بررسی و ارزیابی عملکرد انواع دیوار ترومب در ساختمان های مسکونی [1]

پریسا صفرپورفیضی، دانشجویی ارشد مهندسی معماری، گروه مهندسی معماری، دانشگاه رازی، کرمانشاه،
p.safarpour@stu.razi.ac.ir
عباس مهروان*، استادیار گروه مهندسی معماری، دانشگاه رازی، کرمانشاه،
a.mahravan@razi.ac.ir

چکیده:

بحران های انرژی و آلودگی های زیست محیطی دو مانع اساسی هستند که زندگی بشر امروزی را تحت تأثیر قرار می دهند. کاربردهای ساختمان انرژی خورشیدی به دلیل مزایای قابل توجهی که در توسعه پایدار دارند، در چند دهه اخیر توجه روزافزونی را از سوی محققان، مهندسان، تجار و مسئولان به خود جلب می کند. از آنجایی که بخش ساختمان با افزایش جمعیت به رشد خود ادامه می دهد، به همین ترتیب تقاضا برای مصرف انرژی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش ساختمان ها برای ارتقاء آسایش حرارتی افزایش می یابد برای مقابله با این مشکل، از تکنیک هایی مانند طراحی ساختمان های سبز برای معماری پایدار استفاده شده است ساختمان های کم مصرف کارآمد نیاز دارند که پوشش ساختمان از مراحل اولیه به دقت طراحی شود و گرمایش خورشیدی ایستا یکی از استراتژی های طراحی معماری برای استفاده کارآمد از انرژی می باشد. فن آوری های خورشیدی غیرفعال (سامانه های ایستا)، مانند دیوارترومب، می توانند به کاهش تقاضای انرژی گرمایشی کمک کنند و دیوار ترومپ از مهمترین سامانه های ایستا می باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی و شناخت انواع دیوار ترومب در ساختمان های مسکونی پرداخته است. هدف پژوهش بررسی انواع دیوار ترومب در راستای بهینه سازی ساختمان های مسکونی می پردازد. روش تحقیق مقاله به صورت توصیفی- تحلیلی به مطالعه و شناخت دیوار ترومب به گرداوری داده ها پرداخته است. بررسی ها نشان میدهد که طبقه بندی و معیارهای ارزیابی،بر 10نوع دیوار ترومب تمرکز دارد. که به تفصیل، با توجه به مصالح، ساختار و عملکرد آنها معرفی شده است.که بهترین عملکرد دیوار ترومب با مواد تغییر فازدهنده PCM است که باعث افزایش کارایی انرژی و بهبود ظرفیت کلی ذخیره‌سازی حرارت انرژی به شکل گرمای محسوس وکاهش مصرف برق می شود.

کلیدواژه: دیوار ترومب،پایداری، عناصر سازه ای دیوار ترومب

[1] این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول با عنوان« طراحی مجتمع مسکونی پایدار کم کربن در کرمانشاه بر اساس سیاست ها و راهبردهای توسعه پایدار» است که با راهنمایی نویسنده دوم (مسئول) می باشد.

مقدمه

توسعه جامعه و بهبود استانداردهای زندگی سرعت مصرف انرژی های فسیلی را افزایش می دهد که نتیجه آن تشدید بحران انرژی است. ساختمان ها به عنوان مصرف کننده اصلی انرژی، 40 درصد از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص می دهند (Xie et al., 2021) که با افزایش جمعیت و تغییر شرایط اقتصادی، این نسبت در حالافزایش است (Wu et al., 2020). به همین دلیل، درخواست منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت های فسیلی، یک موضوع تحقیقاتی بسیار پویا بوده است .در این زمینه، گنجاندن روش های جدید واستفاده از انرژی های تجدیدپذیر در مدیریت سیستم های انرژی ساختمان موضوع مهمی است که در سال های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Xiong et al, 2022). انرژی خورشیدی نقش مهمی برای بشر ایفـا می کند. سـاختمان های سبز و معماری پایدار، تکنیک های جدید برای پرداختن بـه بحران های زیست محیطی و انرژی می باشد(Zohdi al et .,2015). گرمایش خورشیدی ایستا یکی از استراتژی های کارآمد طراحی معماری در استفاده از انرژی خورشید برای گرم کردن خانه و صرفه جویی در مصرف انرژی است. طراحی زیست اقلیمی نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی ساختمان می شود بلکه منجر به کاهش هزینه های مربوط به لوازم گرمایش و تعمیر آنها می شود (Shixin and Moon, 2016). سیستم های خورشیدی ایستا، یکی از گزینه و راه حل هایی است که به توسعه و نصب سیستم های ساخت و ساز پایدار در ساختمان سازی جدید و ساختمان های موجود کمک می کنند (Simões Nuno, Ines and Mario, 2015؛قدیری مقدم و همکاران ،1398). اتخاذ راه حل های غیرفعال برای گرمایش و سرمایش به یک نقطه اصلی در تلاش برای دستیابی به ساختمان های کم انرژی تبدیل شده است. معماری ساختمان باید در مرحله طراحی اولیه به طور مناسب تعریف شود و مستلزم تطبیق آن با شکل و پیکربندی ساختمان برای به حداکثر رساندن بهره برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر، مانندتابش خورشیدی و استفاده از دستگاه های غیرفعال مطابق با رویکرد معماری زیست اقلیمی باشد. دیوارهای خورشیدی راه حل جالبی در این زمینه است (Bevilacqua et al.,2019). استفاده بهینه از انرژی درساختمان نه تنها در فصل زمستان بلکه باید در طول سال انجام گیرد. گرمایش و سرمایش عناصر ساختمانی، سایه، کیفیت هوای فضاهای داخلی، نور طبیعی مناسب و طراحی ساختمان از مهمترین مسائل در این راستا می باشد. استفاده اصلی گلخانه، گرمایش خورشیدی است و بر بهره وری انرژی در خانه در فصل زمستان اثرات مطلوب دارد(قدیری مقدم و همکاران ،1398).
دیوار ترومب، نوعی تکنیک خورشیدی غیرفعال معمولی است که به طور گسترده در گرمایش فضای خورشیدی استفاده می شود مزایایی مانند ساختار ساده، راندمان حرارتی بالا، مصرف انرژی صفر می باشد. دیوار سیاه شده تابش خورشید را جذب می کند و هوای کانال را گرم می کند که می تواند گرما رابه وسیله همرفت طبیعی به اتاق بدهد و مقداری از گرما در دیوار جرم حرارتی ذخیره می شود و در صورت عدم وجود نور خورشید به اتاق رها می شود. هوای گرم شده توسط دیوار ترومب همچنین می تواند برای سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع مورد استفاده قرار گیرد و روشی موثر برای کاهش گرمایش و بارهای (HVAC) ساختمان تهویه است (Wu et al., 2020). از جمله مزایای مهم این سیستم گرمایشی، عملکرد اقتصادی بهتر برای چرخه زندگی است که اگر به طور گسترده ای استفاده شود. این سیستم از مهمترین سیستم های خورشیدی می باشد، که عملکرد مهمی در راستای بهبود مصرف انرژی دارد درساختاردیوار ترومپ، دیوار رو به خورشید از طریق شیشه و یک فضای خلا (هوا) از فضای بیرون جدا می شود. استفاده از دیوار ترومپ به عنوان سیستم گرمایشی غیرفعال خورشیدی به طور گسترده ای در آب و هوای سرد دیده می شود و تعداد زیادی از پارامترها و طیف گستردهای از شرایط آب و هوایی، از جمله اثر متفاوت سرعت و دمای هوای مجرای ورودی، تابش خورشیدی، سرعت باد، ارتفاع دیوار، درجه حرارت محیط و غیره در بهره وری از دیـوار ترومپ مؤثر است (قدیری مقدم و همکاران ،1398).
از این رو استفاده از دیوار ترومپ، به بهبود و شرایط آسایش داخلی ساختمان کمک می کند و موجب کاهش مصرف انرژی می گردد، همچنین می تواند برای همتایان خود مفید واقع می شود و توسعه فنی دیوار ترومب را تسهیل کند. پژوهش حاضر در نظر دارد با هدف بررسی و شناخت انواع دیوار ترومب در ساختمان های مسکونی بپردازد که به این منظور ضمن مرور ادبیات تحقیق و پژوهش های مرتبط، را مورد بررسی قرار داده است.

سوال و روش تحقیق

در این مقاله با ارائه روش تحقیق مورد استفاده چگونگی جمع آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل آنها درجهت پاسخگویی به شناخت دیوار ترومب مطرح می شوند.ماهیت این پژوهش به روش توصیفی-تحلیلی انجام می شود. داده ها و اطلاعات مود نیاز برای پاسخگویی به سوال تحقیق عبارتند از:مفاهیم مرتبط با پایدار، انواع دیوار ترومب، عناصرسازه ای دیوار ترومب می باشد. این آمارواطلاعات موجود در منابع معتبر خارجی و داخلی بدست آمده اند.

