6th National Conference on
Sustainable Architecture and City
Faculty of Architecture and Urban Planning
Shahid Rajaee University
March 2022

ششمین همایش ملی
معماری و شهر پایدار
دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی
دانشگاه شهید رجایی
اسفند ۱۴۰۰

تحلیل مقایسه ای سیستم های متعامل نمای ساختمان با نور و انرژی خورشید

مریم طلایی[۱]، هادی متولی حقیقی[۲]

۱- استادیار، معماری، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- مدرس، معماری، دانشگاه فردوسی مشهد.

Comparative Analysis of Building Facade Systems Interacting with Sunlight and Solar Energy

Maryam Talaei [1], Hadi Motevali Haghighi [2]

1- Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Ferdowsi University of Mashhad

2- Lecturer, Faculty of Architecture and Urban Planning, Ferdowsi University of Mashhad

*Corresponding Author: E-mail E-mailایمیل نویسنده مسئول : m.talaei@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

یک ساختمان معمولی از سه طریق حرارت کسب می کند؛ گرمای داخلی تولید شده ساختمان، گرمایی که از طریق جداره ساختمان کسب می شود و نیز گرمای هوای تازه و از این رو نمای ساختمان به دلیل تاثیر آن بر انرژی و بازدهی محیطی و تامین اسایش حرارتی ساکنین اهمیت والایی دارد. در این راستا بهره گیری از تکنولوژی های نوین در جهت بهره گیری از انرژی های تجدید پذیر به خصوص انرژی خورشید روز به روز در حال افزایش است. مقاله حاضر در صدد است تا مروری بر مهمترین راهکارهایی که در طول تاریخ ساختمان در مواجهه با نور و انرژی خورشید در نمای ساختمان به کار گرفته شده است را به انجام رسانده و کاربرد آنها را در ساختمان مورد ارزیابی و مقایسه قرار دهد. تکنولوژی های نمای بررسی شده در این مجال عبارتند از: سایبان های متداول، انرژی قاب، باغ های عمودی، نماهای خورشیدی (نماهای تلفیق شده با پنل های فتوولتائیک (BIPV)، پنل های فتوولتائیک حرارتی (BIPV/T)، ساختمان های تلفیق شده با سیستم خورشیدی حرارتی(BIST)، نماهای انطباق پذیر با نور خورشید، نماهای دو پوسته، پوسته قابل انطباق با شرایط اقلیمی، نماهای بیورکتر میکرو جلبکی.

واژگان کلیدی

انرژی خورشید، انرژی های تجدید پذیر، طراحی اقلیمی، نمای ساختمان.

Abstract

A typical building receives heat in three ways including the internal heat which is generated by the building, the heat that is obtained through the building envelopes and also the heat of fresh air. Accordingly, building facade is of great importance due to its great impact on energy and environmental efficiency as well as providing thermal comfort for residents. In this regard, application of new technologies using renewable energy, especially solar energy has been increased in recent decays. The present study aims to comparatively analyzing the performance of the studied façade systems through a review of their performance and interanion with solar energy. The performance analyzed in is this study include Mitigating air pollution, producing electrical and thermal energy, controlling internal heat gain as well as shading and ventilation. These technologies include energy frame, vertical gardens, microalgae bioreactor façade, solar façade (BIPV, BIPV/T, BIST) adaptive solar façade, double Skin façade, climate adaptive building Shell. Besides,

Keywords:

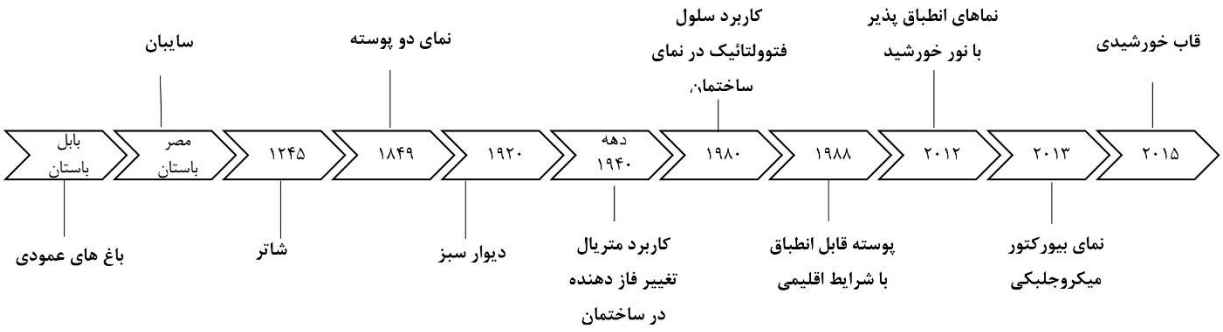
Building Façade, Climatic Design, Renewable Energy, Solar Energy.

۱- مقدمه

توسعه پایدار طراحی و خلق نماهای خلاقانه ای را می طلبد که ارتباط میان انسان و محیط طبیعی را هماهنگ سازد. نمای ساختمان عنصری کلیدی است برای تامین روشنایی داخلی، گرمای داخل ساختمان تامین انرژی و کنترل آن . تمرکز طراحی غالب پوسته ی ساختمان های متداول بر روی ایجاد پناهگاه و حفاظت می باشد. این موضع غالباً به دلیل حفاظت محیط داخل از تغییرات جوی خارج صورت می گیرد (Loonen et al, 2013:484). طراحی نما اهمیت زیادی در شرایط هوای داخل دارد چراکه جریان انرژی زیادی بین داخل و خارج ساختمان از طریق جداره آن اتفاق می افتد. عملکرد اصلی نمای ساختمان حمایت کردن از محیط داخل در برابر محیط خارج است و بیهنه کردن این عملکرد نیازمند کنترل انتقال گرما از دورن به بیرون، بارگرمایی خورشید از بیرون به درون، استفاده زیاد از انرژی خورشیدی غیر فعال، استفاده زیاد از نور روز، حفاظت در برابر تابش خیره کننده از بیرون، جریان هوا بین درون و بیرون (در هر دو جهت)، ایجاد دید به بیرون ایجاد محیط خلوت می باشد (Johnsen& Winther, 2015: 1569). در دهه های اخیر طراحی ساختمان ها با مصرف انرژی کم به دو جهت راه خود را گشوده است؛ تکنولوژی فعال و استراتژی طراحی غیر فعال (Guy&Farmer,2001., Roaf et al,2009). رویکرد اول به ارتقاء سطح پایداری محیط های مصنوع از طریق معرفی تدابیر تکنیکی خلاق می پردازد و طراحی غیر فعال به ساختمان هایی اشاره دارد که طراحی و فرم خود ساختمان در مقابل سیستم های مکانیکی، نقش مهمی را در تسخیر، ذخیره و توزیع باد و انرژی خورشید بر عهده داشته و معمولا با هدف جایگزین کردن سوخت فسیلی برای تهویه و تامین نور به کار می رود (Porteous& MacGregor,2005, Pacheco,2012).

