نمای گردآورنده
در یک ساختمان بلند تهران*

دکتر محمدتقی رضائی حریری**
دکتر ریما فیاض***

چکیده

در این مقاله راه‌حل خورشیدی برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی بمنظور گرمایش یک ساختمان بلند مرتبه نمونه در تهران بصورت تبدیل نمای موجود به گردآورنده خورشیدی پیشنهاد می‌گردد، که بصورت یک جدار شیشه‌ای در سمت جنوبی با فاصله ۳۰ سانتیمتر و جدار شیشه‌ای دیگر در سمت شمالی به فاصله ۱۰ سانتیمتر که در فاصله بین دو نمای جدید و قدیم هوا جریان یافته و از طریق تعبیه کانالهایی در سقف و کف کاذب جریان هوا بین جبهه جنوبی و شمالی نیز تأمین می‌گردد. ارتفاع گردآورنده به هر دو طبقه ساختمان و عرض ۱۰ متر در نما محدود می‌شود.

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که می‌توان بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز را در فصول معتدل و بخش قابل توجهی از انرژی گرمایشی مورد نیاز در فصول سرد را از این طریق فراهم آورد.

کلید واژه‌ها

ساختمانهای بلند، انرژی خورشیدی، گردآورنده خورشیدی، صرفه‌جویی انرژی.

---

* مقاله حاضر از سری مقالات برگرفته از طرح پژوهشی «کاربرد عناصر غیرفعال خورشیدی در بناهای بلند اقلیم گرم و خشک»، است که از طرف معاونت پژوهشی دانشگاه حمایت مالی شده است. بدینوسیله از معاونت و شورای محترم پژوهشی سپاسگزاری به عمل می‌آید.

** دانشیار گروه آموزشی معماری، دانشکده هنرهای زیبا ـ دانشگاه تهران.

*** عضو هیئت علمی گروه اموزشی معماری، دانشکده معماری ـ دانشگاه هنر ـ کرج.

۱. مقدمه

در مقاله حاضر استفاده از انرژی خورشید برای گرمایش بناهای بلند مورد بررس قرار می‌گیرد. بناهای بلند جُزء ساختمانهایی هستند که به علت داشتن زیربنای زیاد، و تعداد زیاد افراد ساکن مصرف انرژی بیشتری نسبت به ساختمانهای متداول دارند. از آنجا که انرژی مصرفی در بناهای بلند عمدتاً از طریق سوزاندن سوختهای فسیلی تأمین می‌شود، به همین علت بناهای مزبور در آلوده‌سازی محیط زیست نیز مؤثر می‌باشند. از جمله مشکلات موجود در بناهای بلند امروزی سطوح وسیع نماهای شیشه‌ای است که باعث اتلاف زیاد حرارت و برودت در زمستان و تابستان می‌گردد.

در صورتی‌که بتوان به کمک سطوح شیشه‌ای نما، تمام یا بخشی از نیازهای گرمایشی یا سرمایشی بنای بلند را با انرژیهای لایزال نظیر خورشید و باد تأمین نمود، می‌توان در مصرف سوختهای فسیلی صرفه‌جویی چشمگیری کرد و از آلودگی ناشی از مصرف سوختهای مزبور کاست. ضمن اینکه شرایط حرارتی مناسبتری برای ساکنین تأمین خواهد شد. این مقاله نشان می‌دهد که می‌دهد که می‌توان در اقلیم‌های پر آفتاب مانند اقلیم ایران بخش عمده‌ای از نیازهای گرمایشی زمستان را از تابش خورشید بر نمای ساختمان فراهم نمود. برای دستیابی به این هدف لازم است بنای بلند را از ابتدا با این دیدگاه طراحی نمود تا عناصر خورشید به کار رفته بازده مطلوبی داشته باشد.

در همین زمینه، یعنی کاربرد انرژی خورشیدی در بنای بلند پیشنهادهایی ارائه شده است[۱ و ۲] که در دو مورد، روش کار استفاده از گردآورنده هوا در نما و یا در دست‌انداز تراس‌ها است. استفاده از گرمای حاصله براساس پیشنهادهای مزبور تنها در اتاقهای جنوبی که بلافاصله در پشت گردآورنده نما قرار دارد امکان‌پذیر می‌باشد. در نتیجه اتاقهای شمالی از گرمای حاصله بی‌بهره خواهند ماند. ضمن اینکه به علت انباشت گرما در اتاقهای جنوبی دمای داخل در ساعاتی از روز از حد آسایش خارج خواهد شد. در متن حاضر ضمن پیشنهاد طرحی خاص برای یکنمای گردآورنده، میزان دریافت حرارتی از آن با کل نیازهای حرارتی یک ساختمان موجود مقایسه و معرفی شده است.

