

## تهیه الگوریتم کنترل سایه‌بان‌های متحرک و بررسی و بهینه کردن شرایط کنترلی برای فصول سرد در شهر تهران\*

میثم اکبری پایدار<sup>۱</sup>، بهروز محمدکاری<sup>۲</sup> (نویسنده مسئول)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۷

### چکیده

هدف از این پژوهش تهیه الگوریتم پیشنهادی برای شبیه‌سازی رایانه‌ای و تعیین زاویه مناسب سایه‌بان متحرک خارجی، در طول روز می‌باشد. نحوه کنترل سایه‌بان متحرک بر اساس دمای داخلی می‌باشد. الگوریتم تهیه شده، در هر گام زمانی، با تکرار محاسبات دمای داخلی برای مقدار تابش مختلف عبوری از بین سایه‌بان، و مقایسه نتایج بدست آمده با دمای معیار تعیین شده، نتیجه بهینه را انتخاب می‌کند. روش استفاده شده برای انجام محاسبات حرارتی ساختمان، روش عددی تفاضل محدود می‌باشد. جداره‌های منطقه مورد نظر شبکه‌بندی شده و معادله تعادل حرارت برای هر یک از گره‌ها به روش کرنک- نیکلسن گسسته شده است. به منظور تحلیل عملکرد سایه‌بان متحرک، نتایج به‌دست آمده، با حالت‌های بدون سایه‌بان و با سایه‌بان ثابت مقایسه شده است. دمای آسایش ۲۱ درجه سلسیوس و دمای معیار کنترل سایه‌بان متحرک، در تحلیل اول ۲۱ درجه سلسیوس تعیین شد. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل اول و با هدف دریافت بیشتر تابش خورشیدی و بهبود عملکرد سایه‌بان، در تحلیل دوم، دمای کنترل ۲۳ درجه تعیین شد. بر اساس تحلیل انجام شده برای ساختمانی در تهران با جداره شفاف رو به سمت جنوب، میزان بار گرمایی برای ماه دسامبر (آذر- دی)، در حالت سایه‌بان متحرک با دمای کنترل ۲۳ درجه، به میزان ۳۳ درصد از سایه‌بان ثابت کمتر است. از طرف دیگر، بیشترین اختلاف دمای داخلی و دمای آسایش در حالت‌های سایه‌بان متحرک و ثابت به ترتیب ۲ و ۴ درجه است در نتیجه سایه‌بان متحرک شرایط آسایش مطلوب‌تری فراهم نموده و دمای داخلی نوسان کمتری دارد.

### واژه‌های کلیدی

تابش خورشیدی، الگوریتم کنترل، سایه‌بان متحرک، شبیه‌سازی رایانه‌ای.

۱. کارشناس ارشد، مهندسی معماری و انرژی، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران

۲. استادیار فیزیک ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

## ۱- مقدمه

پوسته ساختمان‌ها به عنوان عنصر جدا کننده فضای داخلی از محیط بیرون می‌باشند که عملکردهای مختلفی مانند کنترل عوامل محیطی (دما، نور، باران، باد و ...)، ذخیره انرژی، سازه، ایجاد امنیت، زیبایی و ... را شامل می‌شوند. یکی از مهمترین عملکردهای آنها تأمین نیازهای آب و هوایی و ایجاد شرایط آسایش حرارتی برای ساکنین می‌باشد. پوسته ساختمان بین ۱۵ الی ۴۰ درصد کل هزینه ساخت را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین می‌تواند به میزان بیش از ۴۰ درصد در هزینه‌های مرحله بهره‌برداری تأثیرگذار باشد (Wigging & Harris: 2002). به همین دلیل توجه به این موضوع در مرحله طراحی و ساخت می‌تواند در کنار کاهش هزینه ساخت و کاهش مصرف انرژی، شرایط آسایش مناسبی را برای کاربران ایجاد کند.

استفاده از نماهای شیشه‌ای در ساختمان‌های اداری و تجاری قابل توجه بوده و بخش زیادی از نما و یا کل نما با جدار شفاف پوشیده می‌شود. این جدارها معمولاً شامل عناصر کنترل کننده تابش خورشیدی می‌باشند. تکنولوژی‌های مختلفی همچون شیشه‌های کم‌گسیل این امکان را فراهم می‌سازند تا بتوان سطح شیشه ساختمان را افزایش داد بدون آن که انتقال حرارت از جدارها افزایش یابد. پوسته‌های شفاف امکان استفاده از نور روز و انرژی تابش خورشید را در کنار استفاده از انرژی تابش خورشید که از اهداف اصلی طراحی ساختمان‌های سبز می‌باشند را فراهم می‌سازد (Lee et al., 2004: 1).

