تاثیر صفحات فتوولتاییک تلفیق شونده با نمای ساختمان در بهبود مصرف انرژی ساختمان

مریم لطیفی*: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
Maryam.Latifi.mm@gmail.com
علی علایی: عضو هیئت علمی آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
alia.archi@gmail.com

چکیده

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کاهش مشکلات ناشی از استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر باشد. منابع انرژی تجدیدناپذیر محدود هستند و آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی را به جا می‌گذارند. از طرفی، منابع انرژی تجدیدپذیر پاک هستند و استفاده از آنها مزایای فراوانی به همراه دارد. انرژی خورشیدی یکی از منابع تجدیدپذیر است که استفاده از آن در ساختمان مزایای فراوانی را می‌تواند به همراه داشته باشد. صفحات فتوولتاییک یکی از تکنولوژی‌هایی است که انرژی خورشیدی را جذب و الکتریسیته تولید می‌کند. این صفحات به شکل‌های مختلفی در ساختمان استفاده می‌شوند و حتی می‌توانند با پنجره‌های ساختمان ترکیب شوند. صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان نوعی از صفحات فتوولتاییک است که با نمای ساختمان ترکیب شده و هم‌زمان می‌تواند الکتریسیته تولید کند و دید به بیرون مناسبی را نیز فراهم کند. این تحقیق به بررسی تاثیر استفاده از صفحات فتوولتاییک در پنجره ساختمان‌ها می‌پردازد که در منابع علمی با نام صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان‌ها شناخته می‌شوند. این تحقیق تلاش می‌کند به این سئوال پاسخ دهد که تاثیر استفاده از این صفحات بر مصرف انرژی ساختمان‌ها چگونه است؟ در ابتدا، عوامل موثر بر عملکرد این صفحات شرح داده می‌شود. سپس، برخی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه صفحات فتوولتاییک یکپارچه با نمای ساختمان ذکر می‌شود. این تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از این صفحات در ساختمان‌های با کاربری‌های مختلف می‌تواند در کاهش مصرف انرژی موثر واقع شود. میزان کاهش مصرف انرژی در هر تحقیق به تفکیک بیان می‌شود و هزینه‌های ناشی از استفاده از این صفحات نیز با توجه به تحقیقات پیشین بررسی می‌شود. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که این صفحات علاوه بر قابلیت کاهش مصرف انرژی از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه هستند.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، بهبود مصرف انرژی ساختمان، صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان، منابع انرژی تجدیدپذیر

*نویسنده مسئول

۱- مقدمه

امروزه، بخش ساختمان حدود ۴۰ درصد از مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. سوخت‌های فسیلی همچون نفت و گاز منابع انرژی تجدیدناپذیری هستند که مصرف بی رویه آنها می‌تواند مشکلات فراوانی را به دنبال داشته باشد. با توجه به اینکه این منابع همیشگی نیستند توجه به منابع تجدیدپذیر اهمیت فراوانی دارد. در چند سال اخیر، تحقیقات فراوانی تلاش کرده‌اند تا با استفاده از راه‌حل‌های مختلفی نقش منابع تجدیدناپذیر همچون نفت و گاز را تا حد ممکن کم کنند. این تحقیقات با معرفی سیستم‌های هوشمند و جدید توسط دانشمندان حوزه انرژی به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک کرده‌اند. به عنوان مثال، دانشمندان بسیاری در حوزه انرژی و کاربرد آن در ساختمان تحقیقات مختلفی انجام داده‌اند و هرکدام راه‌حل خاصی پیشنهاد کرده‌اند. در بخش ساختمان، دانشمندان مختلفی در کشورهای مختلف دنیا تلاش کرده‌اند بهترین راه‌حل‌ها را برای کاهش مصرف انرژی پیشنهاد دهند. یکی از راه‌حل‌های بسیار مفید و کاربردی توجه به انرژی خورشید است. انرژی خورشیدی جز منابع انرژی تجدیدپذیر دسته‌بندی می‌شود و استفاده از آن در ساختمان می‌تواند در کاهش مصرف انرژی ساختمان موثر واقع شود.