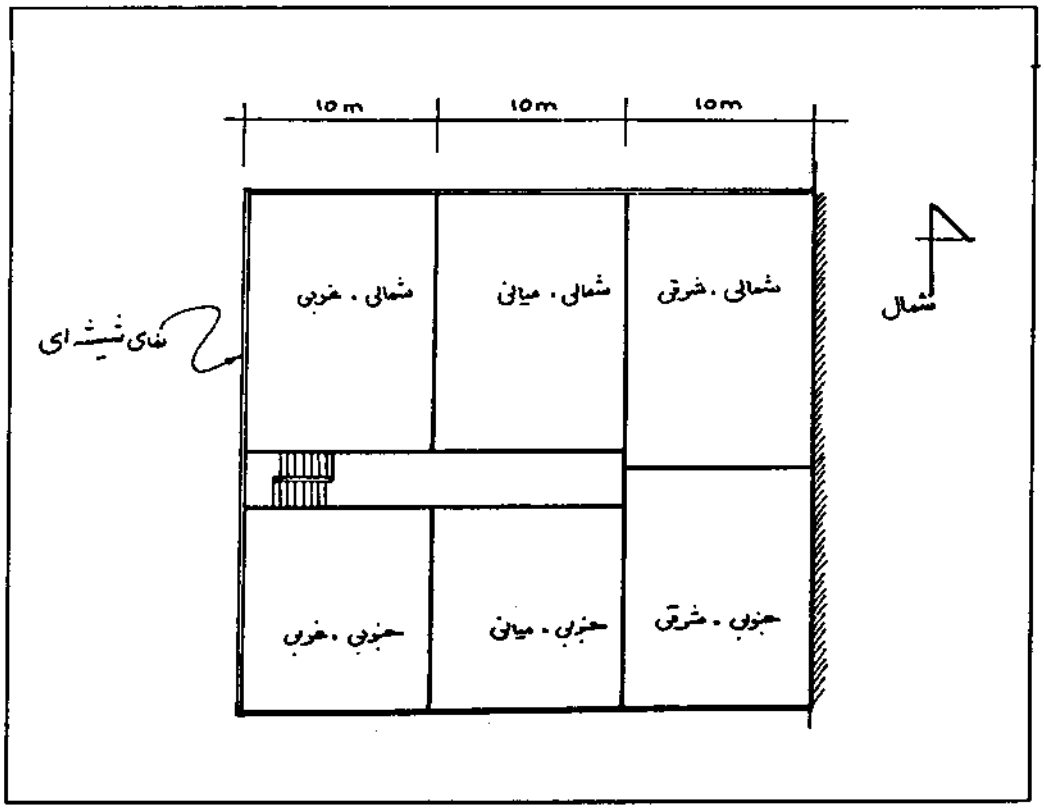
۲. نمای گردآورنده:

ساختمانی که نمای گردآورده برای آن پیشنهاد شده است بنایی ۱۴ طبقه با عملکرد اداری است که نمای آن در سه جهت شمال، جنوب و غرب از شیشه دو جداره جاذب حرارت[۳] تشکیل شده است. در سمت شرق ساختمان، بنایی با همین تعداد طبقات موجود است. جدارهای شیشه نمای ساختمان به ترتیب دارای ضخامت ۴mm در سمت داخل، و ۶mm در سمت خارج هستند. فاصله بین دو شیشه ۱cm بوده، و شیشه‌ها درون قابی آلومینیومی قرار گرفته‌اند. ضریب متوسط انتقال حرارتی نما با توجه به مصالح تشکیل دهنده آن ۲/۲۶۸[W/m^2K] است. نقشه ساختمان بصورت نمادین در (شکل ۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مزبور مشاهده می‌شود، در هر طبقه ۶ آپارتمان (۳ آپارتمان جنوبی، و ۳ آپارتمان شمالی) وجود دارد. عرض هر آپارتمان ۱۰ متر است که همان عرض نمای گردآورنده می‌باشد. برای تبدیل نمای موجود به نمای گردآورنده پیشنهاد می‌شود که یک جدار شیشه‌ای در سمت جنوبی و جدار شیشه‌ایی دیگری در سمت شمالی به نما اضافه شود. فاصله نمای جدید با نمای قدیمی در سمت جنوبی ۳۰cm و در سمت شمالی ۱۰cm است (شکل ۲). در فاصله بین دو نمای جدید و قدیم از طریق تعبیه کانالهایی در سقف و کف کاذب هوا جریان خواهد یافت. به منظور برداشت موضعی حرارت و جلوگیری از اتلاف حرارت جمع‌آوری شده، ارتفاع نمای گردآورنده به هر دو طبقه ساختمان و عرض ۱۰ متر در نما محدود می‌شود. در نتیجه در صورت بروز آتش‌سوزی، دود به سایر طبقات انتقال نخواهد یافت و همچنین در طول روز سر و صدای طبقات پائین‌تر به طبقات بالایی منتقل نخواهد شد. لازم به ذکر است که برای دریافت حرارت از انرژی تابشی خورشید پس از افزودن نمای جدید، سطح خارجی شیشه نمای قبلی باید دارای لایه منعکس‌کننده در حد ۹۰٪ باشد.

محاسبه دمای روی شیشه نشان می‌دهد که در نمای جنوبی پس از افزودن لایه جدید شیشه، دمای روی شیشه قبلی افزایش می‌یابد. اما در نمای شمالی، دمای روی شیشه به علت نبود تابش مستقیم خورشید و اتلاف حرارت از طریق جابجایی هوایی بین دو شیشه کاهش خواهد یافت (جدول ۱ و نمودارهای ۱ و ۲). یادآوری می‌گردد که مقادیر دمای روی شیشه برای روزهای ۱ دی‌ماه، ۱۵ دی‌ماه، ۱ فروردین، ۱۵ تیرماه، ۱ مهرماه، و ۱۵ مهرماه محاسبه شده است.[۳] در انجام محاسبات، دمای متوسط ماهانه براساس آمار ۱۰ ساله هواشناسی (۱۹۹۴-۱۹۸۴)، و مقادیر دمای آسایش برای زمستان و تابستان در تهران[۴] در نظر گرفته شده است.