هدف مقاله حاضر مروری است بر چگونگی تعامل نمای ساختمان با نور و انرژی خورشید و از این منظر سیر تکوینی این تعامل را که در برگیرنده ی تکنولوژی های نوین می باشد مورد ارزیابی قرار می دهد. تکنولوژی ها و راهکارهایی در ارتباط با تعامل نمای ساختمان و نور خورشید مورد نظر است که در کسب انرژی توسط ساختمان و نیز کنترل دمای فضای داخلی اثر گذار است و با نگاهی تاریخی از اولیه ترین رویکرد ها تا به روزترین آنها در این جستار مورد بررسی قرار می گیرند. این

تکنولوژی ها عبارتند از؛ سایه بانها، انرژی قاب[1]، باغ های عمودی، نماهای خورشیدی[2] (BIPV,BIPV/T,BIST)، نماهای انطباق پذیر با نور خورشید[3]، نماهای دو پوسته[4]، پوسته قابل انطباق با شرایط اقلیمی[5]، نماهای بیورکتر میکرو جلبک[6]. شکل ۱ نمودار زمانی این تکنولوژی ها را به تصویر میکشد.



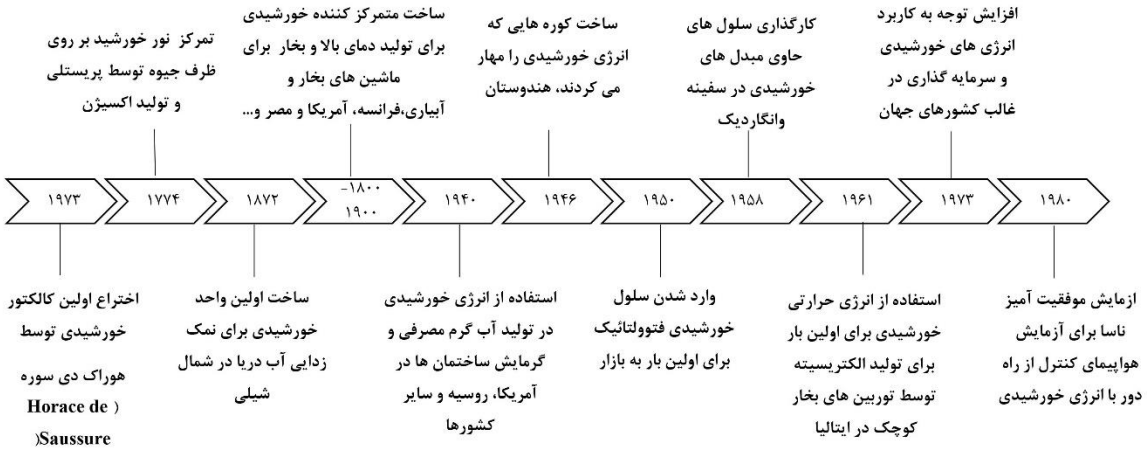
شکل ۱: نمودار زمانی تکنولوژی های نمای متعامل با نور خورشید (نگارندگان)

۲- انرژی خورشید و نور ساختمان

اگر قرن ۱۹ قرن زغال سنگ باشد، قرن ۲۰ قرن نفت، قرن ۲۱ قرن خورشید است. بهره گیری از انرژی خورشید در ساخت و ظاهر ساختمان روز به روز در حال افزایش است. انرژی خورشیدی از زمان های بسیار گذشته به منظور خشک کردن محصولات کشاورزی برای گرم کردن فضا و یا تهویه خانه به کار گرفته می شد، کاربردهایی که امروزه نیز در بسیاری از کشورهای در حال توسعه به کار گرفته می شود. بیش از ۲۰۰۰ سال قبل، ریاضیدانان یونانی قهرمان الکساندریا[7] پمپ آبی ساده ای ساخت که توسط انرژی خورشید کار می کرد و در ۲۱۴ سال قبل از میلاد نیز ارشمیدس نور خورشید را بر روی کشتی رومی برای آتش زدن آن متمرکز کرد (Vanderhulst et al, 1990: 3). شکل ۲ استفاده های صنعتی و مدرن انرژی خورشیدی که از سالهای ۱۷۷۰ میلادی اغاز گردیده است را تا ابتدای قرن ۲۰ به تصویر میکشد. در حال حاضر از انرژی خورشیدی در سامانه های مختلف و برای مقاصد متفاوت استفاده می شود که به طور کلی عبارتند از: استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف خانگی، صنعتی و نیروگاهی (مستقیم)، و تبدیلِ پرتوهای خورشید به الکتریسیته به وسیلهٔ سلول

[1] Energy Frame
[2] Solar façade
[3] Adaptive solar façade
[4] Double Skin façade
[5] Climate Adaptive building Shell
[6] Microalgae bioreactor facade
[7] Heron of Alexandria

فتوولتائیک (غیرمستقیم) (سانا، a۱۳۸۷). در عصر حاضر از انرژی خورشیدی در موارد بسیاری استفاده و بهره گیری می شود که عبارتند از: سامانه های فتوبیولوژیک، سامانه های فتوشیمیایی: ، سامانه های فتوولتائیک و سامانه های حرارتی و برودتی (فرهمندفر، ۱۳۸۹: ۲).



شکل ۲: استفاده های صنعتی و مدرن انرژی خورشیدی که از سالهای ۱۷۷۰ میلادی اغاز گردید.
نگارندگان با استناد به [4]

علاوه بر کاربرد در صنایع مختلف، استفاده گسترده انرژی خورشید در ساختمان در دهه های اخیر به دلیل بحران های عدیده ی زیست محیطی و نگرانی از اتمام انرژی های زیست محیطی رو افزایش بوده است. چرا که بخش عظیمی از مصرف انرژی در بخش مسکونی مورد استفاده قرار می گیرد. در این راستا بهره گیری از تکنولوژی های نوین در صنعت ساختمان به منظور تعامل با انرژی خورشید ، کسب آن و کنترل دمای ساختمان همواره مورد تاکید بوده است. مقاله حاضر این تکنولوژی ها، اعم از انواع سایه بان های مختلف که در طول تاریخ به کار گرفته شده است تا پیشرفته ترین راهکارهای تعامل نمای ساختمان با نور خورشید را مورد مداقه قرار می دهد.

۱-۲- سایبان متداول

سایه بان ها از دیرباز از جمله راهکار های قابل توجه در برابر کنترل ورود نور خورشید به داخل ساختمان و نیز کنترل میزان جذب حرارت آن بوده اند. در اقیلم های گرم سایه بان ها نقش اساسی در کنترل ورود نور به داخل و کنترل بار حرارتی ساختمان ایفا می کنند. سایه بان ها به دو دسته عمودی و افقی اقسیم می شوند. سایه بان های افقی در برابر ورود نور خورشید با زاویه زیاد بسیار کار آمد عمل می کنند و می توانند بر حسب نیاز ساکنین و جهت قرارگیری خورشید سایه کامل در داخل ایجاد کنند. در این بین سایه بان های عمودی نیز در برابر زاویه تابش کم خورشید در موقع بعد از ظهر و صبح