پیشینه تحقیق

پژوهشگران در رابطه با پژوهش های انجام شده در زمینه بررسی انواع دیوار ترومب در راستای بهینه سازی ساختمان های مسکونی با توجه به اهمیت دیوار ترومپ در ساختمان ها، این پژوهش به بررسی این سیستم می پردازد. تاریخچه ساخت دیوار ترومب به اواخر قرن نوزدهم باز میگردد. در سال 1881 ،ادوارد مورس[1] برای اولین بار ایده استفاده از انرژی خورشیدی درسیستم های مهندسی یک ساختمان را بیان کرد و روشی را بررسی کرد و دستگاه خود رابرای گرم کردن یک اتاق ثبت اختراع کرد. ادوارد مورس مفهوم دستگاه کاربردی را براساس همرفت طبیعی بین هوای اتاق و فاصله شکاف دستگاه استوار کرد. در سال 1940 ،فرد کک[2] ساختمان خانه ای کم ارتفاع را طراحی کرد. او دیوارهای داخلی و کف اتاق را با رنگ سیاه رنگ آمیزی کرد. تبدیل تشعشعات خورشیدی به انرژی حرارتی و انباشت آن برای گرم کردن اتاق در شب امکان پذیر شد. در سال 1946 ، آرتوربراون[3] پروژه خود را برای یک ساختمان کم مرتبه توسعه داد، جایی که تمام محله های زندگی با راهرویی از نمای جنوبی ساختمان با حداکثر لعاب محصور شده بود. در راهرو،تمام دیوارها و کف سیاه رنگ شده بودند که به تجمع انرژی حرارتی ناشی از تشعشعات خورشیدی

[1] Edward Morse
[2] Fred Keck
[3] Arthur Brown

برای گرم کردن در شب کمک می کرد. بر اساس نتایج تحقیقات در سال 1967 ،فلیکس ترومب[1] و ژاک میشل[2] یک ساختمان آپارتمانی کم مرتبه طراحی کردند، جایی که برای اولین بار از سیستم گرمایش خورشیدی غیرفعال ثبت شده آنهااستفاده شد. این سیستم به عنوان دیوار کلاسیک ترومب شناخته می شود (Sergei, Shen and Jiang, 2020)؛(Wang et al, 2020) .

مبانی نظری

معماری پایدار:

معماری پایدار به اختصار به آنگونه از معماری گفته می شود که ملاحظات محیطی و سازگاری با اقلیم را مد نظر دارد و بر اساس بهره برداری مؤثر از منابع طبیعی طراحی و ساخته میشود(زرین و همکاران ،1399). مفهوم پایداری در معماری این نیست که بناهایی خلق کنیم که صرفا عمر زیادی را سپری کنند چون ممکن است یک بنا با عمر چندین صد ساله با نیازهای زمان حال هماهنگی نداشته باشد آن معماری را می توان پایدار نامید که به نیازهای زمان حال خود پاسخگو باشد. اول: طبیعت که بستر هر گونه خلق فضایی است طبیعت و ارتباط با آن و چگونگی برخورد در استفاده و حفظ و نگهداری آن یکی از ریشه های اصلی پایداری است(ضرغامی و همکاران،1395)

در مناطقی که ریشه‌های زیست‌محیطی پایداری از اهمیت ثانویه برخوردار هستند. در چنین حوزه‌هایی ، نزدیک‌ترین تعریف از پایداری "برای حفظ وضعیت موجود و نابود نشدن" است. تعریف‌های دیگری از پایداری عبارت‌اند از: "هر چیزی که رفاه جوامع و محیط را تضمین کند"یا "یک مفهوم اخلاقی که در آینده اوضاع بهتر از حال حاضر باشد" تفکر در مورد پایداری به‌عنوان "طول عمر" نیز یکی دیگر از راه‌های نزدیک شدن به این مفهوم است ، به این معنی که "هرچه یک سیستم بیشتر حفظ شود ، پایدارتر است"؛ "توانایی حفظ کیفیت نامعلوم رفاه انسان ، برابری اجتماعی و یکپارچگی محیط‌زیست در دوره‌های نامشخص". اهداف اصلی توسعه پایدار را "حفاظت و نگهداری از منابع طبیعی و فرهنگی برای آینده و کاهش تغییرات" توصیف می‌کنند و برخی از اقدامات ملموس پایداری مانند "کاهش مصرف کربن و سایر منابع طبیعی" را برجسته می‌کنند(Roostaie et al., 2019). تمام اصل معماری پایدار باید در یک پروسه کامل که منجر به ساخته شدن محیط زیست سالم می شود، تجسم یابد(Araujo et al.,2020)

مصرف انرژی در ساختمان و راه کارهای کاهش آن

امروزه دستیابی به توسعه پایدار هدف بسیاری از کشورهای جهان است چرا که منابع انرژی در جهان محدود است با توجه به رویکرد کشور برای کاهش وابستگی به منابع نفتی و نیاز به کاهش مصرف انرژی در بخش های مختلف صنعت و ساختمان و بالا بودن مصرف انرژی در ساختمان، آنها به عنوان اولین گزینه در زمینه توجه به راهکارهای صرفه جویی در مصرف انرژی محسوب میشوند (محرمی و همکاران،1398)ساختمان ها بیشترین سهم (تقریبا40 درصد) در کل انرژی مصرفی نهایی در کشور را شامل می شود حدود نیمی از مصررف انرژی ساختمان برای گرمایش و تهویه هوا است. این امر به دلیل افزایش تقاضای انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای به یک مشکل تبدیل شده است به منظور کاهش مصرف در ساختمان ها، درک عملکرد انرژی ساختمان لازم به نظر می رسد (جهانگیر و همکاران ،1401) استفاده از سامانه های ایستا و پویا برای بهره گیری از انرژی خورشیدی میتواند راهکاری موثر در کاهش مصرف سوختهای فسیلی باشد(محرمی و همکاران،1398)

ساختمان سبز با بنا کردن ساختمان های سازگار با محیط زیست و حفظ انرژی در آن تعریف می شود. انرژی یکی از ضروری ترین عوامل جهت تداوم زندگی بشر و توسعه ی کشورها است. که در کنار سایر عوامل تولید نظیر کار، سرمایه و مواد اولیه، نقش تعیین کننده ای در اقتصاد کشور و همچنین بر محیط زیست و زندگی انسان ها ایفا می کند(بیرق شمشیر و سرکرده ئی،1401). معماری مسکونی سبز با توجه به جنبش سبز صورت گرفته است که این رویکرد سیستم‌های انرژی را برای کاهش تقاضا ، تأمین انرژی تجدید پذیر و ذخیره‌سازی انرژی ادغام می‌کند (Bassas, Patterson and Jones 2020)

در دهه های گذشته طرح های مختلف ساختمان های خورشیدی پیشنهاد شده اند که دیوار ترومب[3] به دلیل پیکربندی ساده، راندمان بالا و هزینه های جاری صفر آن را از باقی متمایز می کند (Xie et al, 2021). یکی از راه های کاهش مصرف انرژی دیوار ترومب است که نوعی دیوار ذخیره ساز حرارتی تیره رنگ، رو به جنوب و از جنس مصالح با ظرفیت حرارتی بالا که توسط پوششی شفاف در فاصله ای کم پوشانده میشود پوشش شفاف شیشه ای یا پلاستیکی با فاصله ای حدود 1 تا 05 سانتی متر از دیوار قرار دارد دیوار توسط تابش خورشید پس از عبور آن از لایه ی شفاف، گرم می شود، هوای داخلی را گرم کرده و گرما را نیز در خود ذخیره میکند میزان جذب انرژی گرمایی خورشید توسط دیوار ترومب به چهار عامل بستگی دارد: 1-نوع دیوار (سیمان، آجر، آب) -2 ضخامت دیوار 3- مساحت دیوار ترومب نسبت به کل دیوارها -4 تعداد لایه های شیشه(یک جداره، دوجداره، سه جداره) (محرمی و همکاران،1398)

دیوارترومب

سیستم های خورشیدی زیادی برای بهره برداری از انرژی خورشیدی توسط مهندسان طراحی شده اند که یکی از این سیستم ها دیوار ترومب است. دیوار ترومب همیشه در جهت جنوبی ساختمان ها ساخته می شود تا گرمای خورشیدی را در تمام طول سال به حداکثر برساند. که این دیوار از بتن، یا آجر یا هر مصالح ساختمانی نگهدارنده گرما ساخته شده است، دیوار به رنگ سیاه برای افزایش جذب تابش خورشیدی است. یک یا چند لایه شیشه در فاصله معینی از دیوار ثابت می شوند تا میزان جذب تابش خورشیدی افزایش یابد . سیستم های دیوار ترومب به طور کلی به دو مدل تقسیم می شوند: مدل های تهویه شده و بدون تهویه است. در مدل اول، دیوار سیاه انرژی خورشیدی را برای افزایش دمای خود جذب می کند و هوای عبوری بین پوشش شیشه ای و این را افزایش می دهد. دیوار برای جذب و انتقال گرما به اتاق

---

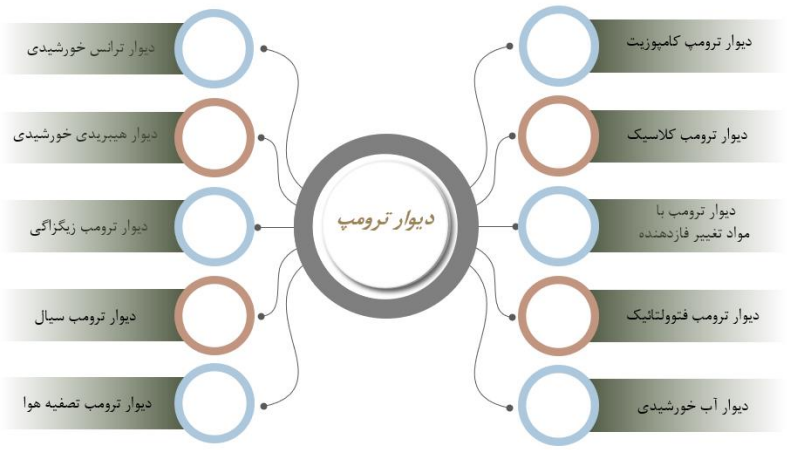
[1] Felix Trombe
[2] Jacques Michel
[3] Trombe Wall

از طریق جریان های همرفتی عمل می کند و این طرح را مدل تهویه دار می نامند. در حالی که در مدل دوم که مدل بدون هوا نامیده می شود، دیوار مشکی رنگ شده تابش خورشید را جذب می کند که دمای آن را بالا می برد و این گرما توسط تابش به داخل اتاق منتقل می شود (Abdullah et al, 2022).