طرز کار نمای گردآورنده به این ترتیب است که هوای موجود در فاصله ۳۰cm بین دو نمای جنوبی در اثر تابش خورشید گرم شده و به طرف بالا حرکت می‌کند. هوای گرم از طریق کانال تعبیه شده در سقف کاذب به بخش شمالی هدایت می‌شود. کانال

مزبور باید کاملاً از نظر حرارتی عایق باشد تا اتلاف حرارت از جدار کانال به محیط سقف کاذب به حداقل برسد. هوای گرم شده پس از عبور از داخل سقف کاذب وارد فاصله ۱۰cm بین دو شیشه نمای شمالی می‌شود و در اینجا در اثر تبادل با سطوح شیشه‌ای سرد شده و به طرف پائین حرکت می‌کند. جریان هوای گرم در فاصله بین دو جدار شیشه می‌شود. هوای سرد شده سپس از طریق کانال موجود در کف کاذب مجدداً برای گرم شدن به نمای جنوبی باز گردانده می‌شود (شکل ۲). برای تأمین جریان هوا لازم است از یک فن در محل سقف کاذب استفاده شود. به منظور پیشگیری از انتقال حرارت بیش از حد نمای جنوبی به اتاقهای مجاور آن در اثر تابش خورشید، باید از عایق حرارتی مناسب در سمت داخلی شیشه‌های این قسمت استفاده شود. محاسبات حرارتی‌نمای گردآورنده برای تاریخهای ۱ مهرماه، ۱۵ مهرماه، ۱ دی‌ماه، و ۱۵ دی‌ماه (دی‌ماه سردترین فصل سال در تهران



شکل ۱. پلان شماتیک ساختمان ۱۴ طبقه

شکل ۲. راه‌حل پیشنهادی برای بهره‌گیری از انرژی خورشید ـ زمستان

جدول ۱. دمای روی شیشه قبل و بعد از افزودن نمای شیشه‌ای

	قبل از افزودن نمای جدید				بعد از افزودن نمای جدید			
	نما جنوبی		نمای شمالی		نمای جنوبی		نمای شمالی	
تاریخ	tg_o	tg_i	tg_o	tg_i	tg_o	tg_i	tg_o	tg_i
۱ دی‌ماه	۳۸,۵	۲۳,۴	۱۵,۳	۲,۷	۷۳,۴	۵۰,۶	۱۱,۷	۳,۲
۱۵ دی‌ماه	۳۸,۵	۲۳,۳	۱۵,۳	۲,۷	۷۳,۳	۵۰,۵	۱۱,۸	۳,۲
۱ فروردین	۳۷,۱	۳۵,۴	۱۹,۹	۱۷,۸	۶۷,۱	۵۵,۷	۲۰,۷	۱۸,۸
۱۵ تیرماه	۳۶,۹	۴۴,۸	۳۰,۷	۳۷	۵۳,۷	۵۳,۹	۳۵,۳	۳۸,۵
۱ مهرماه	۳۶,۲	۳۱,۹	۱۹,۳	۱۵,۳	۶۲,۲	۵۰,۳	۱۹,۵	۱۶,۳
۱۵ مهرماه	۳۷,۸	۳۳,۵	۱۹,۲	۱۵,۲	۶۶,۳	۵۳,۶	۱۹,۲	۱۶,۱

tg_o = دمای شیشه خارجی tg_i = دمای شیشه داخلی

است) به صورت ساعتی در طول روز و هنگامی که تابش خورشید موجود است انجام گرفته است. روش محاسبه به این ترتیب است که ابتدا ضریب انتقال حرارت نمای گردآورنده (U_c)[۳] تعیین شد. سپس بازده گردآورنده (F') و ضریب برداشت آن (F_R) مشخص گردید.[۴] سپس با توجه به متوسط تعداد ساعات آفتابی هر ماه (مستخرجه از آمار هواشناسی ۱۰ ساله تهران برای سالهای ۱۹۹۴ - ۱۹۸۴) میزان شدت تابش کلی ساعتی (I_t)، دمای ساعتی محیط، دمای صفحه جاذب در نمای گردآورنده (T_p)، و دمای سیال ورودی (T_f در اینجا هوا) محاسبه شد.[۵] در نتیجه مقدار انرژی حرارتی مفید جذب شده (Q_u) توسط نمای گردآورنده برای هر ساعت از روزهای نامبرده که تابش آفتاب وجود دارد محاسبه گردید:

