافت، پایش و تعمیرات دوره‌ای را پیچیده و پرهزینه می‌سازد و در بلندمدت می‌تواند توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم‌های BIPV را تحت تأثیر منفی قرار دهد. اگرچه نبود قطعات متحرک یکی از مزایای ذاتی سیستم‌های فتوولتائیک است، فرسودگی تدریجی ناشی از رطوبت، خوردگی و کاهش کیفیت اتصالات، همچنان عامل تعیین‌کننده‌ای در کاهش طول عمر مؤثر این سیستم‌ها به شمار می‌رود. (Köntges et al., 2020).

۸- نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف مرور نظام‌مند ادبیات مرتبط با سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با پوسته معماری (BIPV) و با تمرکز ویژه بر اقلیم معتدل و مرطوب خزری، راهبردهای فرم‌محور و طراحی پوسته را مورد تحلیل قرار داد. نتایج این مرور نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از پژوهش‌های پیشین BIPV بر مبنای فرض‌های اقلیمی مناطق خشک و آفتابی توسعه یافته‌اند و تعمیم مستقیم آن‌ها به اقلیم‌های مرطوب، به‌ویژه اقلیم خزری، با محدودیت‌های عملکردی، اجرایی و نگهداری مواجه است. یافته‌ها حاکی از آن است که در اقلیم خزری، غلبه تابش منتشر، رطوبت نسبی بالا، بارندگی‌های مکرر و الزامات نگهداری بلندمدت، نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی سامانه‌های BIPV ایفا می‌کنند. در چنین شرایطی، تمرکز صرف بر حداکثرسازی تابش مستقیم یا استفاده از الگوهای متعارف نصب پنل‌ها—که عمدتاً در سیستم‌های BAPV رایج‌اند—پاسخگوی نیازهای انرژی، اقلیمی و معماری نیست. در مقابل، رویکرد فرم‌محور شامل هندسه پوسته، جهت‌گیری و شکست سطوح، یکپارچگی سایه‌اندازهای فتوولتائیک و آرایش‌های سه‌بعدی پنل‌ها، به‌عنوان راهبردی مؤثر برای افزایش جذب تابش منتشر، بهبود تهویه طبیعی پنل‌ها و کاهش افت عملکرد ناشی از رطوبت شناسایی شد.

بررسی مطالعات تحلیلی و نمونه‌های موردی نشان می‌دهد که بیشینه‌سازی عملکرد BIPV زمانی محقق می‌شود که این سیستم از مراحل اولیه طراحی معماری، به‌عنوان بخشی از منطق شکل‌گیری فرم و پوسته ساختمان در نظر گرفته شود، نه به‌عنوان یک فناوری الحاقی. چنین یکپارچگی‌ای—در سطوح کالبدی، عملکردی و زیباشناختی—علاوه بر بهبود تولید انرژی، می‌تواند به ارتقای عملکرد حرارتی پوسته، کنترل تابش، کیفیت بصری نما و پایداری زیست‌محیطی ساختمان منجر شود.

همچنین نتایج این مرور نشان می‌دهد که در اقلیم‌های مرطوب، شاخص‌هایی نظیر دوام مصالح، الزامات نگهداری، تهویه پشت پنل‌ها و رفتار حرارتی-رطوبتی پوسته، به اندازه شاخص‌های صرفاً انرژی‌محور اهمیت دارند. این موضوع ضرورت اتخاذ رویکردی چندمعیاره و بین‌رشته‌ای—در تقاطع معماری، اقلیم، انرژی و فناوری ساخت—را در طراحی و ارزیابی سیستم‌های BIPV برجسته می‌سازد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که بازتعریف BIPV از یک فناوری صرف تولید انرژی به یک راهبرد فرم‌محور و پوسته‌محور معماری، کلید موفقیت آن در اقلیم خزری است. این بازتعریف نه‌تنها امکان انطباق مؤثرتر با شرایط اقلیمی خاص منطقه را فراهم می‌کند، بلکه زمینه‌ساز توسعه پوسته‌های هوشمند، پاسخ‌گو و پایدار در معماری معاصر ایران خواهد بود. یافته‌های این مقاله می‌تواند به‌عنوان چارچوبی مفهومی برای معماران، طراحان پوسته و پژوهشگران حوزه BIPV در اقلیم‌های معتدل و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به نتایج این مرور، پژوهش‌های آینده می‌توانند بر توسعه و ارزیابی مدل‌های طراحی فرم‌محور BIPV مبتنی بر تابش منتشر، رفتار حرارتی-رطوبتی پوسته و راهبردهای تهویه تطبیقی در اقلیم‌های معتدل و مرطوب تمرکز یابند. همچنین، انجام مطالعات شبیه‌سازی پارامتریک و تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های میدانی بلندمدت می‌تواند به اعتبارسنجی عملکرد واقعی این سیستم‌ها در مقیاس معماری و شهری کمک کند. بررسی تعامل BIPV با پوسته‌های هوشمند و سامانه‌های کنترلی تطبیقی، به‌عنوان گامی مکمل، مسیرهای جدیدی برای ارتقای پایداری و انعطاف‌پذیری معماری در اقلیم خزری فراهم خواهد ساخت.