انرژی خورشیدی می‌تواند به شکل‌های مختلفی در ساختمان استفاده شود. در گذشته، استفاده از انرژی خورشیدی در ساختمان به شکل‌های مختلفی انجام می‌شد. از جمله کاربردهای انرژی خورشیدی در معماری سنتی در پنجره‌های رو به جنوب، نورگیرهای سقفی در بخش‌های مختلف ساختمان، فضای گلخانه برای جذب مستقیم انرژی خورشیدی و اتاق ارسی برای استفاده بهینه از انرژی خورشیدی اشاره کرد. پس از انقلاب صنعتی و پیدایش مدرنیته در معماری، صنعت ساختمان دچار تحولات مختلفی شد. شاید اولین استفاده‌ها از انرژی خورشیدی در قالب مدرن در تاریخ معماری پس از دوران انقلاب صنعتی را بتوان ساختمان کریستال پالاس دانست. این ساختمان که از شیشه ساخته شده بود، گلخانه‌ای در مقیاس بزرگ بود و تداعی همان گلخانه‌های قدیمی را در شکلی تازه ارائه کرد و در تاریخ معماری مدرن از اهمیت فراوانی برخوردار است. با توجه به این نمونه‌ها، می‌توانیم نتیجه بگیریم که استفاده از انرژی خورشیدی دیرینه زیادی در معماری ایران و جهان دارد. یکی از نمونه‌های نوین استفاده از انرژی خورشیدی صفحات فتوولتاییک است که در اواسط قرن بیستم استفاده از این تکنولوژی مورد توجه قرار گرفت. با توسعه دانش بشر و مطالعات فراوان پژوهشگران در مورد این صفحات به تدریج هزینه تولید و استفاده از این صفحات کمتر شد و بازدهی آنها نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافت. همچنین، این صفحات در شکل‌های مختلفی و در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این تحقیق در تلاش است تا به بررسی صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان و تاثیر آن در ساختمان‌ها با کاربری‌های مختلف است. با توجه به تمام توضیحات ارائه شده، سئوالات تحقیق را می‌توان مطرح کرد:

۱. استفاده از صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان تا چه حد می‌تواند بر مصرف انرژی ساختمان‌ها تاثیرگذار باشد؟ ۲. هزینه استفاده از این صفحات تا چه میزان بر استفاده از آنها تاثیرگذار است؟

روش تحقیق مبتنی بر استفاده از منابع اخیر بین‌المللی معتبر و استخراج کلیدواژه‌های مهم و بیان تاثیر هر پارامتر است. ابتدا، تعریفی جامع از صفحات فتوولتاییک ارائه شده است. سپس، نوع خاصی از صفحات فتوولتاییک که در این پژوهش بررسی شده است معرفی خواهد شد. در این گام، ساختار کلی صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان معرفی می‌شود. سپس، با استفاده از کلیدواژه‌های استخراج شده به بررسی تاثیر هر پارامتر بر مصرف انرژی ساختمان‌های مختلف پرداخته می‌شود. در این گام، از جدیدترین منابع روز در زمینه صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان استفاده شده است و نتایج تاثیر هر پارامتر بیان شده است. در پایان، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از نتایج تحقیقات بیان می‌شود و به سئوالات تحقیق پاسخ داده خواهد شد.

۲- پیشینه تحقیق

تاثیر کاربرد صفحات فتوولتاییک یکپارچه با نما و صفحات فتوولتاییک بر روی بام و جداره‌های ساختمان در تحقیقی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات پژوهشگران نشان می‌دهد که بر خلاف تصور اشتباه در خصوص هزینه‌های ناشی از نصب و هم‌چنین مشکلات بصری، استفاده از این صفحات می‌تواند مزایای بسیاری داشته باشد (Aguacil et al., 2019).

تاثیر استفاده از صفحات فتوولتاییک یکپارچه با نما در بهبود بار سرمایشی ساختمان‌های اداری شارجه امارات در تحقیقی بررسی شده است. این تحقیق به منظور مشخص کردن میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های استفاده از چنین سیستمی در اقلیم گرم شارجه انجام شده و نتایج آن نشان می‌دهد که استفاده از این صفحات می‌تواند ۲۷/۷ درصد از بار سرمایشی ساختمان اداری مورد نظر را کاهش دهد (Salameh et al., 2020).

تاثیر صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان بر بهبود مصرف انرژی ساختمانی در تهران بررسی شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که این صفحات می‌توانند تا ۲۰٪ در مصرف ماهانه انرژی الکتریکی صرفه‌جویی کنند. حتی در ماه‌هایی خاص، این صفحات می‌توانند تا ۵۲٪ نیاز انرژی الکتریکی ساختمان را تامین کنند (Hoseinzadeh et al., 2021).

در تحقیقی دیگر، تاثیر صفحات فتوولتاییک بر مصرف انرژی اتاقی اداری در هنگ کنگ بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از این صفحات می‌تواند بار سرمایشی را تا ۱۴/۲۰٪ در جبهه جنوبی کاهش دهد (Qiu et al., 2019).

همچنین، استفاده از صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان در ساختمان‌های مختلف شهر سئول و تاثیر آنها بر مصرف انرژی ساختمان‌ها موضوع تحقیقی بوده است. در این تحقیق، ۱۷ ساختمان مختلف در شهر سئول بررسی شدند و نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان می‌تواند بین ٪۳۴-۳۲ بار سرمایشی این ساختمان‌ها را کاهش دهد (Yoo, 2019).