پوسته ساختمان‌ها نقش مهمی در کنترل شرایط داخلی در مقابل شرایط متغیر خارجی، بر عهده دارند. دمای خارج ساختمان به صورت آهسته و در بازه زمانی طولانی تغییر می‌کند در حالی که میزان تابش و نور روز می‌تواند با سرعت بیشتر و در بازه گسترده‌تری تغییر کند. با توجه به تغییرات سریع و گسترده تابش خورشید، توجه به میزان تابش ورودی به فضای داخل مهمتر از عایقکاری می‌باشد که در اکثر موارد مورد کم توجهی قرار می‌گیرد. در اغلب موارد، راه حل ساده (سایه‌بان‌های ثابت) کافی نیستند و لازم است با ایجاد قابلیت تنظیم سریع، عملکرد مناسبی در مقابل تغییرات شرایط خارجی و انتظارات بهره‌برداران داشته باشد. این تکنولوژی می‌تواند در کنار جداره‌های شیشه‌ای و به عنوان یک سیستم الحاقی از بیرون و یا داخل مورد استفاده قرار گیرد. در تمام موارد نیاز به حسگرها، محرک‌ها و مرکز کنترل و پردازش داده وجود دارد (Lee et al., 2004: 1).

سایه‌بان‌های متحرک، در تابستان، با کنترل میزان تابش ورودی، از گرم شدن فضای داخلی جلوگیری کرده و باعث کاهش بار سرمایشی می‌شوند. همچنین با اجازه ورود تابش و نور خورشید در زمستان، بار گرمایی سیستم و استفاده از نور مصنوعی را به حداقل می‌رسانند. برای دسترسی به این نتایج سایه‌بان‌ها باید به خوبی کنترل شوند. در غیر این صورت تابش خورشیدی ناخواسته وارد فضای داخلی شده و باعث افزایش میزان مصرف انرژی برای سرمایش در تابستان و همچنین گرمایش در زمستان خواهد شد.

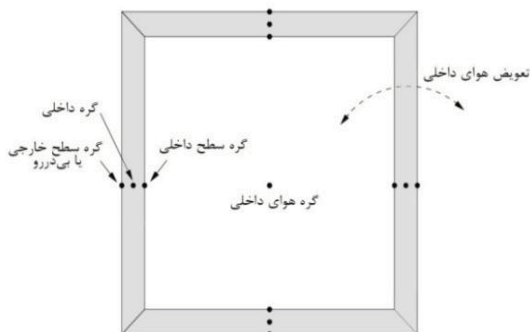
تحقیقات انجام گرفته در این زمینه به دو روش آزمایشگاهی و مدلسازی کامپیوتری می‌باشد. همچنین در برخی از موارد از ترکیب این دو روش استفاده شده است. روش آزمایشگاهی نتایج بررسی بر روی ساختمان‌های با مقیاس واقعی می‌باشد که با تحلیل داده‌های آب و هوایی و نتایج آزمایش‌ها به دست می‌آید. مطالعات لی و همکاران (Kim et al., 1998: 60) و کیم و همکاران (Kim et al., 2009: 1527) از نمونه‌های مطالعات آزمایشگاهی می‌باشند. لی و همکاران، به بررسی تاثیر کرکره متحرک بر میزان صرفه‌جویی در بار سرمایشی ساختمان و میزان کاهش انرژی الکتریکی مصرفی برای تامین روشنایی، با استفاده از یک مدل واقعی پرداخته‌اند. در این مدل دو اتاق در اقیلم اکلند کانادا مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مدل‌ها دارای یک کرکره متحرک و یک سیستم روشنایی الکتریکی قابل تنظیم می‌باشد که به منظور بهینه کردن میزان روشنایی و انرژی خورشیدی دریافتی، طراحی شده است. این مدل با یک مدل که دارای کرکره ثابت و سیستم روشنایی الکتریکی غیرقابل تنظیم مقایسه شده است. طبق این نتایج متوسط بار سرمایشی روزانه برای مدل با کرکره متحرک نسبت به مدل با کرکره ثابت ۱۷ تا ۳۲ درصد کاهش یافته است. همچنین متوسط انرژی الکتریکی روزانه برای روشنایی بین ۱۱ تا ۱۴ درصد کمتر می‌باشد (Lee et al., 1998: 60). کیم و همکاران به بررسی استفاده از سایه‌بان متحرک اتوماتیک و مقایسه آن با سایه‌بان دستی در مقیاس واقعی پرداخته‌اند. این مطالعه برای فصل تابستان و به منظور بررسی بار سرمایشی ساختمان انجام شده است. بر اساس نتایج این مطالعه، با استفاده از کرکره‌های متحرک اتوماتیک، می‌توان میزان انرژی مصرفی ساختمان را در مقایسه با کرکره‌هایی که به صورت دستی تغییر زاویه می‌دهند، کاهش داد. همچنین ایجاد شرایط آسایش در حالت اتوماتیک بهتر از حالت دستی می‌باشد (Kim et al., 2009: 1527).