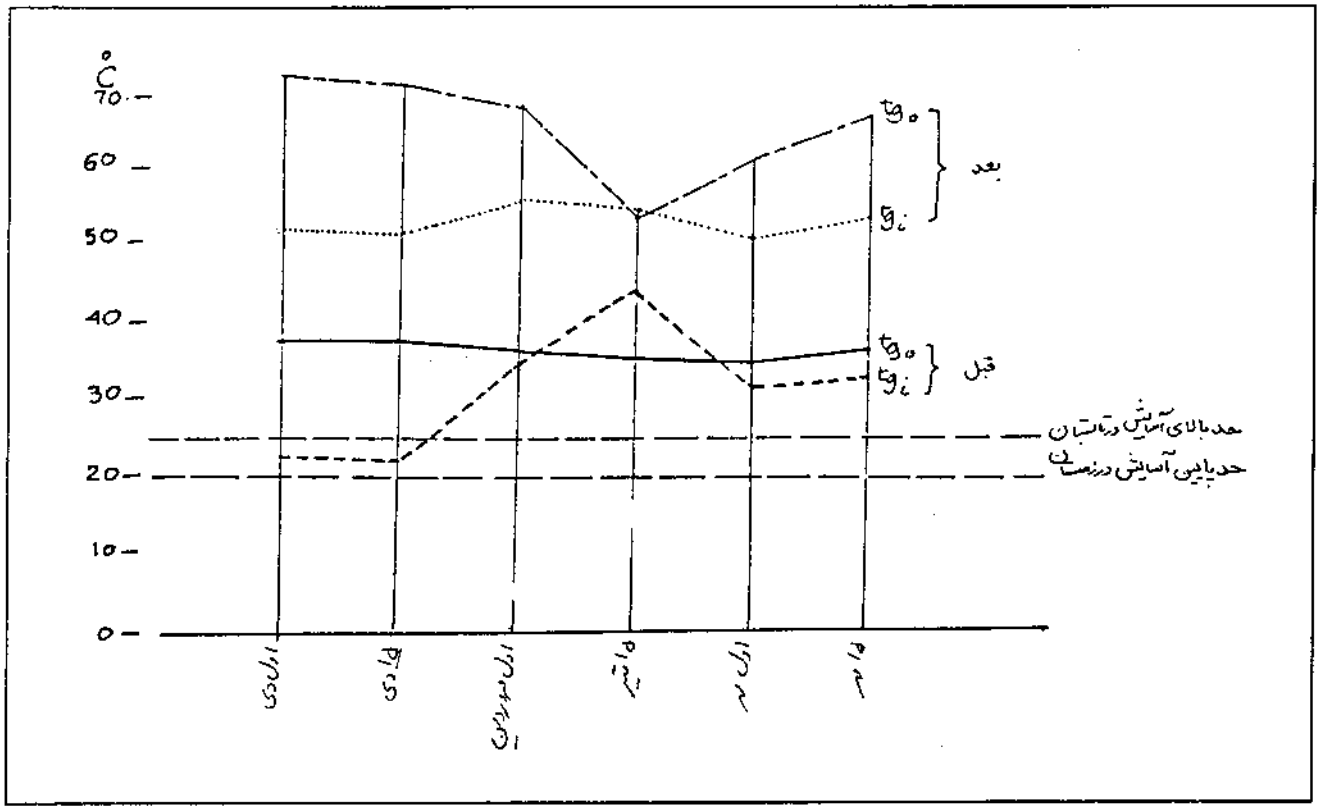
$$Q_c = A_c F_R [S - U_c (T_{i,t} - T_a)]$$

در انتها مقدار فوق با انرژی مورد نیاز (P) برای هر آپارتمان مقایسه شد که نتایج حاصله در نمودار ۳ نشان داده شده است. همانطور که از نمودار مزبور استنباط می‌شود، در دهانه‌های میانی به علت سطوح خارجی اندک آپارتمانهای شمالی و جنوبی مقدار انرژی مفید جذب شده همواره از انرژی مورد نیاز بیشتر است. بنابراین می‌توان در اوقات سرد سال به سادگی از این روش برای تأمین تمامی گرمایش آپارتمانهای شمالی و جنوبی دهانه‌های میانی در ساعتهای آفتابی استفاده کرد. در آپارتمانهای شرقی نزدیک به ۶۳٪ انرژی مورد نیاز در زمستان (روزهای اندازه‌گیری) را می‌توان از طریق نمای گردآورنده تأمین نمود. در آپارتمانهای غربی به علت سطوح شیشه‌ای وسیع و اتلاف فراوان حرارت به خارج تنها ۳۱٪ انرژی مورد نیاز بوسیله نمای گردآورنده فراهم می‌گردد. در صورتی که سطوح مزبور کاهش یابند و به طور مؤثر عایق حرارتی شوند، انرژی بیشتری را می‌توان در فضای داخل مورد استفاده قرار داد. در هر ۳ دهانه طی روزهای پائیز بسیار بیشتر از نیاز حرارتی انرژی جذب می‌شود. روش استفاده از انرژی مازاد جمع‌آوری شده، استفاده از یک پمپ گرمایی و ذخیره حرارت مازاد در مخزن پیش گرمایش برای تأمین آب گرم بهداشتی و پیش گرمایش آب درون فن‌کوئیل‌ها در اوقات سرد است.[۵] در جدول ۲ نسبت حرارت جذب شده به نیاز حرارتی آپارتمانهای موجود در تاریخهای ۱ دی ماه، ۱۵ دی ماه، ۱ مهرماه، و ۱۵ مهرماه آورده شده است.

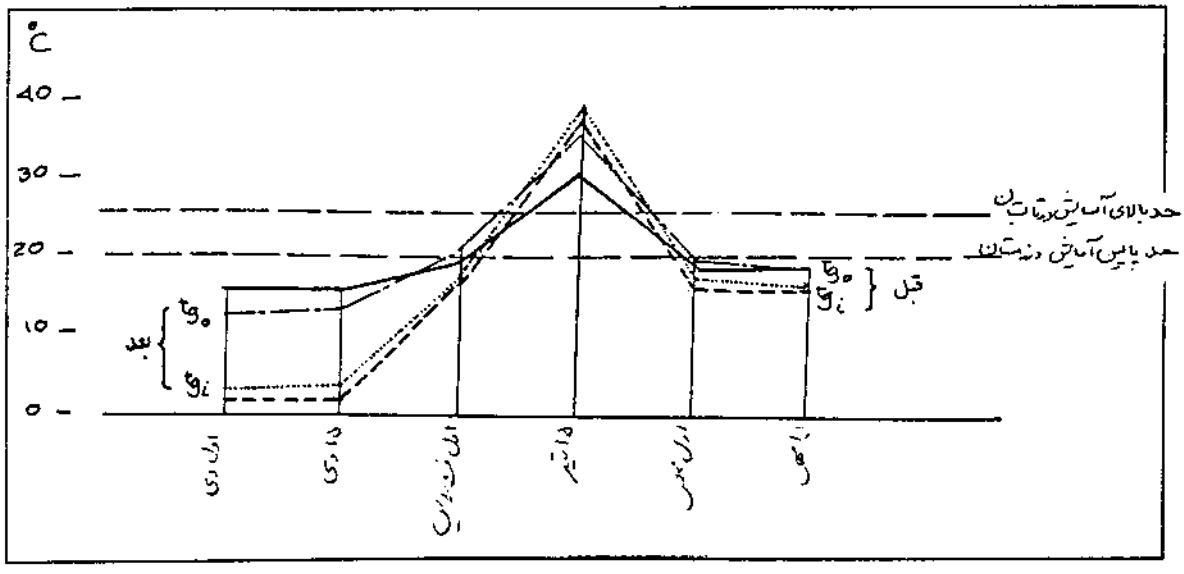
از نمودار ۳ و جدول ۲ به خوبی استنباط می‌شود که در اوقات معتدل سال مثل فصل بهار و اوایل پائیز، به علت جذب حرارت بیش از اندازه مورد نیاز و در صورت عدم استفاده از حرارت تولیدی مازاد، در فضاهای داخلی گرمای بیش از حد[۶] خواهیم داشت که باعث خروج دمای داخل از محدوده آسایش حرارتی می‌شود. به همین دلیل لازم است در این اوقات به روشی که پیش از این اشاره شد گرمای مازاد را ذخیره نمود و یا به فضای خارج راند تا دمای داخل از حد آسایش فراتر نرود.