یافته ها

انواع دیوارترومب

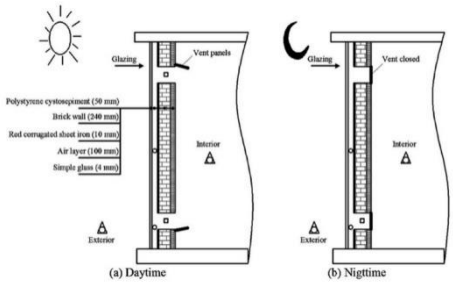
امروزه10 نوع مختلف دیوار ترومب وجود دارد: دیوار ترومب کلاسیک؛ دیوار ترومپ کامپوزیت؛ دیوار ترومب با مواد تغییر فازدهنده؛ دیوار ترومب فتوولتائیک؛ دیوار آب خورشیدی؛ دیوار ترانس خورشیدی؛ دیوار هیبریدی خورشیدی؛ دیوار ترومب زیگزاگی؛ دیوار ترومب سیال؛ دیوار ترومب تصفیه هوا (Xiong et al,2022)؛ (Wang et al, 2020)؛(Sergei, Shen and Jiang, 2020)؛ (Yu, Li and Ji,2019)؛ (Abdullah et al., 2022). (شکل1)



شکل1- انواع دیوار ترومب (نگارنده)

دیوار ترومب کلاسیک[1]

دیوار ترومب کلاسیک نشان داده شده در شکل 2 عمدتا باهمرفت طبیعی کار می کند، زیرا دیوار مستقیما رو به فضای مورد نظر برای گرمایش است.دیوار انرژی گرمای خورشید را از طریق شیشه جذب می کند .پس از آن، دمای هوای کانال افزایش می یابد و به دلیل همرفت طبیعی و پدیده ترموسیفون، هوا از طریق دریچه بالایی وارد اتاق می شود .گردش هوا بخشی از انرژی گرمای خورشید را به اتاق منتقل می کند .بستن دریچه ها در شب از برگشت و خروج گرما از فضا جلوگیری می کند.پدیده ترموسیفون معکوس در برخی از شب ها و در زمستان مشاهده می شود .در واقع هنگامی که دمای دیوار نسبت به اتاق سردتر می شود، گردش هوا در کانال از بالا به پایین خواهد بود و دمای اتاق را کاهش می دهد. ساخت یک دیوار کلاسیک ترومب بر اساس استفاده از مواد ذخیره سازی گرما از جمله آجر، بتن، سنگ و خشت خام است .برای افزایش جذب انرژی خورشیدی، سطح بیرونی آن سیاه است و معمولا فاصله هوا بین دیوار و شیشه از 3 تا 10 سانتی متر متغیراست (Xiong et al,2022).



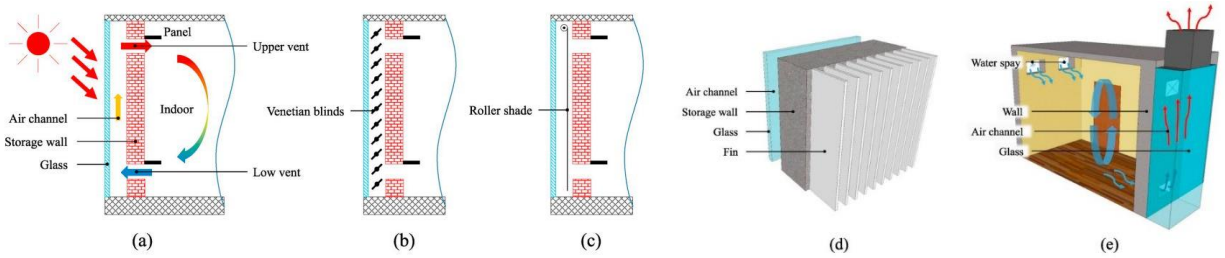
شکل2-دیوار ترومب کلاسیک(Sergei, Shen and Jiang 2020)

دیوار کلاسیک ترومب عمدتاً از چهار قسمت تشکیل شده است: شیشه، کانال هوا، دیوار ذخیره حرارتی و دریچه (در برخی موارد، هیچ دریچه ای وجود ندارد). دیوار ذخیره حرارتی با موادی با ظرفیت حرارتی بالا ساخته شده است تا بتوان تابش خورشیدی جذب شده را برای مدت طولانی ذخیره کرد. سطح دیوار معمولاً با رنگ مشکی پوشانده می شود تا جذب خورشیدی بالاتری داشته باشد. شیشه برای انتقال نور و ایجاد اثر گلخانه ای در کانال هوا استفاده می شود. سپس یک چرخه گرمایش فضا به دلیل اختلاف چگالی هوا بین کانال گرم و اتاق سرد ایجاد می شود، همانطور که در شکل(3الف) ارائه شده است. به طور کلی، دریچه ها با پنل هایی کار می

[1] classic Trombe wall

کنند که برای جلوگیری از پدیده معکوس ترموسیفون در طول شب که دمای بیرون پایین است و تابش خورشیدی وجود ندارد، خاموش می شوند (Wang et al, 2020).

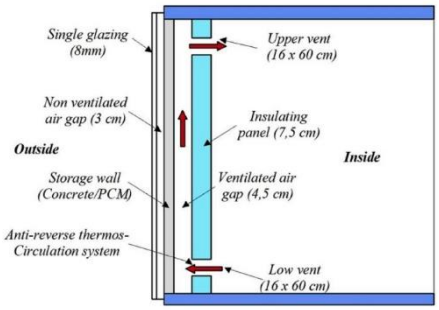
برای افزایش راندمان حرارتی دیوار کلاسیک ترومب، راه حل های مختلف طراحی دیوار انجام شد. دریچه های هوای خودکار، فن ها، دریچه تهویه[1]، پوشش های عایق محافظ و راه حل های دیگر وجود دارد. این زیر گونه، دیوار ترومب اصلاح شده[2] نامیده می شود که بسیاری از محققان مجموعه ای از تغییرات را در ساختار آن پیشنهاد کرده اند. به عنوان مثال، یک سایه غلتکی را می توان برای جلوگیری از گرمای بیش از حد خورشید در تابستان اضافه کرد (شکل 3ب و ج). علاوه بر این، باله های حرارتی را می توان به سطح دیوار داخلی متصل کرد تا انتقال حرارت را در زمستان بهبود بخشد. (شکل 3د). علاوه بر این،هنگامی که دیوار ترومب در تابستان به عنوان یک دودکش خورشیدی عمل می کند، میتوان یک سیستم پاشش آب در دریچه های دیوار مقابل نصب کرد تا از طریق تبخیر آب خنک شود(شکل 3ه) (Sergei, Shen and Jiang, 2020)؛(Wang et al., 2020) .



شکل3-.الف) دیوار کلاسیک ترومب و مقاوم سازی آن با (ب) سایه غلتکی، (ج) کرکره، (د) باله های حرارتی داخلی یا (ه) سیستم پاشش آب(Wang et al., 2020)

دیوار ترومب کامپوزیت[3]

به دلیل مقاومت حرارتی کم دیوار ترومب کلاسیک ، اتاق داخلی به راحتی تحت تأثیر محیط بیرون قرار می گیرد و تلفات حرارتی قابل توجهی وجود دارد. برای غلبه بر این اشکالات، یک دیوار ترومب مرکب، که به عنوان دیوار ترومب-میشل نیز شناخته می‌شود، ساخته شد. این دیوار از شش جزء شیشه، کانال هوای بدون تهویه، دیوار ذخیره حرارتی، کانال هوای تهویه شده، لایه عایق و دریچه تشکیل شده است شکل4 اصل عملکرد دیوار کامپوزیت ترومب را نشان می دهد این طرح می تواند مشکل از دست دادن گرما را از طریق یک دیوار عظیم در شب حل کند. هنگام مقایسه بازده حرارتی دیوار ترومب کامپوزیت با دیوار کلاسیک ترومب، می توان اشاره کرد که در هوای صاف، شار حرارتی از دیواره ترومب کلاسیک چندین مرتبه بزرگتر از دیوار کامپوزیت ترومب است. با این حال، تمام بازده حرارتی دیوار کلاسیک ترومب در هوای مبهم ناپدید می شود. این اثر نتیجه کار عایق دیوار است که به طور قابل توجهی از دست دادن حرارت از طریق دیوار ترومب کامپوزیت را کاهش می دهد. ضخامت دیوارهای عظیم و عایق بستگی به شرایط آب و هوایی دارد (Sergei, Shen and Jiang, 2020) ؛(Wang et al., 2020) .