## ۲- روش محاسباتی

بررسی مطالعات انجام شده در رابطه با موضوع، نشان داد که مطالعات انجام شده، بسیار محدود می‌باشند. در بین مطالعات انجام شده، تعداد معدودی از مطالعات، به صورت آزمایشگاهی هستند که این روش هزینه‌بر بوده و رسیدن به نتیجه نیازمند زمان طولانی می‌باشد. همچنین در مطالعات انجام شده به صورت مدلسازی کامپیوتری، تعیین زاویه سایه‌بان‌ها به صورت ماهانه و یا روزانه می‌باشد. در این مطالعات بار حرارتی برای بازه‌های زمانی ماهانه و یا روزانه برای زاویه مختلف سایه‌بان محاسبه شده و مناسب‌ترین زاویه برای روز و یا ماه تعیین می‌شود. در این روند محاسباتی، با توجه به ثابت بودن سایه‌بان در طول روز و یا ماه، امکان رسیدن به حداکثر بازدهی وجود ندارد. از اصلی‌ترین دلایل نبود مطالعات کامپیوتری به صورت محاسبه ساعتی زاویه سایه‌بان‌ها، نبود امکان محاسبات توسط نرم‌افزارهای مدلسازی موجود می‌باشد. به منظور رسیدن به این هدف نرم‌افزار محاسباتی می‌بایست در هر گام زمانی، با تکرار محاسبات دمای داخلی برای زوایای مختلف سایه‌بان، مقدار تابش بهینه عبوری از بین سایه‌بان را انتخاب نماید. به همین منظور، کد محاسباتی در زبان برنامه نویسی پایتون (Swaroop, 2013) طراحی شده است. برنامه طراحی شده، همزمان با انجام محاسبات خورشیدی و انتقال حرارت، بر اساس الگوریتم تعریف شده مناسب‌ترین زاویه را برای سایه‌بان متحرک تعیین می‌کند.

### ۲-۱- معادلات تعادل حرارتی

به منظور انجام محاسبات حرارتی ساختمان از روش عددی تفاضل محدود بر پایه تعادل حرارتی حجم کنترلی استفاده شده است. اجزاء مختلف منطقه، گره بندی شده و معادله تعادل برای هر یک از گره‌ها نوشته می‌شود. گره‌های تعریف شده برای هر منطقه شامل سه نوع گره داخلی عناصر ساختمانی، گره سطحی جداره‌ها و گره هوای داخلی منطقه می‌شوند که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱. هندسه گره‌بندی منطقه

در مطالعات انجام شده به روش مدلسازی کامپیوتری، از پارامترهای مختلفی برای کنترل سایه‌بان و روش‌های متفاوتی به منظور محاسبات عددی استفاده شده است (Carbonari et al., 2002: 392) (Hammad & Abu-Hijleh, 2010: 1888) (Cho et al., 1995: 1225) (Hijleh, 2010: 1888) (Ochoa & Capeluto, 2002, 1829). کاربری و همکاران در سال ۲۰۰۲ به بررسی جهت بهینه ساختمان کنترل اتوماتیک سایه‌بان متحرک بر روی نمای ساختمان اداری در سه شهر ایتالیا پرداخته‌اند. بر اساس نتایج این مطالعه میزان بار حرارتی در حالت سایه‌بان متحرک نسبت به سایه‌بان ثابت کمتر می‌باشد. همچنین استفاده از سایه‌بان‌های متحرک تأثیر جهت ساختمان در میزان بار حرارتی را کاهش می‌دهند (Carbonari et al., 2002: 392). حماده و ابوحجله در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر سایه‌بان متحرک بر میزان مصرف انرژی در ساختمان اداری در امارات پرداخته‌اند. با محاسبه میزان مصرف انرژی روزانه در زاویه‌های مختلف سایه‌بان‌ها مناسب‌ترین زاویه برای هر روز انتخاب شده است. طبق این نتایج میزان صرفه‌جویی در انرژی سالانه در ساختمان با سایه‌بان‌های متحرک برای نماهای جنوبی، شرقی و غربی به ترتیب ۳۴، ۲۸ و ۳۰ درصد بدست آمده است (Hammad & Abu-Hijleh, 2010: 1888). با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزارهای مدلسازی انرژی در بررسی عملکرد سایه‌بان متحرک، مطالعات محدودی در حالتی که سایه‌بان‌ها در طول روز حرکت می‌کنند انجام شده است. باستین و اسیتینس در سال ۲۰۱۲ با نوشتن الگوریتم مدلسازی به بررسی بازده بهینه گلخانه‌ها با سایه‌بان‌های متحرک خارجی و داخلی پرداخته‌اند. طبق نتایج این مطالعات با استفاده از ترکیب سایه‌بان‌های متحرک خارجی و داخلی نیاز به گرمایش گلخانه به میزان ۷۰ درصد کاهش یافته است همچنین تغییرات سایه‌بان‌ها در طول روز از خروجی الگوریتم نوشته شده به دست آمده است (Bastien & Athienitis, 2012: 995).