در پژوهشی دیگر، پژوهشگران نشان دادند که صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان می‌توانند در کاهش مصرف انرژی ساختمان موثر واقع شوند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که این صفحات مصرف انرژی ساختمان‌های اداری را در سه اقلیم مختلف استرالیا کاهش داده‌اند. نکته جالب تحقیق آنها این است که میزان ذخیره انرژی در این سه اقلیم با استفاده از صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان به ترتیب ٪۳۴/۱، ۸۶٪ و ۱۰۶٪ اندازه‌گیری شده است. این نشان می‌دهد که در برخی ساختمان و در اقلیم‌های خاص، استفاده از این صفحات حتی می‌تواند ساختمان را به یک ساختمان صفر انرژی تبدیل کند (Yang et al., 2020). جدول ۱ خلاصه پژوهش‌هایی که در این بخش ذکر شد را نشان می‌دهند. با توجه به جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از صفحات فتوولتاییک در ساختمان‌های با کاربری‌های مختلف مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.

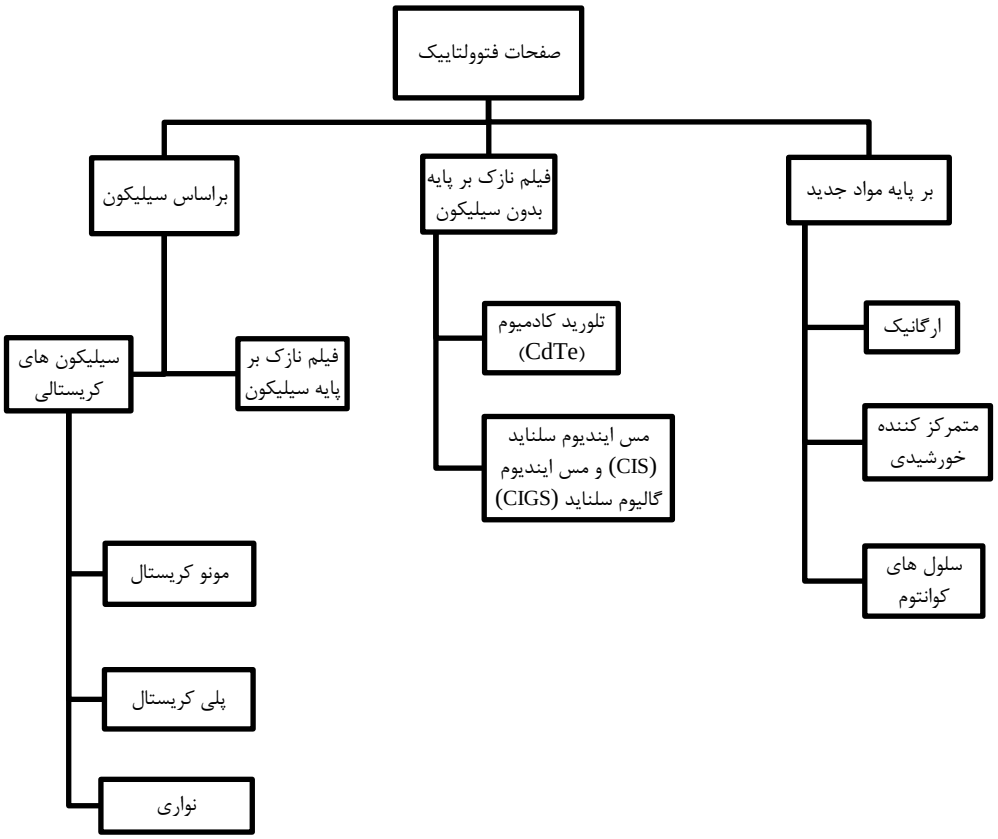
جدول ۱- خلاصه پژوهش‌های بیان شده در خصوص صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان (مأخذ: نگارندگان).

ردیف	منبع پژوهش	میزان ذخیره انرژی
۱	(Salameh et al., 2020)	کاهش ٪۲۷٫۷ از بار سرمایشی ساختمان
۲	(Hoseinzadeh et al., 2021)	تا ٪۲۰ کاهش در مصرف ماهانه انرژی الکتریکی ساختمان
۳	(Qiu et al., 2019)	کاهش بار سرمایشی تا ٪۱۴٫۲۰
۴	(Yoo, 2019)	کاهش بار سرمایشی بین ٪۳۴-۳۲
۵	(Yang et al., 2020)	کاهش مصرف انرژی ساختمان در سه اقلیم مختلف بین ٪ ۱۰۶-۳۴٫۱