های زود عملکرد بسیار مطلوبی دارند (Bader,2011). برخی سایه بان ها به صورت دستی و مکانیکی قبل تنظیم اند که یکی از اولین نمونه های آن شاتر[1] یا دریچه های ثابت می باشد. سایه بان هایی که قابل تنظیم اند می توانند بر حسب جهت خورشید تنظیم شده و آسایش حرارتی محیط را در ساعات مختلف در حد مطلوب کاربر فضا نگه دارد. هرچه که کاربر فضا بتواند با جزئیات بیشتری کنترل سایه بان را در دست گیرد احساس رضایت او بیشتر خواهد بود. در عین حال هزینه ها و شرایط نگهداری در مورد این سایه بان ها از موارد مهمی است که باید مد نظر قرار گیرد. علاوه بر سایه بان، پرده های سایه انداز [2] (شکل ۳و ۴) از دیگر راهکارهایی است که در مواجهه با کنترل ورود نور خورشید به داخل ساختمان به کار گرفته می شود این پرده ها به خصوص در کشورهای اسلامی غالباً از جنس چوب بوده و با طرح های مختلف در بیرون از پنجره استفاده می شود[3] که نام دیگر آن شاناشیل[4] می باشد. امروزه نیز پرده های سایه انداز که در تلفیق با نمای ساختمان از ابتدا طراحی می شود کاربرد گسترده ای دارند (Bader,2011:25). سایه بان ها بر حسب محل نصبشان نیز به سایبان های داخلی که در داخل ساختمان نصب می شوند، خارجی که در خارج پنجره نصب می شوند و میانی که میان دو پنجره قرار می گیرند، تقسیم بندی می شوند. سایبان های ثابت خارجی مانند لبه افقی، پرده های عمودی، دریچه های ثابت، صفحات انعکاسی، لوورهای ثابت، آینه های سهموی. سایبان های متحرک خارجی شامل لوور ها، آفتابگیرها، دریچه های متحرک، پرده های عمودی و افقی، پرده کرکره ای و یا کرباسی هستند. سایبان های داخلی عبارتند از پرده ها، آفتابگیرهای عمودی یا دراپری ها، آفتابگیر های غلتکی. اما در مورد سایبان های میانی، کاربرد این سایبان ها در ایران بسیار محدود است و در عین حال عملکرد بهتری نسبت به سایبان های داخلی دارند. نمونه های مختلف این نوع سایبان عبارتند از : پرده کرکره ای میانی، پرده های میانی و آفتابگیر های غلطکی میانی (خراسانی زاده و همکاران،۱۳۸۵).

شکل ۳: پرده های سایه انداز شهر مصدر، ابوظبی (نگارندگان)

شکل ۴: شاناشیل الحمرا. رانادا [6]

۲-۲- باغ های عمودی

ایده طراحی باغ های عمودی به ۲۵۰۰ سال قبل به ساخت بابل قدیم باز میگردد و در سال ۱۹۲۰ نیز بریتانیا و امریکای شمالی سیستم باغ های عمودی را ارتقاء دادند.(Timur and Karaca, 2013). هر چند در برخی از نقاط دنیا به عنوان مثال

[1] Shutter
[2] Shading Screen
[3] Musharabia Screen
[4] shanasheel

جاکارتا، باغ های عمودی صرفاً از منظر ابعاد زیبایی شناسی به کار برده می شوند و این مساله به دلیل ضعف تحقیقات مرتبط با اثرات حرارتی باغ های عمودی و درصد دقیق کاهش گرما می باشد(Othman& Sahidin, 2016). باغ های عمودی و یا نمای سبز راهکار سیستم غیر فعالی است که به منظور کاهش اثرات گرمای خورشید و جذب نور آن به کار می رود. نماهای سبز علاوه بر اثرات زیبایی شناسی خود و نیز کنترل دمای ساختمان می توانند با جذب دی اکسید کربن به کاهش آلودگی هوا(Davis,et al, 2016) کمک نمایند. دیوارهای سبز زنده و نماهای سبز می توانند سرمایش را برای جداره ساختمان فراهم کنند، که باعث کاهش مصرف انرژی به وسیله ارتقاء عملکرد حرارتی ساختمان می شود، بنابراین باعث کاهش اثر جزیره گرمایی شهر ها، افزایش کیفیت هوای داخل، کاهش آلودگی صوتی می شود(Elgizawy, 2016:120). پرز و همکارانش(۲۰۱۱) طی تحقیقی که بر روی جداره های سبز در آب و هوای قاره ای مدیترانه انجام دادند دریافتند که گیاهان سایه اندازی، ذخیره انرژی و نیز کنترل جریان باد را برای ساختمان فراهم می کنند (Pérez et al, 2011). در مجموع دو نوع باغ عمودی وجود دارد؛ نمای سبز و دیوار زنده [1](Othman& Sahidin, 2016:846) که هر یک به دو زیر سیستم قابل تقسیم هستند. سیستم دیوار زنده مدولار[2] و سیستم دیوار با لایه زیرین و پوشش گیاهی[3] مربوط به دیوار زنده و سیستم های پنل داربست مدولار[4] و سیستم طناب سیمی و کابل[5] مربوط به نمای سبز(Elgizawy, 2016:120) (اشکال ۵-۸). دیوار نمای سبز سیستم سبز عمودی است که گیاهان بالا رونده بر روی ساختمان رشد می کنند. در این سیستم خاک به عنوان محیطی برای رشد گیاه در بالا یا پاین ساختمان قرار می گیرد و در مجموع حدوداً ۳ تا ۵ سال زمان لازم است تا گیاهان رشد کرده و کاملاً دیوار را بپوشانند (Hunter, et al, 2014). در سیستم دیوار زنده بیش از یک نوع گیاه کاشته می شود. در این سیستم از سازه های مدولار کاشته شده از گیاه و یا سبزیجات استفاده می شود که از جنس پلاستیک، آهن و یا سایر متریال هایی هستند که که به صورت عمودی به سازه فلزی متصل هستند. باغ های عمودی با در نظر گرفتن سیستم تصویه هوای ساختمان به گونه ای دیگر نیز تقسیم بندی می شوند. باغ های عمودی فعال و باغ های عمودی غیر فعال. در سیستم فعال هوای تولید شده توسط گیاهان در سیستم تهویه هوای ساختمان به کار می رود. دیوارهای سبز باعث افزایش پتانسیل جداره برای تصفیه هوا می شود. این سیستم تهویه هوا با مکش از ریشه سیستم عمل می کند. دیویس (۲۰۱۶) در تحقیق خود به منظور تحقق تهویه هوای ساختمان از طریق جداره باغ عمودی به این نتیجه رسیدند که از سه طریق این مهم امکان پذیر است؛ ۱) از طریق جریان دادن هوا برروی شاخ و برگ گیاهان،۲) از طریق وادار کردن هوا برای جریان گرفتن در زیر لایه باغ عمودی و ۳) از طریق جریان یافتن هوا در پشت باغ عمودی. آنها در یافتند که مورد یک امکان پذیر نیست و راه حل دوم نیز نا کارامد است. اما راه حل سوم توانست نتیجه مورد نظر را بدست دهد. (Davis, et al, 2016).