منابع

- عباسی، م.، احمدنژاد، ر. و همکاران. (۱۳۹۴). طراحی پوسته پاسخ‌گوی اقلیم در معماری پایدار. تهران: نشر دانشگاهی.
- بروزی، ف.، غفوریان، م. و همکاران (۱۳۹۹). راهبردهای فرم و طراحی پوسته در سیستم‌های BIPV. مجله معماری و انرژی، ۱۲(۳)، ۴۵-۶۲.
- غفوریان، م. و احمدنژاد، ر. (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد انرژی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان. مجله فناوری‌های سبز، ۶(۲)، ۳۹-۲۱.
- منصوری، س. و موسوی، ع. (۱۳۹۸). روش‌نمایی روز و طراحی نما در سیستم‌های BIPV. فصلنامه پژوهش‌های معماری، ۱۰(۱)، ۵۰-۳۳.
- وفایی، و. (۱۳۸۸). سیستم‌های فتوولتائیک در پوسته ساختمان: طراحی و اجرا. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت.
- وفایی، م. (۱۳۹۱). یکپارچگی معماری و فنی در سیستم‌های BIPV. مجله ساختمان‌های پایدار، ۵(۲)، ۲۸-۱۵.
- یوردشاهی، ع. و همکاران. (۱۴۰۲). راهبردهای اقلیم‌محور BIPV در نواحی معتدل و مرطوب ایران. مجله معماری پایدار، ۱۸(۱)، ۷۴-۵۵.
- وفایی، راحیل. (۱۳۸۸). بررسی شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان. نشریه صفه، هنر و معماری، دوره هجدهم، شماره ۳ و ۴، ۶۹۰-۸۰.

- ۹) راحیل وفایی. (۱۳۹۱). طراحی ساختمان های یکپارچه با فتوولتائیک در شهر تهران، نشریه صفه، دوره بیست و دوم - شماره ۱. ۷۴-۵۷.
- ۱۰) غفوریان، نگین؛ احمدنژاد، فرهاد. (۱۴۰۴) تحلیل و مقایسه سیستم های فتوولتائیک اعمال شده بر روی ساختمان (BAPV) و سیستم های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان (BIPV)، نشریه معماری سبز، ۴۶. ۱۳۳-۱۵۰.
- 11) Biyik, E., Toledo, S., & Reijenga, T. (2017). Integration of photovoltaic systems in building envelopes: A review. *Renewable Energy*, 102, 510–523.
 - 12) Brito, M. C., Gonçalves, H., & Montazeri, H. (2017). PV performance under diffuse radiation in humid climates. *Solar Energy*, 156, 657–667.
 - 13) Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1980). *Solar engineering of thermal processes* (2nd ed.). New York, NY: Wiley.
 - 14) Frontini, F., Maturi, D., & Adami, D. (2015). Energy and thermal performance of BIPV facades. *Energy and Buildings*, 92, 103–115.
 - 15) Gonçalves, H., Brito, M., & Kalogirou, S. (2018). Architectural integration and BIPV optimization in humid climates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2561–2574.
 - 16) Kalogirou, S., Maturi, D., & Adami, D. (2014). Thermal behavior of ventilated BIPV facades in moderate climates. *Applied Energy*, 134, 1–12.
 - 17) Kurtz, S., et al. (2011). Photovoltaic technology improvement and performance analysis. *Progress in Photovoltaics*, 19(7), 837–843.
 - 18) Loonen, R. (2010). Energy performance of building facades and integration of PV. *Journal of Facade Design*, 2(1), 25–40.
 - 19) Maturi, D., & Adami, D. (2018). Influence of BIPV integration on building energy demand. *Energy Reports*, 4, 345–358.
 - 20) Nagy, Z., et al. (2015). Diffuse solar radiation harvesting with complex façade geometry. *Solar Energy*, 118, 46–59.
 - 21) Osseweijer, P., Reijenga, T., & Kaan, H. (2018). Advances in BIPV technologies: Efficiency and integration. *Renewable Energy*, 123, 567–579.
 - 22) Prasad, D., & Snow, T. (2005). Building-integrated photovoltaics: Architectural and energy considerations. *Energy and Buildings*, 37(8), 758–769.
 - 23) Reijenga, T., & Kaan, H. (2012). BIPV performance in temperate humid climates. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 105, 222–230.
 - 24) Sick, F., & Erge, T. (1996). BIPV: Design, performance, and applications. *Solar Energy*, 57(1), 1–10.
 - 25) Thomas, R., & Fordham, J. (2003). Daylighting and semi-transparent BIPV systems. *Building and Environment*, 38(5), 647–656.
 - 26) Toledo, S., Biyik, E., & Gonçalves, H. (2016). Comparative study of BIPV and BAPV systems. *Renewable Energy*, 87, 105–115.
 - 27) Wu, Y., et al. (2015). Urban integration of BIPV systems. *Energy Procedia*, 78, 300–305.