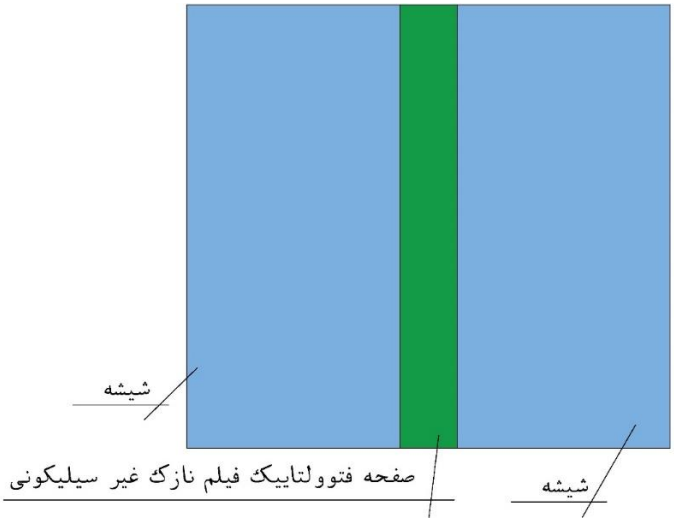
این تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از این صفحات در نمای ساختمان‌ها موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود. این تحقیقات علاوه بر مصرف انرژی، هزینه استفاده از این صفحات را نیز تحلیل کرده‌اند و همه آنها به اهمیت استفاده از این صفحات که بازدهی بهتری نسبت به نسل اول صفحات فتوولتاییک دارند اشاره کرده‌اند.

۳- مبانی نظری

صفحات فتوولتاییک مبتنی بر سیلیکون نخستین نسل از صفحات فتوولتاییک هستند (Skandalos & Karamanis, 2015). نسل اول صفحات فتوولتاییک بازدهی کمی دارند و سابقه طولانی‌تری نسبت به نسل‌های آینده صفحات فتوولتاییک دارند (Hernández-Callejo et al., 2019; Skandalos & Karamanis, 2015). نسل دوم این صفحات، فیلم‌های نازکی هستند که مبتنی بر سیلیکون نیستند و نسبت به صفحات فتوولتاییک مبتنی بر سیلیکون بازدهی بیشتری دارند (Zhang et al., 2018). در پژوهش‌های بعدی توسط پژوهشگران نسل دیگری از این صفحات با مواد متفاوتی معرفی شدند که حتی از مواد ارگانیک به جای سیلیکون استفاده شد که سازگاری این صفحات با محیط زیست را بالاتر می‌برد (Petter Jelle et al., 2012). شکل ۱ دسته‌بندی کلی از صفحات فتوولتاییک را نشان می‌دهد. این تحقیق بر نسل دوم صفحات فتوولتاییک تمرکز می‌کند و در تلاش است تا با استفاده از تحقیقات پیشین صورت گرفته در زمینه صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان تاثیر استفاده از این صفحات را در بهبود مصرف انرژی ساختمان مشخص کند.



شکل ۱- دسته‌بندی مصالح رایج صفحات فتوولتاییک (Petter Jelle et al., 2012).



شکل ۲- ساختار کلی صفحات فتوولتاییک در یک شیشه ساختمانی (Skandalos & Karamanis, 2015).

شکل ۲ نشان می‌دهد که لایه نازک صفحات فتوولتاییک در بین دو لایه نازک شیشه احاطه شده است. بدین ترتیب، در یک پنجره چند جداره می‌توان صفحات فتوولتاییک را در یکی از شیشه‌ها قرار داد که البته باید از قبل در کارخانه این کار انجام شده باشد. صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان به‌عنوان راه‌حلی مناسب برای افزایش نقش منابع انرژی تجدیدپذیر در ساختمان محسوب می‌شوند (Goncalves et al., 2020). این صفحات قادر هستند با نمای ساختمان ترکیب شوند و مصرف انرژی ساختمان را هم در بخش الکتریکی و حتی سرمایشی کاهش دهند (Salameh et al., 2020). شکل ۳ نمونه‌ای از استفاده از این صفحات را در نمای یک ساختمان اداری نشان می‌دهد. عوامل مختلفی بر عملکرد این صفحات موثر هستند که در اینجا به آنها اشاره می‌شود.

شکل ۳- صفحات فتوولتاییک در نمای یک ساختمان اداری (Lee et al., 2017).

۴- یافته‌ها

۴-۱- عوامل موثر بر کارآیی صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان

با مروری بر پیشینه‌ی پژوهش در خصوص صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان می‌توان پارامترهای مختلف تاثیرگذار را شناسایی کرد. جدول ۲ عوامل موثر بر عملکرد صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان را نشان می‌دهد. جدول ۲ نشان می‌دهد که چهار عامل مهم بر عملکرد این صفحات تاثیرگذار هستند.