[1] Living Walls
[2] Modular Green Living Wall System
[3] Vegetated Mat Walls System
[4] Modular Trellis Panel System
[5] Cable and Wire-Rope System

شکل ۵: سیستم طناب سیمی و کابل [17]

شکل ۶: پنل داربست مدولار [17]

شکل ۷: دیوار با لایه زیرین و پوشش گیاهی [12]

شکل ۸: سیستم دیوار سبز زنده مدولار [12]

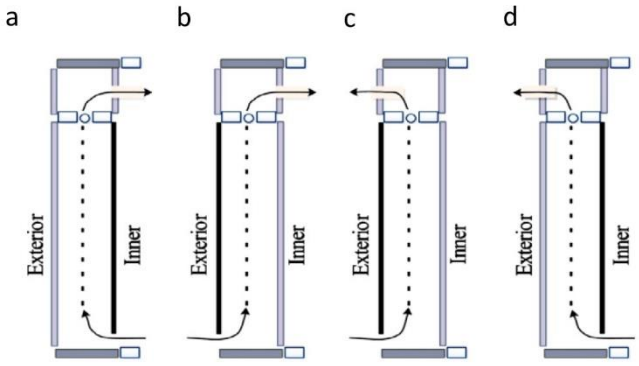
۳-۲- نمای دو پوسته

به منظور کنترل تبادل حرارت ساختمان نمای دو جداره در آمریکای شمالی، اروپا و ژاپن مورد توجه وسیعی قرار گرفت و در سایر کشورها نیز گسترش پیدا کرد (Mahdinejad et al, 2014; Zhou& Chen, 2010:1322) و به خصوص همراه با توسعه اقتصادی کاربرد این نما در اقلیم هایی با تابستان های گرم و زمستان های سرد مانند کشورهایی نظیر چین مورد توجه قرار گرفت. کتاب مرجع موسسه تحقیقات ساختمان بلژیک[1] (۲۰۰۲) نمای دو جداره را چنین تعریف می کند؛ نمایی غیر فعال که پوشیده شده است با ساختاری یک یا چند طبقه از پوسته شیشه ای چند لایه. در این پوسته ها هوا می تواند آزاد و یا محبوس باشد. در این نوع نما هوای داخل فضای خالی بین پوسته ها می تواند به صورت طبیعی و یا مکانیکی تهویه شود. استراتژی تهویه هوای خالی ممکن است همراه با زمان تغییر کند. بازار و سیستم ها در این نما عموماً با یکدیگر تلفیق شده اند تا کیفیت هوای داخل را توسط تکنیک های فعال و غیر فعال ارتقاء دهند. اغلب اوقات چنین سیستم هایی به شیوه ای نیمه اتوماتیک به وسیله سیستم های کنترل شده اداره می شوند. این نماها با بهر ه گیری از اثر گلخانه، گرما را بین دو

[1] Belgian Building Research Institute [BBRI]

پوستهٔ خود به دام می اندازند و از این طریق به گرمایش فضا کمک می کنند. از طرف دیگر، نماهای دو پوسته حتی در شرایطی که در محیط خارج ساختمان سرو صدای زیادی وجود دارد و یا وزش باد شدید است نیز امکان تهویهٔ طبیعی را برای فضای داخلی ساختمان فراهم می کنند. در فصل زمستان نیز هوای تازهٔ مورد نیاز ساختمان می تواند در فضای بین دو پوسته پیش گرم شده و سپس به داخل ساختمان انتقال یابد. کاربرد دیگر این پوسته ها در نوسازی ساختمان های موجود است، در شرایطی که امکان یا تمایلی برای بازسازی یا تعویض کامل نمای ساختمان های موجود را نداشته باشیم (هادیان پور و دیگران، ۱۳۹۳: ۳۰). راه های مختلفی برای طبقه بندی سیستم نمای دوجداره وجود دارد. این سیستم می تواند بر مبنای نوع سازه، منشاء، هدف و نوع جریان هوا در فضای خالی پوسته طبقه بندی شود (Poirazis, 2006: 31-32). اوسترل و همکارانش (۲۰۰۱) نمای دو پوسته را بر مبنای نوع (هندسه) فضای خالی ما بین آن تعریف می کنند. این طبقه بندی بدین گونه است (شکل ۹):

- نوع پنجره جعبه ای: در این نوع پارتیشن های افقی و عمودی نما را به باکس های کوچکتر و مستقل تقسیم می کند.
- نوع جعبه شفت: در این نوع یکسری از عناصر پنجره جعبه ای در نما قرار داده می شوند. این عناصر توسط شفت های عمودی که در نما به کار رفته است به یکدیگر متصل می شوند. این شفت ها ارتقاء اثر دودکشی را در جداره تضمین می کنند.
- نمای راهرویی: پارتیشن های افقی و عمودی در این نما که به دلیل آکوستیکی، ایمنی آتش، و تهویه به کار رفته اند.
- نمای دو پوسته چند لایه: در این مورد، هیچ پارتیشن افقی و عمودی بین دو پوسته وجود ندارد، تهویه هوای فضای خالی از طریق بازشوهای بزرگی نزدیک کف و بام ساختمان صورت می گیرد.



شکل ۹: شماتیک عملکرد دیوار دو جداره a) حالت سیرکولاسیون داخلی b) ارتباط درون و بیرون در جریان هوا c) سیرکولاسیون خارجی d). اثر دودکشی [43]

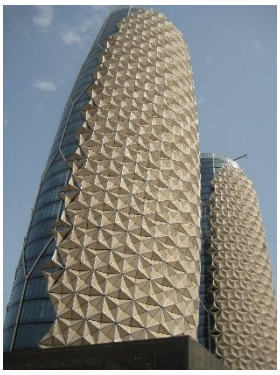
یکی از اولین نمونه های دیوارهای دوجداره دیوار ترومب است. این سیستم از دیواری تشکیل شده است که فاصله کمی از شیشه جلوی آن از دیوار حرارت خورشید را جذب کرده و بخشی از آن را به وسیله اثر همرفتی از طریق اثر دودکشی به داخل ساختمان هدایت می شود. این دیوار می تواند با سیستم فتوولتائیک نیز تلفیق شود (Jianga,2008).

۴-۲- پوسته ساختمانی انطباق پذیر با شرایط آب و هوا [1](CABS)

ایده طراحی چنین نمایی به سال ۱۹۸۱ توسط مایک دیویس (Davis,1981) با ایده دیوار پلی والنت بر می گردد. اما تا سال ها تکنولوژی لازم برای ساخت این دست از نما وجود نداشت و اکنون با پیشرفت های گسترده در حوزه علوم مربوط به مصالح ساخت این نماها میسر گردیده است. نمای پوسته ساختمانی انطباق پذیر با شرایط آب و هوا در امتداد روند رو به رشد گرایش به نماهای دو پوسته شکل گرفته است. لونن و همکارانش (۲۰۱۳) به منظور مشخص کردن تفاوت ها و شباهت ها در این نوع پوسته ها، چهار حوزه گرمایی، بصری، جریان هوا و الکتریکی تقسیم بندی کرده اند و بیان می دارند که اغلب این سیستم ها در بیشتر از یک حوزه عملکرد ساختمان را تحت تاثیر قرار می دهند. در حوزه گرمایی، انطباق نما با شرایط محیطی باعث ایجاد تغییر در تعادل انرژی ساختمان از طریق جریان همرفتی، تابش و ذخیره انرژی می شود. در حوزه بصری این رفتار ادراک مخاطب را از طریق ایجا تغییر در سطوح شفاف پوسته ساختمان تحت تاثیر قرار می دهد. یک نمای قابل انطباق موفق توانایی بالایی در پاسخ به نور متغییر خورشید در طول روز دارد، بدین صورت که علاوه بر این که دید بصری مناسبی را برای فضای داخل به ارمغان می آورد، از ورود نور خیره کنده خورشید به داخل نیز جلوگیری می کند و در مصرف انرژی ساختمان و کنترل دمای داخل نقش بسزایی دارد. در حوزه جریان هوا پوسته ساختمان در برابر جهت و سرعت جریان هوا، رفتاری انطباق پذیر نشان می دهد و در نهایت در حوزه الکتریکی، در سطح نما، ساختمان با سیستم تولید انرژی تلفیق شده و یا مصرف الکتریسته بخشی از مکانیسم انطباقی آن است (Loonen, et al, 2013:484, 487). پوسته نمای قابل انطباق با شرایط آب و هوایی، توانایی ایجاد تغییر مکرر و برگشت پذیر برخی عملکردها، ویژگی ها، و رفتارهایش را در طول زمان و در پاسخ به نیازهای اجرایی تغییر پذیر و شرایط قابل تغییر دارد و این عمل را برای ارتقاء عملکرد کل ساختمان انجام می دهد. پوسته قابل انطباق با شرایط آ ب و هواکه در CABS خلاصه می شود، تنها واژه ای است که به مفهومی که توسط واژه های متعدد دیگر که به وسیله ی محققان توصیف شده اختصاص پیدا می کند. محققان به ای واژه " قابل انطباق"[2] واژگان دیگری را نیز به خدمت گرفته اند مانند؛ فعال، پیشرفته، متحرک، هوشمند، تعاملی، جنبشی، پاسخگو، باهوش، قابل تغییرو ... . هر چند تمامی این واژه ها تا حدی تفاوت هایی معنایی دارند، اغلب به جای یکدیگر به کار می روند ,Loonen (et al, 2013:485). نمونه های هر چند نه گسترده اما متعددی از این نما در دنیا وجود دارد که در این بین می توان به موسسه جهان عرب در پاریس با طراحی ژان نوول[3] (۱۹۸۸)، برج البحر ابوظبی طرح گروه معماری آئداس[4](۲۰۱۲) نام برد