جدول ۲. نسبت درصد گرمای جذب شده به نیاز حرارتی آپارتمان

موقعیت آپارتمان	۱ دی‌ماه	۱۵ دی‌ماه	۱ مهرماه	۱۵ مهرماه
میانی	٪۸۸	٪۱۱۲	٪۸۵۹	٪۹۵۳
شرقی	٪۳۱	٪۳۱	٪۲۴۲	٪۲۶۹
غربی	٪۶۴	٪۶۳	٪۴۹۲	٪۵۵۳



نمودار ۱. دمای روی شیشه قبل و بعد از افزودن نمای شیشه‌ای در جبهه جنوبی



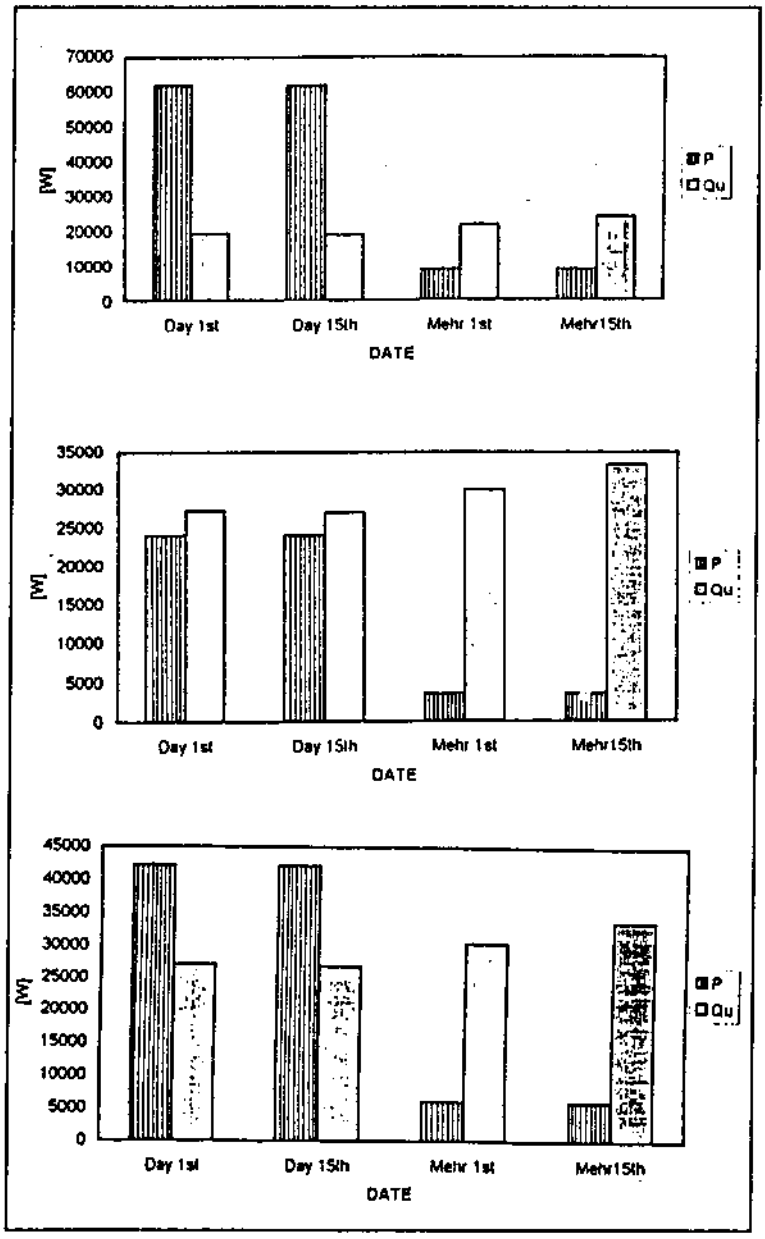
نمودار ۲. دمای روی شیشه قبل و بعد از افزودن نمای شیشه‌ای در جبهه شمالی