جدول ۲- پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان (مأخذ: نگارندگان).

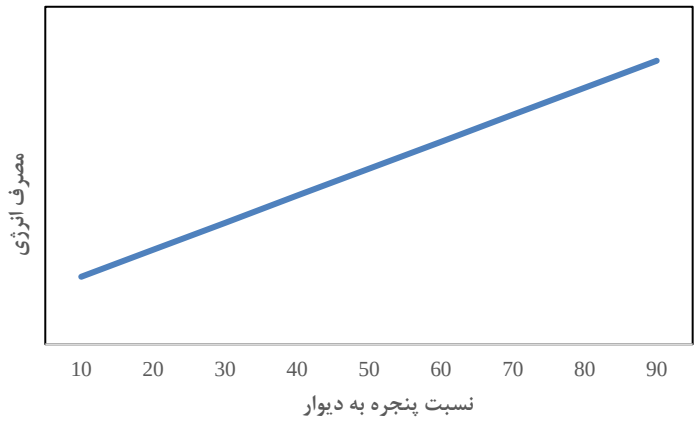
ردیف	پارامتر	توضیحات
۱	نسبت پنجره به دیوار	میزان تابش نور خورشید بر سطح پنجره رابطه مستقیمی با تولید الکتریسیته دارد.
۲	اقلیم	بر زاویه تابش نور خورشید بر پنجره، شدت تابش و دمای هوای بیرون تاثیر دارد.
۳	نوع شیشه	خصوصیات بصری و حرارتی شیشه بر عملکرد این صفحات تاثیرگذار هستند.
۴	جهت‌گیری و موقعیت استفاده از این صفحات	بر میزان انرژی خورشیدی که بر این صفحات می‌تابد تاثیر مستقیم دارد.

۴-۱-۱- نسبت پنجره به دیوار

نسبت پنجره به دیوار یکی از پارامترهای اساسی در بررسی مصرف انرژی ساختمان است. میزان سطح پنجره به میزان سطح کل دیواری که پنجره در آن قرار دارد نسبت پنجره به دیوار نامیده می‌شود. در بین دانشمندان و مجامع علمی رشته انرژی و ساختمان، استفاده از این پارامتر در بهبود مصرف انرژی ساختمان‌ها رایج

است. تحقیقات مختلفی نشان می‌دهند که هرچه نسبت پنجره به دیوار بیشتر باشد، مصرف انرژی ساختمان افزایش پیدا می‌کند (Chi et al., 2020; Goia, 2016; Marino et al., 2017; Pino et al., 2012; Troup et al., 2019; Wen et al., 2017; Xue et al., 2019). با توجه به اینکه صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان به صورتی لایه‌ای نازک در شیشه استفاده می‌شوند (Park et al., 2010)، همواره در معرض تابش نور خورشید قرار خواهند داشت. نسبت پنجره به دیوار می‌تواند میزان نور خورشید عبوری از شیشه به فضای داخل ساختمان را نشان دهد. در واقع، نسبت پنجره به دیوار میزان انرژی خورشیدی که روزانه وارد فضای داخلی می‌شود را مشخص می‌کند و هرچه میزان آن بیشتر باشد انرژی خورشیدی بیشتری به فضای داخل وارد می‌شود.

با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که نسبت پنجره به دیوار می‌تواند بر مصرف انرژی صفحات فتوولتاییک تاثیرگذار باشد. تحقیقات مختلفی به این امر توجه کرده‌اند و نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که مصرف انرژی ساختمان‌های مجهز به صفحات تلفیق‌شونده با نمای ساختمان نسبت مستقیمی با نسبت پنجره به دیوار دارد (Cheng et al., 2019; Hoseinzadeh et al., 2021; Sun et al., 2020).



شکل ۴- رابطه بین نسبت پنجره به دیوار و مصرف انرژی ساختمان (مأخذ: نگارندگان).

۴-۱-۲- اقلیم

یکی از مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر عملکرد صفحات فتوولتاییک اقلیمی است که ساختمان در آن ساختمان قرار دارد. با توجه به اینکه صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان با هدف استفاده از انرژی پاک خورشیدی استفاده می‌شوند، در نظر گرفتن میزان تابش بر روی شیشه پنجره از اهمیت فراوانی برخوردار است.

در تحقیقات پیشین صورت گرفته در زمینه صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان، به دو عامل اقلیمی مهم شامل روز درجه گرمایشی و روز درجه سرمایشی توجه شده است و هر تحقیقی در شرایط خاص آب‌وهوایی انجام شده است (Alrashidi et al., 2020; Salameh et al., 2020; Zhang et al., 2018). نکته بسیار مهم در این بخش دمای هوای محیط بیرون است که بر روی عملکرد این صفحات تاثیر می‌گذارد و دماهای بسیار زیاد کارآیی این صفحات و میزان انرژی الکتریکی تولیدی توسط آنها را کاهش می‌دهد (Zhang et al., 2018).