[1] Climate adaptive building shell
[2] Adaptable
[3] Jean Nouvel
[4] Aedas Architects

(شکل ۱۰ و ۱۱).



شکل ۱۰: برج البحر، ابوظبی (نگارندگان)

شکل ۱۱: موسسه جهان عرب، پاریس [24]

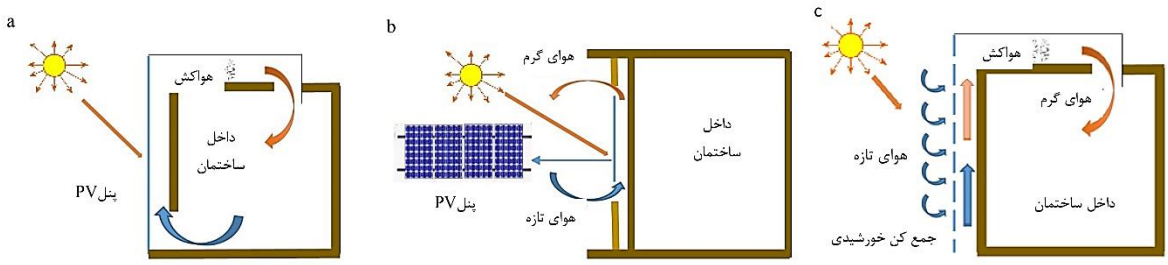
۵-۲- نمای خورشیدی

سال ۱۹۷۰ دپارتمان انرژی آمریکا حامی پروژه هایی گردید که از پنل های فتوولتائیک استفاده می کردند و اولین خانه با استفاده از این پنل ها در سال ۱۹۸۰ ساخته شد.(James, Et al, 2011). منظور از نمای خورشیدی نمای ساختمانی است که با سیستم های فتوولتائیک (BIPV) و یا فتو ولتائیک حرارتی(BIPV/T) و یا مدول های BIST تلفیق شده باشد (شکل ۱۲). سیستم تلفیق شده با پنل های فتوولتائیک متشکل از مدول ها فتوولتائیک است که عملکرد متریال ساختمان را با سیستم ساختمانی تلفیق کرده است و از شیوه های طراحی معماری استفاده می کند. این مدول ها می توانند جانشین متریال های ساختمانی شوند که اساساً برای کاربرد در مکان هایی طراحی شده اند که مدول های نصب می شوند لذا این مدول ها بخشی از جداره ساختمان می شوند (Peng et al:2011). این سیستم می تواند به عنوان جداره ساختمان استفاده شود بنابراین لازم است که داشته حرارتی لازم را کسب کرده که بتواند گرمای مطلوب داخل را حفظ کند و انتقال گرمای کسب شده به محیط داخل را کاهش دهد (Lai& Hokoi,2015: 3). همچنین این سیستم فرصت های مختلفی را برای طراحی در اختیار معمار می گذارد برای مثال از این سیستم می توان به عنوان ابزاری برای سایه اندازی و عنصری نیمه شفاف برای بازشو استفاده کرد (Jelle et al, 2012).

سیستم فتوولتائیک حرارتی سیستمی است که پنل های خورشیدی را با سیستم حرارتی در ساختمان با یکدیگر تلفیق می کند و همزمان انرژی گرمایی و الکتریکی در ساختمان به وجود می آورد. زمانی که بازیابی فعال گرما در یک حلقه بسته تلفیق می شود (مانند PV-T حلقه مایع) و یا در حلقه باز با فشار هوا این سیستم فتوولتائیک حرارتی نامیده می شود. دبارما و همکارانش(۲۰۱۶) در مقایسه ای بین سیستم های فتو ولتائیک و فتوولتائیک حرارتی نتیجه می گیرند که سیستم فتوولتائیک حرارتی از محبوبیت بیشتری در میان معماران و مهندسان برخوردار است و پتانسیل بیشتری برای کاربرد گسترده در ساختمان دارد (Debbarma,et al, 2016).

در این بین سیستم خورشیدی حرارتی که (BIST) در سال ۱۹۴۰ اختراع گردید (Archibald,1999: 2) بدین شکل عمل می کنند که بخش عمده ای از انرژی گرمایی خورشید کسب می شود که کاملاً به وسیله مدول های جمع کننده BIST

جذب شده و این بخش از گرما به جریان واسطی که در حال حرکت است انتقال داده می شودد. گرما در خلال آن انتقال پیدا کرده میان سردکن پمپ گرما و سیال واسط. این تعامل باعث می شود که سیال سرد شده مجدداً گرما را از نما کسب کند و آن را به محیط بعدی انتقال دهد (Zhang et al,2015, Fallahi et al,2010). سیستم BIST تاثیر دو جانبه ای دارد که هم می تواند برای حذف انرژی خورشیدی کسب شده و نیز ذخیره و باز استفاده انرژی خورشیدی که از سطوح دیوار و از طریق مکانیزمی مناسب دریافت می شود استفاده شود (Lai& Hokoi,2015:12). این سیستم بر مبنای واسط انتقال دهنده گرما به مدل های مختلفی تقسیم می شوند که عبارتند از: تکنولوژی BIST بر مبنای هوا، BIST هیدرولیک (خنک کننده،آب، لوله گرما)، بر مبنای مصالح تغییر فاز دهنده [1] (Zhang,2015) .