جدول ۳. اثر سرعتهای مختلف هوا
برجذب حرارت توسط سیال هوا در اول دیماه

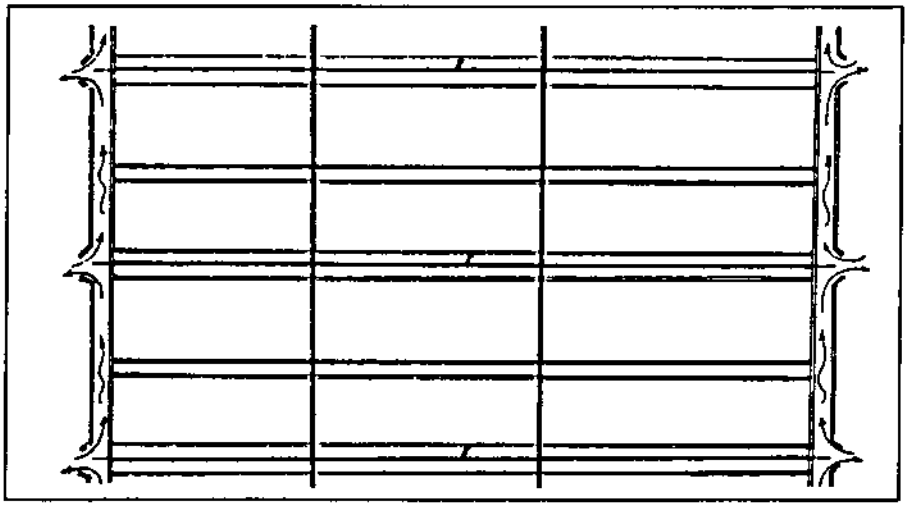
سرعت [m/sec]	ΔT_f [°K]**	η*
۱	۶/۳	٪۳
۰/۵	۱۷	٪۴۱
۰/۳	۲۳/۷	٪۶۵

* ΔT_f [°K] اختلاف دمای سیال ورودی برحسب کلوین
** η = ضریب جذب به درصد $(Q_u / A_c) / I$

ذکر این نکته ضروری است که سرعت جریان هوای بین دو لایه شیشه نقش عمده در میزان جذب حرارت دارد. محاسبات با سرعت [m/sec] ۱ نشان داد که حرارت کافی توسط سیال هوا جذب نمی‌شود. بنابراین سرعت به [m/sec] ۰/۵ کاهش داده شد. با چنین سرعتی هوا به اندازه‌ای گرم می‌شود که می‌تواند مانع از اتلاف حرارت اتاقهای شمالی به سمت خارج گردد. انجام محاسبات با سرعت [m/sec] ۰/۳ حاکی از این امر بود که نه‌تنها شرایط قبل فراهم می‌شود، بلکه حرارت مازاد برای پیش گرمایش این فضاها از طریق سقف کاذب نیز می‌توانند تأمین شود. در (جدول ۳) مقایسه‌ای بین اثر سرعتهای مختلف هوا بر میزان جذب حرارت توسط سیال مزبور صورت گرفته است.



نمودار ۳. میزان نیاز حرارتی (P) و گرمای جذب شده (Q_u) برای دهانه‌های غربی (بالا)، میانی (وسط)، و شرقی (پائین).



شکل ۳. راه‌حل پیشنهادی برای کاهش
بار برودتی ـ تابستان

جدول ۴. نسبت کاهش حرارت به توان سرمایشی مورد نیاز
در ۱۵ تیرماه (برحسب درصد)

موقعیت آپارتمان	شرقی	میانی	غربی
جبهه جنوبی	٪۱۵۴	٪۲۳۱	٪۹۰
جبهه شمالی	٪۲۷	٪۶۰	٪۱۱

جدول ۵. دمای روی شیشه
در صورت تأمین سایه بر نمای جنوبی (C°)

روز سال	t_{so}	t_{si}
اول دی	۵/۱	۱۴/۱
۱۵ دی	۵/۲	۱۴/۲
اول فروردین	۵/۹	۲۵/۳
۱۵ تیر	۴/۱	۳۰/۸
اول مهر	۶	۲۳/۵
۱۵ مهر	۵/۴	۲۲/۷

جدول ۶ نسبت کاهش حرارت به توان سرمایشی مورد نیاز
در ۱۵ تیرماه (برحسب درصد)

موقعیت آپارتمان	شرقی	میانی	غربی
جبهه جنوبی	٪۲۳۷	٪۳۵۶	٪۱۹۳

۳. نمای گردآورنده در اوقات گرم:

از نمای گردآورنده در اوقات سرد برای گرمایش فضاهای داخل می‌توان استفاده کرد. اما همین نما در اوقات گرم در اثر تابش خورشید باعث افزایش بیش از حد دمای داخل خواهد شد. بنابراین لازم است به ترتیبی گرمای ایجاد شده به بیرون رانده شود. چون در طول تابستان دمای هوا خارج فراتر از حد آسایش حرارتی است، برای ایجاد خنکی نمی‌توان آن را در مسیر زمستانی هوا به گردش در آورد و ایجاد سرما نمود. روش خنک‌سازی در وهلهٔ اول استفاده از سایبان است. بدیهی است که سایبان خارجی همواره بهتر از سایبان داخلی عمل می‌کند. در صورت استفاده از سایبان داخلی باید هوای بین دو جدار شیشه‌ای به بیرون رانده شود تا گرمای حاصله در اثر تابش آفتاب به فضای داخل منتقل نگردد. (شکل ۳)

با فرض سرعت حرکت هوا به میزان ۱ [m/sec] نسبت کاهش حرارت به توان سرمایشی مورد نیاز برای ۱۵ تیرماه (گرمترین روز سال) در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که در جدول مزبور مشاهده می‌شود میزان کاهش دما در نمای جنوبی بیش از نمای شمالی است. زیرا در جبهه جنوبی به علت وجود فاصله‌ای بیشتر بین دو جدار شیشه‌ای حجم بیشتری از هوا به بیرون رانده می‌شود. در صورتی که در نمای جنوبی از سایبان استفاده شود، دمای لایه‌های شیشه در تاریخهای مختلف مطابق جدول ۵ خواهد بود. میزان سایه ایجاد شده ۱۰۰٪ و سایبان خارجی فرض شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، علیرغم تأمین ۱۰۰٪ سایه بر نمای جنوبی در ۱۵ تیرماه، دمای روی شیشه از حد آسایش خارج است و لازم است با خروج هوای گرم بین دو شیشه مانع از افزایش دمای داخل شد.