شکل4-.دیوار ترومب کامپوزیت(Sergei, Shen and Jiang, 2020)

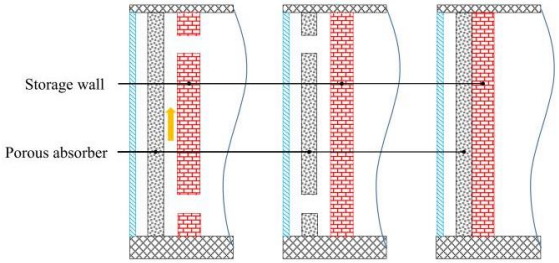
علاوه بر مشکل گردش حرارت معکوس دیوار ترومپ کامپوزیت مشکلات دیگری نیز دارد. در شرایط آب و هوایی شدید، تفاوت دما می تواند بسیار قابل توجه باشد. در نتیجه، رطوبت می تواند در دیوار عظیم ایجاد شود. علاوه بر این، دیوار عظیم به دلیل رطوبت، تراکم روی سطح ایجاد می کند. اگر مانع بخار مناسب و عایق رطوبتی لایه عایق حرارتی نادیده گرفته شود، ممکن است تشکیل قالب روی لایه عایق حرارت ظاهر شود. این شرایط تأثیر زیادی بر آب و هوای اتاق داخلی دارد. بسته به شرایط آب و هوایی، ضخامت دیوار می تواند بسیار متفاوت باشد. با توجه به آنچه، فضای مفید اتاق کاهش می یابد و ساخت و ساز گران تر می شود. همچنین، مقدار نور خورشید در روز کاهش می یابد تا اتاق را روشن کند، زیرا، اغلب، دیوار ترومپ کامپوزیت دارای دهانه پنجره نیست. در طول فرآیند عملیات، تمیز کردن فضای بین شیشه و دیوارها از گرد و غبار و خاک ممکن است دشوار باشد(Sergei, Shen and Jiang, 2020).

متفاوت از دیوار کامپوزیت ترومب فوق الذکر، دیوار ترومب کامپوزیت جدید با جاذب متخلخل است همانطور که در شکل5 نشان داده شده است. در این نوع دیوار، جاذب متخلخل اضافه شده به عنوان یک بافر ذخیره گرما عمل می کند که در ابتدا گرمای خورشیدرا جذب می کند و سپس آن را در هوای کانال یا دیوار ذخیره حرارتی

---

[1] ventilating louver
[2] modified trombe wall
[3] composite trombe wall

توزیع می کند.علاوه بر این، این جزء متخلخل همچنین می تواند به عنوان یک عایق نیمه حرارتی عمل کند تا مقاومت حرارتی دیوار ترومب را افزایش دهد و از اتلاف گرما در روزهای ابری یادر شب که تابش خورشیدی در دسترس نیست جلوگیری کند(Wang et al., 2020).



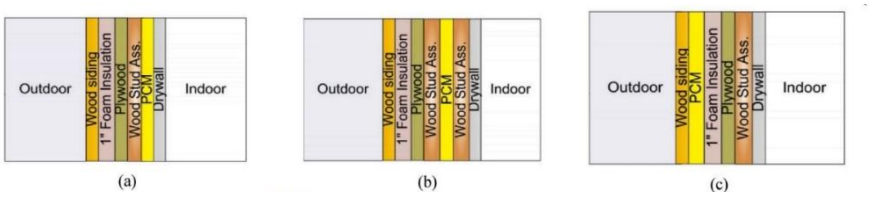
شکل 5-یک دیوار ترومب کامپوزیت جدید با جاذب متخلخل(Wang et al. 2020)

دیوار ترومب با مواد تغییر فازدهنده PCM[1]

ادغام PCM در پوشش‌های ساختمان، یعنی دیوارها و سقف‌ها، وسیله‌ای کارآمد برای بهبود ظرفیت کلی ذخیره‌سازی حرارت انرژی به شکل گرمای محسوس ساختمان است که باعث افزایش کارایی انرژی و کاهش مصرف و نیازهای برق می‌شود. PCMدر حین تغییر فاز به ذخیره گرما کمک می کند. در شرایط آب و هوایی گرم، PCMذوب می شود و گرما را جذب می کند، که به کاهش دمای اوج کمک می کند و انتقال گرما را در داخل خانه به تاخیر می اندازد. از سوی دیگر، در شرایط آب و هوایی سرد، با انجماد انرژی آزاد می کند که به گرمایش و آسایش حرارتی کمک می کند. اگر در طول یک روز تجزیه و تحلیل شود، PCMگرما را در طول روز، زمانی که نیاز به خنک کردن است، جذب می‌کند و در شب، زمانی که به گرمایش نیاز است، آن را آزاد می‌کند. بنابراین، راندمان سرمایش و گرمایش هر دو بهبود می یابد(Sergei, Shen and Jiang, 2020).

PCMها می توانند انرژی حرارتی را در رویکردهای تبدیل فاز بعدی ذخیره کنند: 1 .جامد-جامد (هیچ مایع یا گازی تولید نمی شود و نیازی به محبوس شدن کپسول ندارد) 2 .مایع-جامد3 .گاز جامد4 .گاز مایع.در میان این روش‌ها، تغییر فاز جامد-مایع در میانPCM های تجاری مشترک است و برای کاربردهای ساختمانی ترجیح داده می‌شود. مهمترین معیار انتخاب PCM مناسب داشتن دمای ذوب در محدوده کاربردی است. بنابراین یک نقطه ذوب مناسب و آنتالپی PCMها برای کاربردآن ضروری است. PCM ها عمدتاً به آلی (پارافین و غیر پارافین)، معدنی (هیدرات نمک و فلز) و یوتکتیک تقسیم می شوند (Xiong et al.,2022).

مواد آلی از نظر حرارتی پایدارتر هستند.هیچ خوردگی و خنک کننده بیش از حد وجود ندارد. با این حال، این مواد بسیار قابل اشتعال هستند و رسانایی حرارتی کمی دارند ولی مواد معدنی دارای شاخص حرارتی عالی و هزینه کم هستند، اما این مواد به شدت تحت تأثیر خوردگی و سرما قرار می گیرند. این موادمعمولاً در سطح بیرونی دیوار قرار می گیرند. با این حال، می توان آن را در داخل سطح دیوار قرار داد شکل 6محل PCM دردیوار ترومب را نشان می دهد (Xiong et al.,2022)

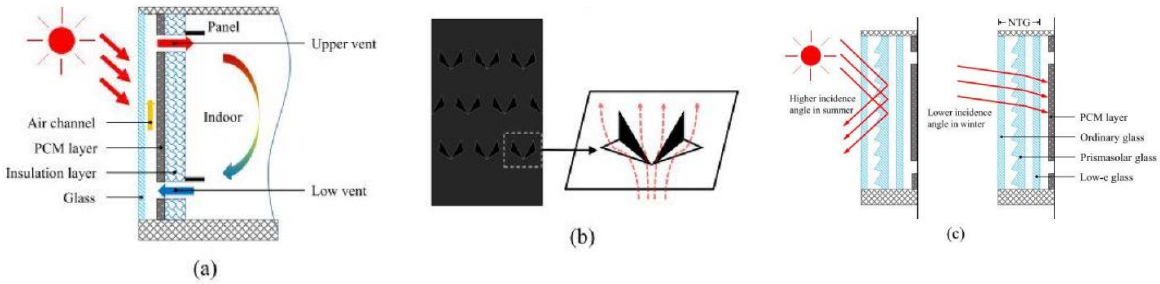


شکل6-.محل PCM در دیوارترومب: الف) iPCM ؛ب) midPCM ؛ ج) ePCM (Sergei, Shen and Jiang 2020)

در شکل (7الف) یک دیوار ترومب PCMبا یک لایه PCM متصل به سطح بیرونی یک دیوار عایق نشان داده شده است. فرآیند کار آن با دیوار کلاسیک ترومب یکسان است، به جز ذخیره گرمای نهان. لایه APCM همچنین می تواند در وسط کانال هوا نصب شود ،که منجر به سبکی شبیه به دیوار ترومب کامپوزیت می شود (به جز اینکه دیوار ذخیره حرارتی توسط PCM ساخته شده است). در نتیجه، این نوع دیوار ترومب مزایای دیوار ترومب کامپوزیت و دیوار ترومب PCM را ترکیب می کند و می تواند به عنوان یک نوع هیبریدی در نظر گرفته شود. برخی اصلاحات نیز بر روی دیوار ترومب PCM برای بهبود عملکرد آن انجام شده است. برای مثال، بسیاری از ژنراتورهای مینیاتوری گرداب بال دلتا[2] را بر روی سطح دیوار بیرونی نصب کرد تا با افزایش تلاطم، انتقال حرارت به جریان هوا را افزایش دهد (شکل 7ب). یک شیشه سه گانه جدید (NTG) متشکل از یک شیشه معمولی[3]، یک شیشه شیشه پریزما سولار[4] و یک شیشه low-e ایجاد کرد برای انعکاس تابش با زاویه تابش بالا در طول تابستان (برای جلوگیری از گرمای بیش از حد) و برای انتقال تابش با زاویه تابش کم در زمستان (برای جمع آوری گرما) (Wang et al., 2020)