شکل ۱۲: شماتیک عملکرد سیستم های خورشیدی a) سیستم فتوولتائیک حرارتی b) سیستم فتو ولتائیک c) سیستم خورشیدی حرارتی (نگارندگان)

۶-۲- نمای خورشیدی قابل انطباق

تلفیق میان پنل های فتو ولتائیک نازک[2] و سایبان های متحرک که ASF و یا ASE نام دارد سیستمی را به وجود می آورد که با بیان معماری خود از منظر زیبایی شناسی می تواند در مصرف انرژی و نیز کاهش بار سرمایش و گرمایش ساختمان همراه با تولید الکتریسیته اثرگذار باشد (Nagy,et al,2016) و تکنولوژی قدرتمندی را برای ساختمان های تلفیق شده با سیستم های فتوولتائیک همراه آورد (Kaelin et al., 2004; Chen et al., 2014). مزیت این سیستم نسبت به سایر سیستم های نماهای متحرک در پیچیدگی عملکرد منفرد هر بخش می باشد که به عملکرد چندگانه منتهی می شود (Nagy,et al,2016: 144) . در این سیستم پنل های ASF می توانند در دو محور طول و عرض جغرافیایی نور خورشید را دنبال کنند. ایده این سیستم برای اولین بار توسط روسی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ مطرح گردید (Rossi,et al,2012). آنها ایده جداره خورشیدی قابل انطباق[3] را مطرح کرده و در دیاگرامی پیوند بین سیستم های فتو ولتائیک، رباتیک و معماری را به تصویر کشیدند (شکل ۱۳). این سیستم کاملاً بین رشته ای بوده و مفاهیم انرژی تجدید پذیر، جنبشی، تعامل کاربر، کنترل قابل انطباق و طراحی معماری را با یکدیگر پیوند می دهد. اجزاء در این سیستم می توانند توسط کاربر، حرکت خورشید و یا یک سری حرکت های از پیش تنظیم شده به حرکت درآیند. زمینه نمای متحرک به عنوان جزئی از یک

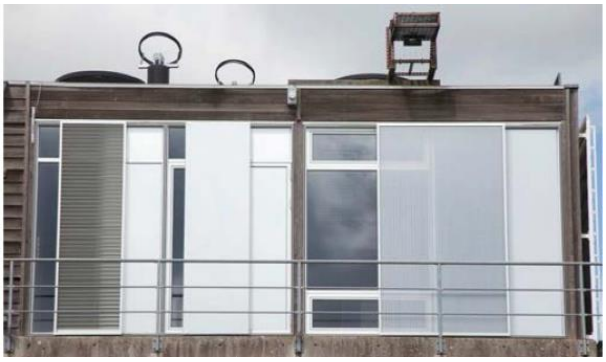
[1] Phase Changing Materials (PCM)
[2] Thin-film PV
[3] Adaptive solar Envelop

ساختمان پایدار، در ابتدای راه خود قرار دارد هرچند همانطور که ولاسکو (Velasco et al. 2015) بحث می کند، این زمینه به دلیل نیاز به عملکرد محیطی بهتر ساختمان و افزایش امکان کنترل با ابزارهای کامپیوتری و الکترونیکی به سرعت در حال رشد است (Nagy,et al,2016: 144, Meagher, 2015). با توجه به قابلیت انطباق این سیستم با شرایط محیطی ذکر این نکته حائز اهمیت است که میتوان این نما را زیر مجوعه نماهای منطبق با شرایط اقلیمی نیز طبقه بندی کرد.

شکل ۱۳: اولیه نمای خورشیدی قابل انطباق [37]

۷-۲- قاب انرژی

جانسن و وینتر (۲۰۱۵) سیستم نمای متحرک خلاقانه ای را معرفی می کنند که قاب انرژی نام دارد (شکل ۱۴). این سیستم نمایی است که به تازگی توسعه پیدا کرده و به صورت صنعتی تولید شده است. قاب انرژی سیستم نمای قاب مدولار است که به بیرون چارچوب پنجره نصب می شود. قاب ها می توانند به صورت افقی و یا عمودی در جلوی پنجره حرکت کنند و برای ساختمان های جدید و ساختمان های موجود مناسب می باشد. این سیستم عملکرد های اصلی نما مانند سایه اندازی، کنترل ورود نور، نمای متحرک با ارزش UV و تهویه طبیعی را به همراه کاهش آلودگی صوتی پاسخ می گوید. آنها همچنین در تحقیق خود نتیجه می گیرند که مجموع نیاز انرژی ساختمان با نمای ثابت در مقایسه با نمای قاب متحرک بیشتر است (Johnsen & Winther, 2015).



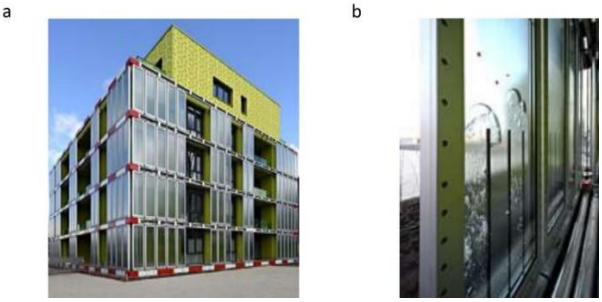
شکل ۱۴: نمونه اولیه قاب انرژی [21]

۸-۲- نماهای بیورکتور میکرو جلبکی

در سال ۲۰۰۹ موسسه مهندسی مکانیک پیشنهاد کرد که کشت جلبک را با ساختمان های موجود به منظور مواجهه با تغییرات آب و هوایی ادغام کنند. فتو- بیو رکتورهایی که با نمای ساختمان آمیخته اند، می توانند به گونه ای طراحی شوند که به طور کار آمد تشعشعات خورشید را در سطح نمای ساختمان جذب کنند. این پنل های پیش ساخته بیورکتورهای پیش ساخته شیوه قابل کنترلی برای کشت جلبک در مقیاس کوچک و بومی را ارائه می دهند (Imec,2009). به علاوه برای کاهش سطح دی اکسید کربن جو، و تامین منبع انرژی طبیعی زیر ساخت های رشد جلبک می توانند به عنوان بافر حرارتی عمل کنند (اگر با نمای دو پوسته ترکیب شوند) ، بدین شکل می توانند مصرف انرژی را کاهش داده و عملکرد ساختمان را بهبود بخشند (Proksch, 2013:155). در این بین پروژه هایی با رویکرد بهره گیری از جلبک برای بهبود عملکرد ساختمان از منظر زیست محیطی طراحی شده اند. هرچند که این رویکرد غالباً در مرحله آزمایش بوده و همانند کاربرد پنل های خورشیدی هنوز به طور گسترده در دنیا با ساختمان بالاخص در مقیاس کوچک آمیخته نشده اند. از این میان می توان به برنده مسابقه طراحی نسل آینده، شرکت HOK ، اشاره کرد که از سوی مجله متروپلیتن در سال ۲۰۱۱ برگزار شد . این شرکت ایده تلفیق ساختمان با فرآیند کشت جلبک را به یک پروپوزال طراحی تبدیل کرد. هر چند نمونه های مذکور در مرحله ایده اولیه باقی مانده اند و هیچ یک به فاز اجرا نرسیده اند اما با این حال در سال ۲۰۱۳ برای اولین بار در هامبورگ به منظور برگزاری نمایشگاه جهانی IBA ساختمان BIQ به عنوان نمونه ای آزمایشگاهی از تلفیق سیستم کشت میکرو- جلبک با نمای ساختمان طراحی و ساخته شد. در این ساختمان در جبهه های جنوب شرقی و جنوب غربی، پوسته دومی از شیشه متخلخل قرار دارد که حاوی میکرو جلبک می باشد در جبهه های مذکور این ساختمان چهار طبقه در مجموع ۱۲۹ بیورکتور در ابعاد ۰.۷ m * ۲.۵m جاسازی شده اند. این جلبک ها با دی اکسید کربن و مواد مغذی به وسیله شبکه ای از لوله ها تغذیه می شوند. نمای این ساختمان جدا از تولید انرژی و عملکرد متداول نما به عنوان عایق حرارتی و صوتی، با ویژگی های ارزشمند دیگری نیز شناخته میشود. گرمای خورشید که توسط جلبک ها مورد نیاز نیست جمع آوری شده و در مته های پر شده از آب نمک[1] ذخیره می شود. تا برای گرمای فضاهای ساختمان و آب استفاده شود. به علاوه جلبک ها سایه قابل انطباقی را با فصول مختلف سال به وجود می آورند، هرچقدر که گرمای خورشید شدیتر شود، جلبک ها بیشتر در داخل نما رشد کرده و

[1] Brine-Filled Boreholes

سایه بیشتری را فراهم می آورند. این نما با عنوان برگ خورشیدی شناخته می شود و نتیجه سه سال تحقیق توسط شرکت کولت اینترنشنال[1] برروی ایده بیورکتور است که توسط شرکت SScLtd توسعه یافته و کار طراحی به وسیله گروه آروپ هدایت شده است، هزینه ساخت را دولت آلمان متقبل شده است.