۴. نتیجه:

ملاحظه می‌شود که می‌توان در اقلیم‌های پر آفتابی نظیر اقلیم تهران، بخشی از انرژی گرمایشی مورد نیاز در زمستان و تمامی نیاز گرمایشی فصل پاییز را در بناهای بلند از تابش آفتاب تأمین نمود. برای این امر لازم است که بنای بلند از ابتدا با هدف استفاده از انرژی تابشی خورشید طراحی شود. در این صورت می‌توان در مصرف سوختهای فسیلی صرفه‌جویی کرد و از آلودگی هوا و تبعات بیماری‌زای آن در شهرها کاست و شرایط حرارتی مناسبتری را برای ساکنین بنا فراهم آورد.

یکی از راههای نیل به این هدف که اینک در معماری کشورهای پیشرفته از آن استفاده می‌گردد دو جداره کردن نمای ساختمان‌های شیشه‌ای است. حداقل فاصله جدارها ۳۰ سانتیمتر و حداکثر آن در حدود ۷۰ سانتیمتر می‌باشد و می‌بایستی در تابستان فضای حد فاصل دو نما جهت خنک شدن رویه داخلی با جریان طبیعی هوا تهویه گردیده و در زمستان با جلوگیری از تهویه در اثر وجود تابش مستقیم و غیرمستقیم خورشید این فضا بصورت گلخانه خورشیدی عمل کرده و از هدر رفتن انرژی گرمایشی ساختمان جلوگیری می‌نماید.

در هر دو حالت فوق صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف سوختهای فسیلی به عمل می‌آید.

پی‌نوشتها:

۱.

2. heat absorbing glass (ASHRAE - Fundamentals, 1993)

۳. برای نحوه محاسبه به «محاسبات» ارائه شده در پایان مقاله رجوع شود.

۴. برای نحوه محاسبه به «محاسبات» رجوع شود.

۵. برای نحوه محاسبه به «محاسبات» رجوع شود.

6. over heat

منابع و مآخذ:

- Fuschillo, N.: Semi Transparent Solar Collector Window Systems. Solar energy,Vol. 17, 1975, pp. 159-165.
- Hoffman, M., et al.: Solar Heating Using Common Building Elements as Passive Systems, Solar Energy, Vol. 30, No. 3, 1983, pp. 275-285.
- ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating. Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, 1993, pp. 27, 1-27, 27.
- رضایی حریری، محمدتقی ـ فیاض، ریما: محدوده آسایش حرارتی در تهران. در دست چاپ.
- Rezai, Hariri, M.T.: Betreibswirschaftliche Optimierung des Warmeschutzes Raumumschliessender Bauteile - Dissertion, Institut F. Hochbau U. Entwerfen, Wien, 1983. p. 85.

محاسبات

محاسبه شدت تابش خورشید بر سطح:

$I_t = I_D + I_{ds} + I_{dg}$

I_t = تشعشع کلی خورشید بر یک سطح

I_D = تشعشع مستقیم خورشید

I_{ds} = تشعشع پخش از آسمان

I_{dg} = تشعشع پخش از محیط اطراف

$I_D = I_{DN} \cos i$

$I_{DN} = A / [\exp(B/\sin \alpha)]$

I_{DN} = تشعشع مستقیم عمودی

A^* = تشعشع خورشید در توده هوای صفر

B^* = ضریب محو جوی

$I_{ds} = C\, I_{DN} F_{ss}$

C^* = ضریب تشعشع پخش

F_{ss} = زاویهٔ بین سطح و آسمان (۰/۵ برای سطوح عمودی)

$I_{dg} = I_{DN} \rho_g F_{sg}$

$I_{DN} = i$ شدت کل تشعشع خورشید که بر زمین می‌تابد

$I_{DN} = I_{DN} (C + \sin \alpha)$

ρ_g** = انعکاس از محیط

F_{sg} = ضریب زاویهٔ بین سطح و زمین

$F_{sg} = (1 - \cos \beta) / 2$

محاسبهٔ دمای روی شیشه:

$I_{gn} = I_o + (\alpha I_{o+} \alpha I_{i-} q_{rad}) (1/h_o + R_g/2)$

$t_g = t_i + q_{rad} (1/h_i + R_g/2)$

$q_{rad} = U [\, \alpha I_o / h_o + \alpha I_i (1/h_o + 1/h_{i+0}) (t_o - t_i) \,]$