۴-۱-۳- نوع شیشه پنجره

یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان، خصوصیات شیشه است. هر شیشه‌ای دارای رنگی خاص و خصوصیات حرارتی خاصی است. این ویژگی‌های بصری و حرارتی شیشه تاثیر زیادی بر مصرف انرژی دارند (Delgarm et al., 2016; Raji et al., 2016; Skarning et al., 2016; Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010) و باید در هماهنگی کامل با عملکرد بهینه این صفحات باشند. رنگ مناسب شیشه می‌تواند تاثیر مطلوبی بر فضای داخل داشته باشد و حتی در عملکرد انرژی ساختمان موثر واقع شود (Arsenault et al., 2012; Ihm et al., 2012). از طرفی دیگر، خصوصیات حرارتی شیشه نیز می‌تواند بر مصرف انرژی موثر واقع شود (Gosselin & Dussault, 2017). بنابراین، نمی‌توان این پارامترها را جدا از صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نما در نظر گرفت و ضرورت دارد تا تاثیر آنها بر عملکرد این صفحات با روش‌هایی همچون آزمایش میدانی یا شبیه‌سازی کامپیوتری مشخص شود.

۴-۱-۴- جهت‌گیری و موقعیت استفاده از این صفحات

با توجه به اینکه اساس کار این صفحات استفاده از نور خورشید به عنوان منبع انرژی برای تولید انرژی الکتریکی است، بازدهی این صفحات می‌تواند تابعی از جهت استفاده از آنها باشد. در واقع، هرچه این صفحات در جبهه جنوب بیشتر استفاده شوند بیشتر در معرض تابش قرار خواهند گرفت و انرژی الکتریکی بیشتری تولید خواهد شد. بنابراین، جهت‌گیری صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان و موقعیت استفاده از آن در ساختمان نقش مهمی در عملکرد آنها دارد و می‌تواند به بهبود مصرف انرژی ساختمان کمک کند.

۵- تحلیل یافته‌ها

با توجه به پارامترهای استخراج شده از پژوهش‌های پیشین و بررسی تاثیر هر پارامتر بر عملکرد صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان می‌توان نتایجی را در پایان این پژوهش بیان کرد. پارامترهای استخراج شده شامل نسبت پنجره به دیوار، اقلیم، نوع شیشه و جهت‌گیری و موقعیت استفاده از این صفحات بودند. تاثیر هر پارامتر در بخش قبل به طور جداگانه در بخش قبل ذکر شد اما سئوال این است که تاثیر کدام پارامتر بیشتر از بقیه موارد است؟ در حقیقت، هر پارامتر در جای خود اهمیت دارد و نمی‌توان بین پارامترهای مختلف یکی را بر دیگری برتر دانست. مهمترین دلیل این امر این است که مصرف انرژی ساختمان‌ها با کاربری‌ها مختلف به عوامل مختلفی بستگی دارد و هر پارامتر در جای خود باید بررسی شود. هر پارامتر در ساختمان‌های با کاربری مختلف ممکن است عملکردهای مختلفی را داشته باشد که در محاسبات انرژی باید مورد توجه قرار گیرد. به عنوان مثال، نسبت پنجره به دیوار مقدار ثابتی نیست و عملکرد انرژی ساختمان با نسبت پنجره به

دیوار در کاربری‌های مختلف متفاوت است. از طرفی دیگر، اقلیم بر عملکرد این صفحات تاثیرگذار است و نتایج تحقیقات پیشین نشان دادند که این صفحات در دماهای پایین عملکرد بهتری دارند و هرچه دما هوای محیط خارج بیشتر شود، عملکرد این صفحات کاهش پیدا می‌کند. نوع شیشه نیز می‌تواند بر عملکرد این صفحات موثر واقع شود. نکته مهم در این بخش این است که نوع شیشه به این دلیل اهمیت دارد که می‌تواند در کاهش دمای اطراف این صفحات موثر واقع شود. بنابراین، نوع شیشه می‌تواند به بهبود عملکرد این صفحات کمک فراوانی کند. یکی دیگر از عوامل موثر استخراج شده با توجه به تحقیقات پیشین، جهت‌گیری و موقعیتی است که پنجره‌های مجهز به صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان در آن قسمت قرار دارند. در واقع، هرچه میزان تابش نور خورشیدی بیشتر باشد، انرژی بیشتر توسط این صفحات جذب شده و الکتریسیته بیشتری تولید می‌شود. بنابراین، قسمت‌های جنوبی ساختمان‌ها انرژی بیشتری را دریافت خواهند کرد و استفاده از این صفحات در بخش جنوبی بیشتر از سایر بخش‌ها توصیه می‌شود.