شکل ۱۵: a) پانل نمای ساختمان مذکور حاوی ریز ساختا زنده، b) ساختمان BIQ [41]

۳- نتیجه گیری

در جدول ۱ تکنولوژی های نمای مذکور از نظر چگونگی کاربرد آنها در ساختمان بر حسب سایه اندازی، کنترل دمای داخل، تولید انرژی های الکتریکی و گرمایی و نیز تهویه و کاهش آلودگی هوا و نیز قابلیت حرکت به همراه چگونگی تعاملشان با نور خورشید مورد بررسی قرار گرفتند. این جدول نشان میدهد که تمامی نماهای مورد بررسی از طریق کنترل دمای داخل و سایه اندازی به بهینه کردن عملکرد حرارتی ساختمان یاری میرسانند. قابل ذکر است که از منظر تحرک سیستم میتوان تقزیبا آنها را با سیستم های الکتریکی متحرک نمود که طبیعتا این امر نیازمند صرف هزینه و تطبیق سیستم نما با تکنولوژی لازم است در این بین سیستم های طراحی نمای محدودی نیز مانند نماهای خورشیدی و بیورکتورهای میکرو جلبکی به همراه سیستم های CABS و ASF علاوه بر کنترل نور خورشید و دمای ساختمان با بهره گیری از انرژی خورشیدی به تولید انرژی نیز می پردازند. در میان تمامی سیستم های نما که با نور و انرژی خورشید تعامل میکنند باغ های عمودی در کنار عملکرد خود به عنوان بافر حرارتی، نقش مهم دیگری را نیز در راستای کاهش آلودگی چه در ساختمان و چه در مقیاس شهری بر عهده دارند. نماهای بیروکتور میکروجلبکی نیز با توجه به نیاز به ریزساختارهای زنده به رشد و انجام فرآیند فتوسنتز، در زیر مجموعه باغ های عمودی طبقه بندی شده است. آنها دی اکسید کربن هوا را تجزیه کرده و اکسیژن تولید میکنند هر چند این نکته حائز اهمیت است که اکسیژن تولید شده در چه جهتی از بیورکتور در ساختمان در فضای داخل، محیط بیرون و یا هر دو تخلیه شود تا بتواند تاثیر بیشتری در کاهش سطح آلودگی فضای داخل و شهر داشته باشد.

آنچه که در تحقیقات آتی مهم مینماید مقایسه این سیستم ها از منظر کارایی آنها در اقلیم های متفاوت است. همچنین بعد اقتصادی آنها با توجه به میزان صرفه جویی آنها در مصرف انرژی نیازمند مطالعات بیشتر است. از سویی دیگر تحقیق و مطالعه بر روی پارامترهای هر سیستم از منظر کنترل عملکرد حرارتی ساختمان و بهینه سازی آن از مواردی است که میبایست در مطالعات آینده مد نظر قرار گیرد.

[1] Colt International

جدول ۱. مقایسه سیستم های مختلف نماهای متعامل با نور و انرژی خورشید (نگارندگان)

چگونگی عملکرد در برابر خورشید	تحرک			کاربرد در ساختمان						انواع نما		
		متحرک		کاهش الودگی هوا	تهویه هوا	تولید انرژی الکتریکی	تولید انرژی گرمایی	سایه اندازی	کنترل دمای داخل			
	ثابت	مکانیکی	دستی									
انعکاس اشعه خورشید و جلوگیری از ورود آن به داخل	✓							✓	✓	خارجی		سایه بان
		✓	✓					✓	✓			
	✓		✓					✓	✓	داخلی		
	✓		✓					✓	✓	میانی		
	✓							✓	✓	پرده های سایه انداز		
گیاهان به مثابه فیلتری برای ورود نور خورشید	✓			✓	✓			✓	✓	نمای سبز	پنل داربست مدولار	* باغ های عمودی
	✓			✓	✓			✓	✓		طناب سیمی و کابل	
	✓			✓	✓			✓	✓	دیوار زنده	دیوار زنده مدولار	
	✓			✓	✓			✓	✓		دیوار با لایه زیرین و پوشش گیاهی	
جذب انرژی خورشید توسط بیورکتورهای یش ساخته و تبدیل به انرژی زیستی علاوه بر عملکرد به عنوان بافر حرارتی	✓			✓	✓		✓	✓	✓	نمای بیورکتور میکرو جلبکی		
کنترل ورود نور خورشید و دمای داخل					✓			✓	✓	قاب انرژی		
جذب نور توسط صفحات فتوولتائیک و حرکت پنل ها در جهت خورشید		✓	✓			✓	✓	✓	✓	ASE		نمای خورشیدی
جذب انرژی خورشید توسط سلول های PV، پخش گرمای خورشید به همراه ذخیره و باز استفاده از آن	✓					✓	✓	✓	✓	BIPV		
جذب انرژی توسط سلول های BIST با واسط انتقال دهنده گرما(هوا)	✓				✓		✓	✓	✓	BIST	برمبنای هوا	

جذب انرژی توسط سلول های BIST با واسط انتقال دهنده گرما(آب، خنک کننده، لوله گرما)			✓						✓	✓	✓	هیدرولیک
جذب انرژی توسط سلول های BIST با مواد تغییر فاز دهنده						✓		✓		✓		متریال تغییرفاز دهنده
جذب انرژی خورشید به وسیله PV/T و تولید انرژی الکتریکی و گرمایی			✓			✓	✓			✓	BIPV/T	
جذب نور خورشید در فضای خالی بین دو پوسته ایجاد اثر گلخانه ای و گرمایش و تهویه هوای داخل	✓	✓		✓				✓				DSF
انطباق با شرایط محیطی به خصوص نور خورشید (فراهم آوردن دید مناسب، جلوگیری از ورود نور خیره کننده و صرفه جویی در مصرف انرژی) به وسیله نمای متحرک مکانیکی		✓		✓	✓	✓	✓					CABS

مراجع فارسی

- خراسانی زاده، حسین، سبزپوشانی، مجید، شیخ زاده، قنبرعلی (۱۳۸۵)، مطالعه و بررسی میزان تاثیر سایبان غیر ساختمانی در کاهش بار برودتی ساختمان، پنجمین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.
- فرهمندفر، زهرا (۱۳۸۹). آیا ایران میتواند انرژی خورشیدی را جایگزین کند؟ مجموعه مقالات از نخستین کنفرانس تخصصی چشم انداز.
- سازمان انرژیهای نو ایران (سانا) a (۱۳۸۷)، گزارش اول :از انرژی های نو چه می دانید :انرژی خورشیدی۱، سازمان انرژیهای نو ایران، تهران.
- سازمان انرژیهای نو ایران (سانا) b (۱۳۸۷)، گزارش ششم :از انرژ ی های نو چه می دانید :انرژی خورشیدی۲، سازمان انرژ یهای نو ایران، تهران.