[1] Trombe wall with PCM materials
[2] miniature delta winglet vortex generators
[3] ordinary glass
[4] Prismasolar glass

(شکل 7ج)

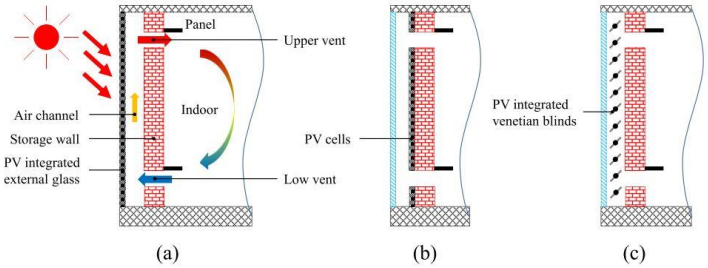


شکل7- (الف) دیوار ترومبPCM و مقاوم سازی آن با (ب) ژنراتورهای گرداب بال دلتا در سطح دیوار یا (ج) NTG.(Wang et al., 2020)

دیوار ترومب فتوولتائیک[1]

برای بهبود عملکرد سیستم دیوار ترومب کلاسیک، محققان و مهندسان تعدادی فناوری جدید مانند استفاده از مواد ذخیره‌سازی یا نانومواد معرفی کرده‌اند. یکی از این تکنیک ها ادغام فناوری ماژول PVبا دیوار ترومب با جایگزینی صفحه جاذب در سیستم دیوار ترومب کلاسیک با ماژول PVو دستیابی به دو هدف مهم تولید برق از ماژول PVو استخراج گرمای مضر ماژول PVو استفاده از آن برای گرمایش استفاده می شود. افزایش دمای ماژول PV، کارایی آن را 0.5٪ به ازای هر 1 درجه سانتیگراد افزایش دمای ماژول PVکاهش می دهد(Abdullah et al., 2022).

شکل 8 یک دیوار ترومب فتوولتائیک با سلول هایPV نصب شده به ترتیب در شیشه بیرونی (PVGTW)، سطح دیوار (PVMTW) و سایه غلتکی یا پرده های ونیز (PVBTW) را نشان می دهد. عملکرد گرمایش این دیوار مشابه دیوارهای کلاسیک است، اما سلول های PVنیز بخشی از انرژی خورشیدی برای تولید برق را به اشتراک می گذارند. این بدان معنی است که عملکرد گرمایش دیوار ترومب فتوولتائیک بدتر از دیوار ترومب کلاسیک است. با این حال، دو مزیت دیوار ترومب فتوولتائیک وجود دارد. یکی این که می توان از برق برای مصارف دیگری مانند لوازم خانگی استفاده کرد. مزیت دیگر این است که گرمای بیش از حد در تابستان قابل کاهش است زیرا انرژی خورشیدی تا حدی به برق تبدیل می شود. بنابراین، با توجه به نیازهای چند منظوره گرمایش و برق و همچنین مزایای جامع منبع تغذیه و جلوگیری از گرمای بیش از حد، بسیاری از مطالعات روی دیوار ترومب بر روی این نوع PV متمرکز شده است. طبق تحقیقاتی که شده سه نوع بالا PVGTW، PVMTW و PVBTWرا با آزمایش و شبیه‌سازی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که برای کاهش بار گرمایشی سالانه، بهترین عملکرد توسط PVBTW، PVMTW و سپس PVGTW به نمایش گذاشته شد. برای تولید برق سالانه، PVBTW مشابه PVGTW اما بهتر از PVMTW عمل کرد. برای کل صرفه جویی سالانه برق، PVBTW بهترین عملکرد را داشت، در حالی که PVGTW و PVMTW مشابه بودند(Wang et al. 2020).



شکل8-.دیوار ترومب با سلول های PV ادغام شده در (الف) شیشه بیرونی، (ب) سطح دیوار یا (ج) پرده های ونیز(Wang et al., 2020)

دیوار ترومب آب خورشیدی[2]

دیوارآبی راه حلی موثر برای حفظ آسایش حرارتی ساختمان ها و کاهش مصرف انرژی است. در زمستان، دیوار آب می تواند تشعشعات خورشیدی را جذب کرده وگرما را در طول روز آفتابی ذخیره کند، در حالی که در شب آن را به اتاق رها می کند تا بارگرمایشی ساختمان را کاهش دهد .هزینه دیوار آبی نیز به طور قابل توجهی کمتر از هزینه دیوار عظیم با استفاده از مواد تغییر فاز است .با توجه به سردتر بودن دمای پوشش های ساختمانی نسبت به فضاهای داخلی، استفاده از انرژی طبیعی با درجه پایین برای گرمایش در زمستان بسیار امیدوار کننده است(Zhou et al., 2020).

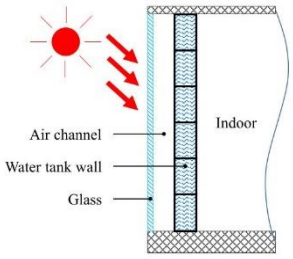
دیوار آب خورشیدی بر اساس همان اصل دیوار کلاسیک ترومب عمل می کند. با این حال، دیوار آب خورشیدی از مخازن آب برای جمع آوری انرژی خورشیدی استفاده می کند. این انتخاب به این دلیل است که گرمای ویژه آب چندین برابر بیشتر از مقادیر آجر اسیدی یا بتن مسلح است (4.186kJ/(kg *K) در مقابل 0.840– (0.880 kJ/(kg *K). شکل9 محل دیوار ترومب آبی را نشان می دهد .با این حال، مشکل اصلی دیوار ترومب آب، ساخت مخازن آب در قسمت ذخیره حرارتی است که از ساخت دیوارهای ترومب معمولی دشوارتر است(Sergei, Shen and Jiang, 2020)؛ (Wang et al., 2020) .

باتوجه به تحقیقات لیکون ژو و دیگران نتایج نشان می دهد که اولا دیوارآبی بهترین عملکرد حرارتی را در طول روز دارد. این به این دلیل است که دیوارآبی قادر است همرفت طبیعی را کاهش دهد. در شرایط شبیه سازی شده، راندمان آن 3.3 درصد بیشتر از دیوار ترومب کلاسیک است. ثانیاً، عملکرد بازده حرارتی دیوارآبی به

---

[1] photovoltaic trombe wall
[2] solar water trombe wall

طور قابل توجهی برتر از ساختارهای معمولی با تابش کم است. با افزایش تابش، شکاف به تدریج کاهش می یابد، اما راندمان دیوارآبی بالاتر از ساختار دیوار کلاسیک باقی می ماند. ثالثاً، مقایسه عملکرد حرارتی در شب، نشان می‌دهد که دیوارآبی می‌تواند اتلاف حرارت را تا 31 درصد در مقایسه با دیوار ترومب سنتی کاهش دهد. رابعاً، نرخ جریان جرمی آب تأثیر جزئی بر عملکرد حرارتی دیوارآبی دارد. با توجه به نتیجه شبیه سازی، دبی جرمی بهینه 0.06 کیلوگرم بر ثانیه است (Zhou et al., 2020).



شکل9-دیوار ترومب آبی(Wang et al. 2020)

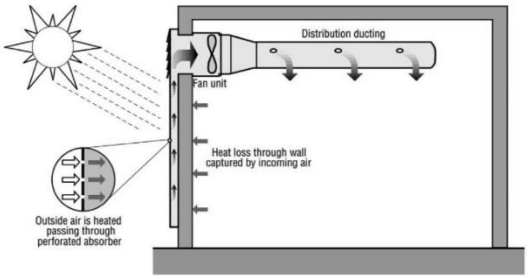
دیوار ترانس خورشیدی[1]

دیوارترانس خورشیدی بسیار شبیه به دیوار ترومب آبی است. با این حال، دیوار ترانس دیوار خورشیدی از ماژول های شیشه ای شفاف بر روی یک قاب فلزی تشکیل شدهاست. ماژول های شیشه ای شفاف یک ظرف دربسته با آب تشکیل می دهند. بین این ظروف یک صفحه جاذب وجود دارد. نور خورشید این صفحه را گرم می کند و سپس انرژی را به آب منتقل می کند. این طرح دارای معایب زیادی است. راندمان حرارتی پایین چنین دیوار ترومب با تبادل حرارتی همرفتی مرتبط است. با توجه به میکروارگانیسم ها ممکن است در داخل ظرف با آب ظاهر شوند که بر نفوذپذیری ماژول های شیشه ای تأثیر می گذارد.همچنین، دیوار ترانس خورشیدی همان مسائل حفاظت حرارتی مانند دیوار ترومب آبی را دارد. در نتیجه تقریباً امکان استفاده از ترانس دیوار خورشیدی در شرایط آب و هوایی سرد وجود ندارد (Sergei, Shen and Jiang, 2020).