در پایان می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان می‌تواند مصرف انرژی ساختمان‌های مختلف را کاهش دهد. همچنین، استفاده از صفحات فتوولتاییک یکپارچه با نمای ساختمان در کاربری‌های مختلف و اقلیم‌های مختلف می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را تا مقدار مشخصی کاهش دهد که در این تحقیق به برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه اشاره شد و میزان صرفه‌جویی انرژی در هر تحقیق بیان شد. از طرفی دیگر، نتایج این پژوهش‌ها نشان دادند که در کنار قابلیت کاهش مصرف انرژی صفحات فتوولتاییک، هزینه‌های اولیه نصب و خرید این صفحات نمی‌توانند مانعی برای استفاده از این صفحات باشند (Aguacil et al., 2019; Ghosh et al., 2019; Jayathissa et al., 2016; Petter Jelle et al., 2012). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این تحقیق به همه‌ی سئوالات تحقیق پاسخ داد و نشان داد که استفاده از صفحات فتوولتاییک یکپارچه با نمای ساختمان می‌تواند گزینه مناسبی برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های مختلف باشد.

۶- نتیجه‌گیری

امروزه کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی همچون نفت و گاز و جایگزینی منابع انرژی تجدیدناپذیر با منابع انرژی تجدیدپذیر امری ضروری است. این تحقیق تلاش کرد تا ابتدا به معرفی کلی صفحات فتوولتاییک بپردازد. سپس، دسته‌بندی از این صفحات با توجه به مقالات بین‌المللی معتبر در این زمینه ارائه دهد. در گام بعد، این تحقیق روی صفحات فتوولتاییک تلفیق‌شونده با نمای ساختمان تمرکز کرد. ابتدا، عوامل موثر بر عملکرد این صفحات به تفکیک با توجه به منابع معتبر علمی ذکر شد. تاثیر هر پارامتر در هر بخش توضیح داده شد. سپس، نتایج برخی از تحقیقاتی که به تاثیر استفاده از این صفحات بر مصرف انرژی ساختمان پرداخته بودند ذکر شد. نتایج تحقیقات پیشین نشان داد که استفاده از این صفحات می‌تواند تا ۱۰۶٪ مصرف انرژی یک ساختمان را کاهش دهد و ساختمان را به ساختمانی صفر انرژی تبدیل کند. در کنار تاثیر مثبت استفاده از صفحات فتوولتاییک یکپارچه با نمای ساختمان، در همین تحقیقات ذکر شده هزینه‌های استفاده از آنها نیز ذکر شده بود که همگی این تحقیقات استفاده از این صفحات را از دید اقتصادی و هزینه‌های اولیه بررسی کرده بودند. نتایج تحقیقات این پژوهش‌ها نشان داد که استفاده از صفحات فتوولتاییک یکپارچه با نمای ساختمان از نظر اقتصادی و نیز قابلیت ذخیره انرژی مزایای بسیار زیادی را به همراه دارد.