$\tau = \tau_o \tau_i / (1 - \rho_2 \rho_3)$

$F = \tau + U \alpha_o / h_o + [\, (U/h_o) + (U/h_i) \,] \alpha_i$

$q_{in} = F I_t + U (t_o - t_i)$

$\alpha I_o = I_t \alpha_o$

$\alpha I_i = I_t \alpha_i$

$\alpha_{o+} \alpha_1 + \alpha_2 \tau_o \rho_3 / (1 - \rho_2 \rho_3)$

$\alpha_{i-} \alpha_3^* \tau_o / (1 - \rho_2 \rho_3)$

t_{go} = دمای سطحی شیشهٔ خارجی

t_{gi} = دمای سطحی شیشهٔ داخلی

t_o = دمای هوای خارج

t_i = دمای فضای داخل

h_o = ضریب انتقال گرمای شیشهٔ خارجی

h_i = ضریب انتقال حرارت در شیشهٔ داخلی

h_o = ضریب انتقال حرارت هوا

R_{go} = مقاومت حرارتی شیشهٔ خارجی

R_g = مقاومت حرارتی شیشهٔ داخلی

q_{rad} دریافت تشعشع به سمت داخل و انتقال حرارت از هوا

αI_o = تشعشع خورشیدی جذب شده توسط شیشهٔ خارجی

αI_i = تشعشع خورشیدی جذب شده توسط شیشهٔ داخلی

α_o = ضریب جذب شیشهٔ خارجی در یک واحد

α_i = ضریب جذب شیشهٔ داخلی در یک واحد

α_1 = ضریب جذب شیشهٔ خارجی برای تابش خورشید بر سطح خارجی

α_2 = ضریب جذب شیشهٔ خارجی برای تابش خورشید بر سطح داخلی

α_3 = ضریب جذب شیشهٔ داخلی برای تابش خورشید بر سطح خارجی

τ_o = ضریب عبور شیشهٔ خارجی

ρ_2 = ضریب انعکاس سطح داخلی شیشهٔ خارجی

ρ_3 = ضریب انعکاس سطح خارجی شیشهٔ داخلی

* Table 7, ASHRAE Fundamentals , 1993 ,p 27-9

**Table 12, ASHRAE Fundamentals , 1985 ,p 27-9

محاسبات گردآورنده:

$$F_R = (m_a c_{p,a} / U_c A_c) [1 - \exp (-F' U_c A_c / m_a c_{p,a})]$$

m_a = میزان جریان هوا [kg/sec]

$c_{p,a}$ = گرمای ویژهٔ هوا [kj/kg K]

F' = ضریب کارآیی گردآورنده

$$F' = \bar{h}_c / (\bar{h}_c + U_c)$$

$\bar{h}_c$ = ضریب انتقال کانال

$$Q_u = A_c F_R [S - U_c (T_{i,j} - T_a)]$$

Q_u = انتقال مفید حرارت[W]

A_c = سطح گردآورنده[m^2]

F_R = ضریب برداشت گرما

S = تشعشع خورشیدی جذب شده[W/m^2]

U_c = اضریب اتلاف حرارت گردآورنده[$kj/h\ m^2$]

$T_{i,j}$ = دمای سیال ورودی به گردآورنده [°K]

T_a = دمای محیط [°K]

$$U_c = U_{cp} + U_b + U_e$$

U_c = ضریب اتلاف حرارت گردآورنده[$W/m^2\ °K$]

U_{cp} = ضریب اتلاف حرارت از پوشش گردآورنده[$W/m^2\ °K$]

U_b = ضریب اتلاف حرارت از پشت گردآورنده[$W/m^2\ °K$]

U_e = ضریب اتلاف حرارت از سطوح مجاور گردآورنده[$W/m^2\ °K$]

$$h_{p-pv} = h_w = 2.8\ V^{0.8} / D^{0.2}$$

V = سرعت سیال[m/sec]

D = فاصلهٔ بین دو سطح[m]

$$h_{p-sky} = 5.7 + 3.8\ V$$

V = سرعت باد(0-10 m/sec)

$$U_{cp} = ([1/ (h_{p-pv} + h_{p-sky})] + [1/ (h_{g-atm} + h_{g-sky})])^{-1}$$

h_{p-pv} = ضریب انتقال حرارتی هوا بین صفحهٔ جاذب و پوشش

h_{p-sky} = ضریب انتقال حرارت از طریق تشعشع بین صفحهٔ جاذب و پوشش

h_{g-atm} = ضریب انتقال حرارتی هوا از پوشش به خارج

h_{g-sky} = ضریب انتقال حرارت تشعشی از پوشش به خارج

$$h_{p-sky} = \sigma (T_p^2 + T_g^2) (T_p - T_g) / (1/ \epsilon_p + 1/\epsilon_g - 1)$$

σ = ثابت اشتفان بولتزمن[$W/m^2\ K^4$]

T_p = دمای صفحهٔ جاذب[K]

T_a = دمای محیط[K]

ϵ_p = ضریب تشعشع حرارتی صفحهٔ جاذب

ϵ_g = ضریب تشعشع حرارتی پوشش

$$h_{g-sky} = \epsilon_g \sigma (T_g^2 + T_a^2) (T_g + T_a)$$

T_g = دمای پوشش[K]

$$U_b = [\Sigma (\delta_i / K_i) + 1/h_b]^{-1}$$

δ_i / K_i = مقاومت لایه های پشتی گردآورنده[$m^2\ K/W$]

$h_b = Cl$ = ضریب انتقال حرارتی هوا [$W/m^2\ °K$]

$$U_e = (A_e / A) [\Sigma (\delta_i / K_i) + 1/h_e]^{-1}$$

A_e = سطح تبادل حرارت در سطوح جانبی گردآورنده[m^2]

A = سطح صفحهٔ جاذب [m^2]

h_e = ضریب انتقال حرارتی هوا [$W/m^2\ °K$]

$$\Delta T_i = Q_u / m_a c_{p,a}$$

ΔT_i = افزایش دمای هوا [K]

$$q_u = Q_u / A_c = I (\tau\alpha)_e - U_c (T_p - T_a)$$

q_u = انرژی مفید جذب شده در هر واحد سطح گردآورنده[W]

I = تشعشع کلی خورشید بر گردآورنده[W/m^2]

τ = ضریب انتقال انرژی از پوشش

α = ضریب جذب انرژی از صفحهٔ جاذب

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) / [1 - (1 - \alpha) \rho]$$

ρ = ضریب انعکاس پوشش برای شعاعهای پخش

$$\eta = (Q_u / A_c) / I$$

η = بازده لحظه‌ای گردآورنده