دیوار هیبریدی خورشیدی[2]

ایده سولار ترانس دیوار راه حلی موثر برای گرمایش در زمستان و سرمایش در تابستان است. برای سایر انواع دیوار ترومب، مشکل گرمای بیش از حد دیوار در دوره تابستان وجود دارد. شکل10 پروژه دیوار هیبریدی خورشیدی را نشان می دهد. ویژگی اصلی این دیوار ترومب این است که در زمستان، تابش خورشیدی ورق فلزی موجدار 8.0 میلی متری را گرم می کند. علاوه بر این، مبدل ورق فلزی هوا را در شکاف هوا از طریق گرمای همرفتی گرم می کند. هوای گرم شده از طریق کانال هوا به لیدر[3] توزیع عرضه می شود، جایی که تا دمای مورد نیاز گرم می شود. در تابستان، هوا از خیابان به اتاق مستقیماً از طریق لیدر تامین می شود و گرمایش آن از تابش خورشیدی دور می زند(Sergei, Shen and Jiang, 2020).

یک دیوار ترومب با یک دیوار خنک کننده تبخیری سرامیکی ساخته شد. اگر در زمستان، این پروژه مانند یک دیوار کلاسیک ترومب عمل می کند، در تابستان می توان از آن به عنوان یک راه حل خلاقانه استفاده کرد. این راه حل این است که آب هوا را در شکاف هوا خنک می کند صفحات سرامیکی متخلخل بیشتر رطوبت را جذب می کنند که باعث خنک شدن تبخیری می شود .پس از تجزیه و تحلیل این نوع دیوار ترومب، دو اشکال اصلی وجود دارد که می توان بلافاصله به آنها اشاره کرد: پیچیدگی طراحی و هزینه بالای تجهیزات. در یک ارزیابی سطحی،استفاده از سیستم خنک کننده خشک کن خورشیدی در شرایط آب و هوایی شدیدبی سود است. اول از همه، این نتیجه گیری به دلیل هزینه بالای پروژه است(Sergei, Shen and Jiang, 2020).

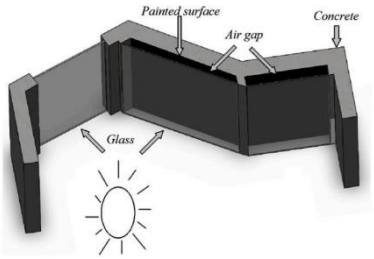


شکل10-.دیوار هیبرید خورشیدی(Sergei, Shen and Jiang 2020)

[1] solar trans-wall
[2] solar hybrid wall
[3] leader

دیوار ترومب زیگزاگی[1]

دیوارترومب زیگزاگ راه حلی ایده آل برای دو مشکل است: حداکثراستفاده از تابش خورشیدی برای انباشته شدن انرژی حرارتی در دیوار و تامین نور موردنیاز اتاقاست شکل 11 دیوار ترومپ زیگزاگی را نشان می دهد. بنابراین برای گرمایش کافی اتاق ها، تمام دهانه های پنجره نمای جنوبی رو به زون جنوب شرقی بود. در همین حال، دیوار حرارتی رو به جنوب غربی است، جایی که می توان حداکثر انرژی خورشیدی را تا پایان یک روز آفتابی دریافت کرد. باچنین تصمیمی، صبح زود اتاق را با نور مستقیم خورشید که از پنجره اتاق وارد می شودگرم می کند. علاوه بر این، نزدیک به ظهر، تابش خورشیدی دیوار حرارتی را گرم کرد، که انرژی حرارتی را برای دوره شب جمع می کند. با این حال، یک اشکال بزرگ برای چنین راه حل دیوار برنامه ریزی فضایی ترومپ وجود دارد که باعث افزایش اتلاف گرما از طریق دیوار می شود. اتلاف حرارت یک ساختمان به دلیل وجود ناهمواری نماها، تاقچه ها و سایر تصمیمات مشابه در برنامه ریزی فضا می تواند 12 تا 15درصد افزایش یابد. همچنین، از آنجایی که در شرایط آب و هوایی سرد، دیوار ترومب تنهایک منبع گرمای اضافی است، این 15-12 درصد تلفات حرارتی بر روی بار منبع گرمای اولیه قرار می گیرد. در نتیجه توصیه به استفاده از دیوار ترومب زیگزاگ در شرایط آب و هوایی سرد صفر است(Sergei, Shen and Jiang, 2020).

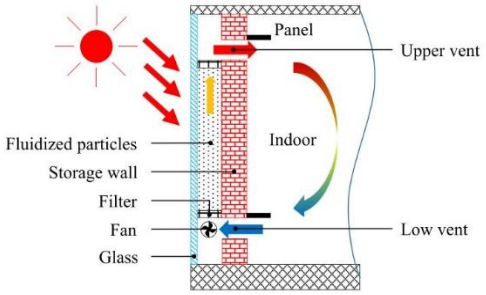


شکل11-دیوار ترومب زیگزاگ(Sergei, Shen and Jiang 2020)

دیوار ترومب سیال[2]

ویژگی متمایز دیواره ترومب سیال این است که یک مایع کم چگالی و جذب بالا درکانال هوا قرار دارد. اصل کار به شرح زیر است: فن هوا را از اتاق به شکاف هوا می رساند، جایی که مایع جذب کننده در آن قرار دارد. علاوه بر این، هوا از این مایع عبور می کند، جایی که گرم می شودو به اتاق باز می گردد. بین مایع جاذب، دو فیلتر از هوای وارد شده به اتاق در برابر ذرات این مایع محافظت می کند. اصل گرمایش هوای سرد بر مبنای سیال شدن است. راندمان حرارتی دیوار ترومب سیال بسیار بالاتر از دیوار کلاسیک ترومب است. به این دلیل است که خنک کننده، یعنی هوا به طور مستقیم با یک مایع جاذب تعامل دارد. با این حال، مانند دیوار هیبریدی خورشیدی، دیوار ترومب سیال یک طراحی پیچیده برای اجرا و نگهداری در شرایط آب و هوایی سرد است .علاوه بر این، هیچ مطالعه ای در مورد نحوه رفتار مایع جاذب در اختلاف دمای قابل توجه، عمر کاری این دیوار، نحوه تمیز کردن در شکاف هوا وجود ندارد.در نتیجه، این نوع دیوار ترومب به ندرت برای گرم کردن اتاق ها و ساختمان ها مناسب است(Sergei, Shen and Jiang, 2020).

کانال هوای این نوع دیوار ترومب با بسیاری از ذرات ریز مقیاس، کم چگالی و جذب بالاپر شده است که ساختار متخلخلی را تشکیل می دهند. شکل12 گرمای خورشید درابتدا توسط ذرات سیال جمع آوری شده و متعاقباً به هوا منتقل می شود. به دلیل افزایش سطح تماس در ساختار متخلخل، هوای گردشی به شدت گرم می شود و مقادیر زیادی انرژی را برای گرمایش فضا به اتاق داخلی منتقل می کند(Wang et al., 2020).



شکل12-دیواره ترومب سیال(Wang et al., 2020)

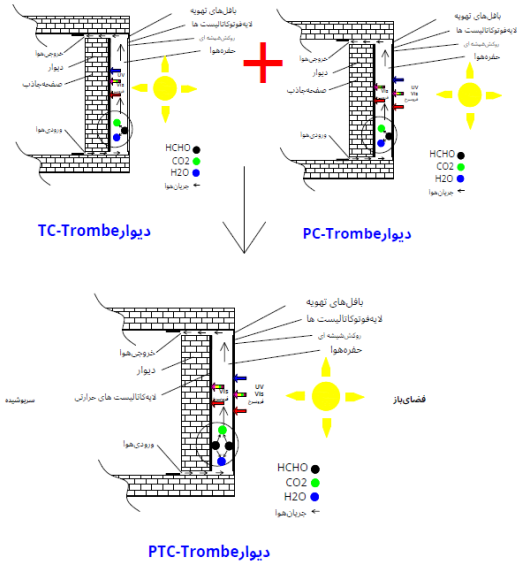
دیوار ترومب تصفیه هوا[3]

انسان‌ها بیشتر از قبل به دلیل نفوذ ناپذیری بالا هوای تازه از ساختمان‌های مدرن ، بر کیفیت هوای داخل ساختمان (IAQ)تمرکز کرده‌اند که ارتباط زیادی با سلامت، آسایش و بهره‌وری انسان دارد. فرمالدئید (HCHO)، یک آلاینده معمولی گازی داخلی است که متعلق به یک ماده سرطان‌زای انسانی است که می‌تواند باعث سرطان خون شود. تجمع فرمالدئید داخلی به دلیل رها شدن مداوم از مواد تزئینی، مبلمان و کف ساختمان های جدید، منجر به غلظت نسبتاً بالای فرمالدئید داخلی می شود .دریافت هوای تازه در فضای باز یک روش موثر برای رقیق کردن آلاینده های هوای داخل برای سیستم تهویه مطبوع است(Yu, Li and Ji,2019).

---

[1] zigzag trombe wall
[2] fluidized trombe wall
[3] Air-purification Trombe wall

این دیوار ترومب ایده تصفیه هوا را در فرآیند گرمایش معمولی ادغام می کند که می توان آن را با توجه به اصل تخریب به دو نوع فرعی تقسیم کرد: دیواره ترومب اکسیداسیون حرارتی-کاتالیستی[1] (دیواره ترومب -TC) و دیواره ترومب اکسیداسیون فتوکاتالیستی[2] (دیواره ترومب -PC) همان طور که شکل13 نشان می دهد. اخیراً، این دو نوع فرعی نیز برای تشکیل یک دیوار ترومب فوتوکاتالیستی-حرارتی-کاتالیتیک-[3] (PTC-Trombe wall) ترکیب شدند. فرآیند اصلی عملیات این دو نوع فرعی یکسان است:در طول فرآیند گرمایش، هوای آلوده داخل ساختمان از مدول های تخریب عبور می کند،که در آن آلاینده ها، به عنوان مثال فرمالدئید، می توانند توسط واکنش کاتالیزوری به مواد بی ضرر تبدیل شوند. . سپس هوای تصفیه شده به اتاق داخل خانه میرسد(Wang et al., 2020).