- **مراجع انگلیسی**

- Archibald, J. (1999). Building Integrated Solar Thermal Roofing Systems History, Current Status and Future Promise, American Solar Roofing Company.
- Bader, S. (2011). High-performance façades for commercial buildings, master thesis in The University of Texas, School of Architecture.
- Belgian Building Research Institute (BBRI). (2002). Source book for a better understanding of conceptual and operational aspects of active facades. Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, Belgian Building Research Institute. Version no 1. Web address: http://www.bbri.be/activefacades/index2.htm.

- Chen, Y. Feng, Z and Verlinden, P. (2014). Assessment of module efficiency and manufacturing cost for industrial crystalline silicon and thin film technologies. In: 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 23-24 November, Kyoto, Japan.
- Davis, M.J.M., Ramirez, F and Pérez, M.E. (2016). More than just a Green Façade: vertical gardens as active air conditioning units, Procedia Engineerin:g, 145: 1250–1257.
- Davies M. (1981). A wall for all seasons. RIBA Journal , 88:2, 55–7.
- Debbarma, M. Sudhakar, K and Baredar, P. (2016). Comparison of BIPV and BIPVT: A review, Resource-Efficient Technologies, 3:3, 263-271.
- Elgizawy, E.M. (2016). The Effect of Green Façade in Landscape Ecology, procedia environmental science, 34, 119-130.
- Fallahi, A. Haghighat, F. and Elsadi, H. (2010). Energy performance assessment of double skin facade with thermal mass. Energy and Building, 42(9), 1499-509.
- Guy, S. and Farmer, G. (2001). Reinterpreting sustainable architecture: the place of technology. Journal of Architectural Education, 53(3),140–8.
- Hunter, A. M, Williams, N. S.G . Rayner, J. P. Aye, L. Hes, D. and Livesley, S J. (2014) .Quantifying the thermal performance of green facades: A critical review. Journal of Ecological Engineering, 63: 102-113.
- Imech, E. (2009). Geo- Engineering Giving Us the Time to Act?, Institution of Mechanical Engineers, London.
- Jacobs, H. (2008). Green Roof Organization. Introduction to Green Walls Technology, Benefits & Design. Green Plants for Green Buildings. https://greenroofs.org.
- James, T. and Goodrich, A. Woodhouse, M. Margolis, R. and Ong S. (2011). Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in the Residential Sector: An Analysis of Installed Rooftop System Prices, National Renewable Energy Laboratory.
- Jelle, B.P. Breivik, C. and Røkenes, H.D. (2012). Building integrated photovoltaic products: a state-of-the-art review and future research opportunities. Solar Energy Materials and Solar Cells, 100: 69-96.
- Jianga, B. and JiJ, Y. (2008). The influence of PV coverage ratio on thermal and electrical performance of photovoltaic-Trombe wall. Renewable Energy. 33:2491–8.
- Johnsen, K. and Winther F. V. (2015). Dynamic facades, the smart way of meeting the energy requirements. 6th International Building Physics Conference, IBPC Energy Procedia,78:1568 – 1573.
- Kaelin, M. Rudmann, and D. Tiwari A. (2004). Low cost processing of CIGS thin film solar cells. Solar Energy, 77 (6):749–756.
- Lai, C-M. and Hokoi, S. (2015). Solar façades: A review. Building and Environment, 91, 1-14.
- Loonen, R.C.G. Trčka, M., D.Cóstola, M. J. and Hensen, L.M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges, J Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25: 483–493.
- Mahdinejad, M. Mahdavinejad, M. and Ashtiani, S. R. (2014). Thermal Behaviour of Double Skin Buildings, J Energy Technologies and Policy, 9:4, 14-1.
- Meagher, M. (2015). Designing for change: the poetic potential of Responsive architecture. Frontiers of Architectural Research. 4:2, 159–165.
- Nagy, Z. Svetozarevic, B. Jayathissa, P. Begle, M. Hofer, J,. Lydon, G. Willmann, A. and Schlueter A. (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. J Frontiers of Architectural Research, 5, 143–156.

- Oesterle, E, LiebR-D, Lutz, M,. and Heusler W. (2001). Double Skin Facades – Integrated Planning. Prestel Verlag: Munich, Germany. .
- Othman, A. R. Sahidin, N. (2016).Vertical Greening Façade as Passive Approach in Sustainable Design, Procedia Social and Behavioral Sciences. 222, 845 – 854.
- Pacheco, R. Ordóñez, J. Martínez ,G.(2012). Energy efficient design of building: a review. J Renewable and Sustainable Energy Reviews.16:6, 3559–3537.
- Peng, C. Huang, Y. and Wu, Z. (2011). Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. Energy and Buildings, 43:12, 3592–3598.
- Pérez, G. Rincon, L. Vila, A. Gonzalez, JM. and Cabeza, LF. (2011). Behaviour of green facades in Mediterranean continental climate. Energy Conversion and Management, 52:4, 1861–1867.
- Poirazis, H. (2006). Double Skin Façades, A Literature Review, Department of Architecture and Built Environment, Division of Energy and Building Design. Lund University, Lund Institute of Technology, Lund.
- Porteous, C. and MacGregor K. (2005). Solar architecture in cool climates. London, UK: Earth scan.
- Proksch, G. (2013). growing sustainability- integrating Algae cultivation into built environment, edinburg architectural research journal, 33.
- Roaf, S. Chrichton, D. and Nicol, F. (2009). Adapting buildings and cities for climate change —A 21st century survival guide. Oxford: Elsevier.
- Rossi, D. Nagy, Z. and Schlueter, A. (2012). Adaptive distributed robotics for environmental performance, occupant comfort and architectural expression. International Journal of Architectural Computing, 10:3, 341–360.
- Timur, ö.B. and E. vertical garden, licensee InTech, 2013.
- Vanderhulst, P. Lanser, H. Bergmeyer, P. Foeth, F. and Albers, R. (1990). Solar Energy, Small scale applications in developing countries. Amsterdam: Stichting TOOL.
- Velasco, R. Brakke, A.P. and Chavarro D. (2015). Dynamic façades and computation: towards an inclusive categorization of high-performance kinetic façade systems. In: Computer-Aided Architectural Design Futures. The Next City—New Technologies and the Future of the Built Environment. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. 172–191.
- Wurm, J. (2018). Worldwide first façade system to cultivate micro-algae to generate heat and biomass as renewable energy sources. accessed 1 December 2018, https://www.arup.com/projects/solar-leaf,2018
- Zhang, X. Shen, J. Tang, L. Yang, T. Xia, L. Hong, Z. Wang, L. Wu, Y. Shi, Y. and Xu P, Shengchun, L. (2015). Building Integrated Solar Thermal (BIST) Technologies and Their Applications: A Review of Structural Design and Architectural Integration, J Fundamental Renewable Energy Applications, 5:5, 2-21.
- Zhou, J, Chen Y. (2010). A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot summer and cold-winter zone in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 1321–1328.