منابع

1. Aguacil, S., Lufkin, S., & Rey, E. (2019). Active surfaces selection method for building-integrated photovoltaics (BIPV) in renovation projects based on self-consumption and self-sufficiency. *Energy and Buildings*, *193*, 15–28. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.035
2. Alrashidi, H., Ghosh, A., Issa, W., Sellami, N., Mallick, T. K., & Sundaram, S. (2020). Thermal performance of semitransparent CdTe BIPV window at temperate climate. *Solar Energy*, *195*, 536–543. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.084
3. Arsenault, H., Hébert, M., & Dubois, M.-C. (2012). Effects of glazing colour type on perception of daylight quality, arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms. *Building and Environment*, *56*, 223–231. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.02.032
4. Cheng, Y., Gao, M., Jia, J., Sun, Y., Fan, Y., & Yu, M. (2019). An optimal and comparison study on daylight and overall energy performance of double-glazed photovoltaics windows in cold region of China. *Energy*, *170*, 356–366. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.097
5. Chi, F., Wang, Y., Wang, R., Li, G., & Peng, C. (2020). An investigation of optimal window-to-wall ratio based on changes in building orientations for traditional dwellings. *Solar Energy*, *195*, 64–81. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2019.11.033
6. Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., & Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy*, *170*, 293–303. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.141
7. Ghosh, A., Sarmah, N., Sundaram, S., & Mallick, T. K. (2019). Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system. *Solar Energy*, *190*, 608–616. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.049
8. Goia, F. (2016). Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. *Solar Energy*, *132*, 467–492. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031
9. Goncalves, J. E., van Hooff, T., & Saelens, D. (2020). A physics-based high-resolution BIPV model for building performance simulations. *Solar Energy*, *204*, 585–599. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.057
10. Gosselin, L., & Dussault, J.-M. (2017). Correlations for glazing properties and representation of glazing types with continuous variables for daylight and energy simulations. *Solar Energy*, *141*, 159–165. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.11.031
11. Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., & Alonso-Gómez, V. (2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, *188*, 426–440. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.017
12. Hoseinzadeh, P., Khalaji Assadi, M., Heidari, S., Khalatbari, M., Saidur, R., Haghighat nejad, K., & Sangin, H. (2021). Energy performance of building integrated photovoltaic high-rise building: Case study, Tehran, Iran. *Energy and Buildings*, *235*, 110707. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110707
13. Ihm, P., Park, L., Krarti, M., & Seo, D. (2012). Impact of window selection on the energy performance of residential buildings in South Korea. *Energy Policy*, *44*, 1–9. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.046
14. Jayathissa, P., Jansen, M., Heeren, N., Nagy, Z., & Schlueter, A. (2016). Life cycle assessment of dynamic building integrated photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *156*, 75–82. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.017
15. Lee, H. M., Yoon, J. H., Kim, S. C., & Shin, U. C. (2017). Operational power performance of south-facing vertical BIPV window system applied in office building. *Solar Energy*, *145*, 66–77. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.056
16. Marino, C., Nucara, A., & Pietrafesa, M. (2017). Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. *Journal of Building Engineering*, *13*, 169–183. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.001
17. Park, K. E., Kang, G. H., Kim, H. I., Yu, G. J., & Kim, J. T. (2010). Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. *Energy*, *35*(6), 2681–2687. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.019
18. Petter Jelle, B., Breivik, C., & Drolsum Røkenes, H. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *100*, 69–96. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.016
19. Pino, A., Bustamante, W., Escobar, R., & Pino, F. E. (2012). Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile. *Energy and Buildings*, *47*, 441–449. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.12.016
20. Qiu, C., Yang, H., & Zhang, W. (2019). Investigation on the energy performance of a novel semi-transparent BIPV system integrated with vacuum glazing. *Building Simulation*, *12*(1), 29–39. https://doi.org/10.1007/s12273-018-0464-6
21. Raji, B., Tenpierik, M. J., & van den Dobbelsteen, A. (2016). An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: A case study in the Netherlands. *Energy and Buildings*, *124*, 210–221. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.049
22. Salameh, T., Assad, M. E. H., Tawalbeh, M., Ghenai, C., Merabet, A., & Öztop, H. F. (2020). Analysis of cooling load on commercial building in UAE climate using building integrated photovoltaic façade system. *Solar Energy*, *199*, 617–629. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.062
23. Skandalos, N., & Karamanis, D. (2015). PV glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *49*, 306–322. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.145
24. Skarning, G. C. J., Hviid, C. A., & Svendsen, S. (2016). Roadmap for improving roof and façade windows in nearly zero-energy houses in Europe. *Energy and Buildings*, *116*, 602–613. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.038
25. Sun, Y., Liu, D., Flor, J.-F., Shank, K., Baig, H., Wilson, R., Liu, H., Sundaram, S., Mallick, T. K., & Wu, Y. (2020). Analysis of the daylight performance of window integrated photovoltaics systems. *Renewable Energy*, *145*, 153–163. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.061
26. Troup, L., Phillips, R., Eckelman, M. J., & Fannon, D. (2019). Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy and Buildings*, *203*, 109434. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109434
27. Tuhus-Dubrow, D., & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, *45*(7), 1574–1581. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.005
28. Wen, L., Hiyama, K., & Koganei, M. (2017). A method for creating maps of recommended window-to-wall ratios to assign appropriate default values in design performance modeling: A case study of a typical office building in Japan. *Energy and Buildings*,

145, 304–317. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.04.028
29. Xue, P., Li, Q., Xie, J., Zhao, M., & Liu, J. (2019). Optimization of window-to-wall ratio with sunshades in China low latitude region considering daylighting and energy saving requirements. *Applied Energy*, *233–234*, 62–70. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.10.027
30. Yang, S., Cannavale, A., Di Carlo, A., Prasad, D., Sproul, A., & Fiorito, F. (2020). Performance assessment of BIPV/T double-skin façade for various climate zones in Australia: Effects on energy consumption. *Solar Energy*, *199*, 377–399. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.044
31. Yoo, S.-H. (2019). Optimization of a BIPV system to mitigate greenhouse gas and indoor environment. *Solar Energy*, *188*, 875–882. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.055
32. Zhang, T., Wang, M., & Yang, H. (2018). A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. In *Energies* (Vol. 11, Issue 11). https://doi.org/10.3390/en11113157