شکل 13- (الف) یک دیوارترومب -TCو (ب) یک دیوارترومب -PC و (ج) یک دیوارترومب -PTC (Yu et al,2019)

عناصر سازه ای دیوار ترومب

همان طور که جدول1 نشان می دهد عناصراصلی ساختاری دیوار ترومب شامل عناصر زیر است: لعاب، شکاف هوا، یک دیوارعظیم و رنگ پوشش، عایق حرارت، مجاری تهویه، پنجره ها در یک دیوار عظیم است. هنگام طراحی پروژه دیوار ترومب برای شرایط آب و هوایی تعیین شده، طراح باید پارامترهای فنی و اقتصادی هر عنصر دیوار را در نظر بگیرد. با این حال، مهم ترین جنبه های طراحی دیوار ترومب عبارتند از: کانال های تهویه،فن ها و عایق حرارتی. تحقیقات زیادی در مورد عناصر ساختاری اصلی دیوار ترومب و تأثیر آنها بر کارایی توسط محققین انجام شد(Sergei, Shen and Jiang, 2020).

جدول(1) عناصر سازه ای دیوار ترومب، منبع: نگارنده برگرفته از (Sergei, Shen and Jiang, 2020)

عناصر سازه ای	توضیحات
لعاب کاری[4]	امروزه در سازه های مختلف دیوار ترومب از پنجره های تک جداره ، دوجداره یا دوجداره کم مصرف[5] استفاده می شود. لعاب تاثیر قابل توجهی بر راندمان انباشته شدن دیوار ترومب دارد. این واقعیت به این دلیل است که یک پنجره دو جداره می تواند بخشی از طیف تابش خورشید را جذب و منعکس کند. در نتیجه کارآمدترین استفاده از شیشه دوجداره کم مصرف در دیوار ترومب است.
فاصله هوا[6]	دردیوار ترومب، خنک کننده هوا است که بین اتاق گرم شده و شکاف هوا گردش می کند. مطالعات مختلف تأثیر عظیم این عنصر را تأیید می کند ،زیرا اتاق بیشتر انرژی حرارتی هوای گرم شده را در لایه هوا دریافت می کند. گرمایش هوا در شکاف هوا به دلیل تبادل حرارتی همرفتی بین سطح دیوار عظیم و هوا رخ می دهد. بنابراین، در این عنصر،مشخصه اساسی ضریب انتقال حرارت همرفتی است که به ضخامت شکاف هوا وسرعت هوای عرضه شده بستگی دارد.
دیوار عظیم[7]	یک دیوار عظیم به طور مستقیم بر مقدار انرژی گرمایی انباشته شده در یک روز آفتابی تأثیر می گذارد. بر این اساس، یک دیوار عظیم باید دارای جرم حرارتی کافی باشد که بتواند میانگین مقدار پیش بینی شده ماهانه تابش خورشیدی را برای یک روز در محل محاسبه شده به طور کامل جذب کند. تابه امروز، مواد زیر برای دیوارهای عظیم رایج ترین هستند: آجر، بتن مسلح، بتن هوادهی اتوکلاو. انتخاب ضخامت دیوار عظیم بستگی به شرایط آب و هوایی دارد.

[1] thermal-catalytic-oxidation Trombe wall
[2] photocatalytic-oxidation Trombe wal
[3] photocatalytic-thermal-catalytic-Trombe wall
[4] Glazing
[5] low-emittance double-glazing
[6] Air gap
[7] Massive wall

عایق حرارتی[1]	یکی از معایب اصلی دیوار ترومب، اتلاف شدید حرارت است، به ویژه در طول شب این به دلیل انباشته شدن حجم زیادی از انرژی حرارتی است. یک دیوار عظیم باید رسانایی حرارتی و ظرفیت گرمایی بالایی داشته باشد. در غیر این صورت، انباشت انرژی حرارتی به یک عمل ناخوشایند تبدیل می شود. برای کاهش انتشار سوخت انرژی و مواد مضر، توصیه می شود از یک لایه اضافی عایق حرارتی برای یک ساختمان مسکونی استفاده کنید.
کانال های تهویه[2]	محل کانال های تهویه در قسمت های بالایی و پایینی دیوار عظیم است. مکان آن به اندازه دیوار ترومب بستگی دارد. مجاری تهویه انتقال گرما و جرم بین هوای اتاق و هوای موجوددر شکاف هوای دیوار ترومب را فراهم می کند. کانال های تهویه به دلیل گرمای همرفتی و انتقال جرم بین هوای گرم شده در شکاف هوا و هوای اتاق، سرعت گرمایش اتاق را افزایش می دهند. با توجه به تحقیقات مجاری تهویه در یک دیوار عظیم تأثیر تعیین کننده ای بر راندمان حرارتی دارند.
پنجره در یک دیوار عظیم[3]	محل بازشوهای پنجره در دیوار ترومب مبهم است. از یک طرف، با چیدمان پنجره ها در یک دیوار عظیم، حجم جرم حرارتی که انرژی حرارتی را انباشته می کند، کاهش می یابد. همچنین تلفات حرارتی از طریق پنجره ها افزایش می یابد. از طرف دیگر،قرار دادن پنجره ها در یک دیوار عظیم باعث می شود که اتاق به کمک نور خورشید به سرعت گرم شود و همچنین نور روز اتاق را برای ساکنین راحت تر می کند. دقیقاً برای تأمین انرژی حرارتی و نور روز اتاق بود که دیوار زیگزاگ ترومب ساخته شد.

تحلیل در یافته ها

در این بررسی، تلاش شده تا یک مرور روش شناختی از تحقیقات دیوار ترومب ارائه شود و طبقه بندی دیوار ترومب را که در ادبیات کنونی ذکر شده است،خلاصه کرده بر همین اساس امروزه10 نوع مختلف دیوار ترومب وجود دارد: دیوار ترومب کلاسیک؛ دیوار ترومپ کامپوزیت؛ دیوار ترومب با مواد تغییر فازدهنده؛ دیوار ترومب فتوولتائیک؛ دیوار آب خورشیدی؛ دیوار ترانس خورشیدی؛ دیوار هیبریدی خورشیدی؛ دیوار ترومب زیگزاگی؛ دیوار ترومب سیال؛ دیوار ترومب تصفیه هوا . در پایان به تفکیک در مورد اجزا، مزایا، معایب و محدودیت های هر کدام پرداخته شود و نتایج عمده به شرح زیر در جدول2 امده است.

جدول(2) سیستم خورشیدی دیوار ترومب(مزایا، معایب و محدودیت ها)، منبع: نگارنده

نوع	اجزا	مزایا	معایب و محدودیت ها
دیوار ترومب کلاسیک	شیشه کانال هوا دیوار ذخیره حرارتی با رنگ تیره در سمت آفتابگیر منفذ و دریچه کنترل کننده	هزینه کم اجرا تاخیر حرارتی مناسب عملکرد گرمایشی مناسب	عدم وجود نور و دید و منظر سنگین شدن بنا اتلاف فضا سختی تعمیر و نظافت
دیوار ترومپ کامپوزیت	شیشه کانال هوای بدون تهویه دیوار ذخیره حرارتی کانال هوای تهویه شده لایه عایق منفذ و دریچه کنترل کننده	به دلیل وجود عایق، بازده حرارتی دیوار ترومب کامپوزیت نسبت به دیوار ترومب کلاسیک به طور قابل توجهی افزایش می دهد	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک مشکل گردش حرارت معکوس ساخت و ساز گران نسبت به دیوار ترومب کلاسیک
دیوار ترومب با مواد تغییر فازدهنده PCM	شیشه کانال هوا لایهPCM دیوار ذخیره حرارتی منفذ و دریچه کنترل کننده	_ بهبود ظرفیت کلی ذخیره‌سازی حرارت انرژی به شکل گرمای محسوس _ باعث افزایش کارایی انرژی و کاهش مصرف برق	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک هزینه بالای ساخت و ساز
دیوار ترومب فتوولتائیک	شیشه کانال هوا لایه ماژول PV دیوار ذخیره حرارتی منفذ و دریچه کنترل کننده	تولید برق از استخراج گرمای مضر ماژول PV استفاده از آن برای گرمایش	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک افزایش دمای ماژول PV، کارایی آن را 0.5٪ به ازای هر 1 درجه سانتیگراد افزایش دمای ماژول PV کاهش می دهد
دیوار آب خورشیدی	شیشه کانال هوا دیوار ذخیره حرارتی با مخازن آب	بهترین عملکرد حرارتی در طول شب و روز به دلیل تبادل همرفت طبیعی کندتر	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک

[1] Heat insulation
[2] Ventilation ducts
[3] Windows in a massive wall

	منفذ و دریچه کنترل کننده		ساخت مخازن آب در قسمت ذخیره حرارتی دشوارتر از ساخت دیوارهای ترومب معمولی
دیوار ترانس خورشیدی	شیشه کانال هوا ماژول های شیشه ای شفاف بر روی یک قاب فلزی دیوار ذخیره حرارتی با مخازن آب منفذ و دریچه کنترل کننده	مانند دیوار آب خورشیدی	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک باتوجه به میکروارگانیسم ها در داخل ظرف آب تاثیر منفی بر نفوذپذیری ماژول های شیشه ای دارد
دیوار هیبریدی خورشیدی	ورق فلزی موجدار کانال هوا دیوار ذخیره حرارتی با یک دیوار خنک کننده تبخیری سرامیکی ساخته منفذ و دریچه کنترل کننده فن کانال توزیع هوا	راه حلی موثر برای گرمایش در زمستان و سرمایش در تابستان	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک پیچیدگی طراحی برای اجرا هزینه بالای تجهیزات
دیوار ترومب زیگزاگی	شیشه کانال هوا دیوار ذخیره حرارتی منفذ و دریچه کنترل کننده	حداکثراستفاده از تابش خورشیدی برای انباشته شدن انرژی حرارتی در دیوار تامین نور موردنیاز اتاقاست	سنگین شدن بنا اتلاف فضا سختی تعمیر و نظافت اتلاف حرارت یک ساختمان به دلیل وجود ناهمواری نماها، تاقچه ها
دیوار ترومب سیال	شیشه یک مایع کم چگالی و جذب بالا درکانال هوا دیوار ذخیره حرارتی فیلتر فن منفذ و دریچه کنترل کننده	راندمان حرارتی دیوار ترومب سیال بسیار بالاتر از دیوار ترومب کلاسیک ترومب	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک طراحی پیچیده برای اجرا و نگهداری
دیوار ترومب تصفیه هوا	روکش شیشه ای شیشه لایه فوتوکاتالیست ها بافل های تهویه کانال هوا لایه کاتالیست های حرارتی دیوار ذخیره حرارتی منفذ و دریچه کنترل کننده	تصفیه هوای اتاق داخل خانه توسط واکنش کاتالیزوری به مواد بی ضرر	موارد معایب و محدودیت های دیوار ترومب کلاسیک

نتیجه گیری

ادغام راه حل های زیست اقلیمی همراه بامدل های پیش بینی مصرف انرژی، امکان دستیابی به ساختمان های کارآمدتر وپایدارترانرژی را فراهم می کند .از انجایی که ایران با رشد قابل توجهی در میزان انتشار گازهای گلخانه ای و مصرف انرژی مواجه هستند برای کنترل مصرف انرژی باید با ایجاد صفر انرژی و افزایش آگاهی عموم در مورد فن آوری های جدید افزایش یابد.دیوار ترومب یک سیستم خورشیدی غیرفعال است که از یک منبع انرژی تجدیدپذیر برای بهبود بهره وری انرژی ساختمان با کاهش تقاضای گرمایش استفاده می کند. پژوهش حاضر، مروری جامع ازشناسایی انواع دیوار ترومب و ارائه راهکارهای معماری در پروژه های مسکونی گردیده است هر عنصر دیوار ترومب به سایر عناصر ساختار دیوار بستگی دارد و بر آن تأثیر می گذارد. و در هر پروژه بسته به شرایط محیطی و اقلیمی و اقتصادی و خواسته آن می توان به انتخاب نوع دیوار ترومب منجر شود.

نتایج بیانگر آن است که برای بهبود عملکرد بهتر دیوار ترومب کلاسیک اجزای جدیدی به آن اضافه می شود و در نهایت مزایا و معایبی فراتر از دیوار ترومب کلاسیک به وجود می آید که در این بین بهترین عملکرد دیوار ترومب با مواد تغییر فازدهنده PCM است که باعث افزایش کارایی انرژی و بهبود ظرفیت کلی ذخیره‌سازی حرارت انرژی به شکل گرمای محسوس وکاهش مصرف برق می شود ولی هزینه ای بالای ساخت و ساز دارد.

مراجع

1. بیرق شمشیر، مهدی و سرکرده ئی ،الهام (1401). توجه به طراحی اقلیمی و ایجاد شرایط بهره گیری از انرژی های نو در ساختمان، گامی در جهت معماری سبز. مهندسی و مدیریت ساخت1. دوره 7، شماره 1 - صفحه 1-7
2. جهانگیر،محمد حسین؛ عبدی،علی و نورمحمدی ،وحید. (1401). مدیریت مصرف انرژی یک ساختمان اداری به کمک شبیه‌سازی روشنایی روز و امکان‌سنجی استفاده از پنل‌های خورشیدی برای تأمین انرژی ساختمان .فصلنامه سیستم های انرژی پایدار دوره 1، شماره 4، صفحه 355-371
3. زرین، لیلا؛ مفیدی شمیرانی، سید مجید و طاهباز، منصوره (1400). اصول تطبیقی معماری پایدار بناهای مسکونی بومی در اقلیم‌های خشک ایران .مطالعات هنر اسلامی.شماره 41، دوره 18، 223 -233
4. ضرغامی، اسماعیل؛ خاکی، علی و سیده اشرف سادات(1395)، بررسی تطبیقی معماری پایدار و مطابقت آن با معماری بومی خانه های سنتی در شهر ایرانی - اسلامی، فصلنامه معماری شهر پایدار، سال چهارم، شماره اول
5. قدیری مقدم،مهسا؛ وزیری، وحید؛ صنایعیان، هانیه و رشید کلویر ،حجت اله. (1398). ارزیابی عملکرد سیستم های ایستای انرژی (دیوار ترومپ و پدیده گلخانه ای) بر میزان مصرف انرژی ساختمان در اقلیم سرد .معماری و شهرسازی ایران .دوره 10، شماره1، صفحه 25-36
6. محرمی ، مهدی؛ خداوردی،پریسا؛ عباسی، یونس و سهرابی،افسانه (1398). مروری بر تاثیر تغییر المان های ساختمانی بربهینه سازی مصرف انرژی در ساختمان های مسکونی. عمران و پروژه, 1(1), 91-113.
7. Abdullah, A. A., Attulla, F. S., Ahmed, O. K., & Algburi, S. (2022). Effect of cooling method on the performance of PV/Trombe wall: Experimental assessment. *Thermal Science and Engineering Progress*, *30*, 101273.
8. Araujo, A. G., Carneiro, A. M. P., & Palha, R. P. (2020). Sustainable construction management: A systematic review of the literature with meta-analysis. Journal of Cleaner Production, 256, 120350.
9. Bassas, E. C., Patterson, J., & Jones, P. (2020). "A review of the evolution of green residential architecture." Renewable and Sustainable Energy Reviews 125: 109796.
10. Bevilacqua, P., Benevento, F., Bruno, R., & Arcuri, N. (2019). Are Trombe walls suitable passive systems for the reduction of the yearly building energy requirements?. *Energy*, *185*, 554-566.
11. Cui Shixin, Keun Kim Moon (2016). A feasibility study of Trombe wall design in the cold region of China, International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation In Buildings, IAQVEC 2016, 9th,1-78
12. Roostaie, S., Nawari, N., & Kibert, C. J. (2019). "Sustainability and resilience: A review of definitions, relationships, and their integration into a combined building assessment framework." Building and Environment 154: 132-144.
13. Sergei, K., Shen, C., & Jiang, Y. (2020). A review of the current work potential of a trombe wall. *Renewable and sustainable energy reviews*, *130*, 109947.
14. Simoes Nuno, Simoes Ines, Manaia Mario (2015). Study of Solar And Trombe Walls In A Mediterranean Climate, Installed In Residential Buildings, Congresso de Metodos Numéricos em Engenharia, Lisboa, 29 de Junho a 2 de Julho,1-16
15. Wang, D., Hu, L., Du, H., Liu, Y., Huang, J., Xu, Y., & Liu, J. (2020). Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *124*, 109772.
16. Wu, S. Y., Xu, L., & Xiao, L. (2020). Air purification and thermal performance of photocatalytic-Trombe wall based on multiple physical fields coupling. *Renewable Energy*, *148*, 338-348.
17. Xie, H., Yu, B., Wang, J., & Ji, J. (2021). A novel disinfected Trombe wall for space heating and virus inactivation: Concept and performance investigation. *Applied energy*, *291*, 116789.
18. Xiong, Q., Alshehri, H. M., Monfaredi, R., Tayebi, T., Majdoub, F., Hajjar, A., ... & Izadi, M. (2022). Application of phase change material in improving trombe wall efficiency: An up-to-date and comprehensive overview. *Energy and Buildings*, *258*, 111824.
19. Yu, B., Li, N., & Ji, J. (2019). Performance analysis of a purified Trombe wall with ventilation blinds based on photo-thermal driven purification. *Applied Energy*, *255*, 113846.
20. Yu, B., Yang, J., He, W., Qin, M., Zhao, X., & Chen, H. (2019). The performance analysis of a novel hybrid solar gradient utilization photocatalytic-thermal-catalytic-Trombe wall system. *Energy*, *174*, 420-435.
21. Zhou, L., Huo, J., Zhou, T., & Jin, S. (2020). Investigation on the thermal performance of a composite Trombe wall under steady state condition. *Energy and Buildings*, *214*, 109815.
22. Zohdi, Soghra, mohammadi sani, Ali (2015). Trombe Wall and Its Application for Disinfection of Indoor Air, Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, ISSN: 2090-4274,186-190