در این مطالعه سعی شده تا با بررسی شرایط تغییر زوایای سایه‌بان متحرک در طول روز و مقایسه آن با سایه‌بان ثابت و شرایط بدون سایه‌بان، به نتایجی در مورد میزان توانایی این سیستم برای کنترل شرایط داخلی دست یافت. همچنین با ارائه الگوریتم پیشنهادی امکان محاسبه و پیش‌بینی زاویه‌های بهینه به صورت ساعتی فراهم شده است.

روش پایه و معمول برای محاسبات انتقال حرارت در مصالح کدر به صورت انتقال یک بعدی و با در نظر گرفتن ویژگی‌های حرارتی ثابت برای مصالح می‌باشد. این سطح از محاسبات، استاندارد محاسبات انرژی برای ساختمان‌ها می‌باشد (Morrison, 2000: 10).

شکل ۲ نشان دهنده گره داخلی در قسمت میانی یک لایه با مصالح همگن می‌باشد. I گره مورد نظر برای نوشتن معادله تعادل می‌باشد همچنین گره‌های I-1 و I+1 نزدیکترین همسایگان به گره مفروض در جهت x می‌باشند (جهت جریان حرارت). حجم کنترلی (منطقه طوسی رنگ در تصویر) در اطراف گره I، به عمق Δx و به میزان Δz در جهت عمودی و Δy در جهت عمود بر کاغذ می‌باشد.

$$(\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z)_I \frac{T_I^{t+\Delta t} - T_I^t}{\Delta t} = \frac{k_{I-1} \Delta y \Delta z}{\Delta x_{I-1}} (T_{I-1}^t - T_I^t) + \frac{k_{I+1} \Delta y \Delta z}{\Delta x_{I+1}} (T_I^t - T_{I+1}^t) \quad (4)$$

رابطه (۱) نسبت ذخیره یا انتشار انرژی به میزان انتقال حرارت انجام شده و انرژی تولید شده در گره را نشان می‌دهد. میزان تغییر دمای حجم کنترلی، تغییرات انرژی ذخیره شده در این محدوده را نشان می‌دهد.

رابطه (۱) نسبت ذخیره یا انتشار انرژی به میزان انتقال حرارت انجام شده و انرژی تولید شده در گره را نشان می‌دهد. میزان تغییر دمای حجم کنترلی، تغییرات انرژی ذخیره شده در این محدوده را نشان می‌دهد.

رابطه (۱) نسبت ذخیره یا انتشار انرژی به میزان انتقال حرارت انجام شده و انرژی تولید شده در گره را نشان می‌دهد. میزان تغییر دمای حجم کنترلی، تغییرات انرژی ذخیره شده در این محدوده را نشان می‌دهد.

$$(\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z)_I \frac{T_I^{t+\Delta t} - T_I^t}{\Delta t} = q_{I-1 \rightarrow I} + q_{I \rightarrow I+1} \quad (1)$$

$$(\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z)_I \frac{T_I^{t+\Delta t} - T_I^t}{\Delta t} = \frac{k_{I-1} \Delta y \Delta z}{\Delta x_{I-1}} (T_{I-1}^{t+\Delta t} - T_I^{t+\Delta t}) + \frac{k_{I+1} \Delta y \Delta z}{\Delta x_{I+1}} (T_I^{t+\Delta t} - T_{I+1}^{t+\Delta t}) \quad (5)$$

روش استفاده شده در محاسبات ترکیبی از معادلات صریح و ضمنی می‌باشد. در این روش که به نام معادلات تفاضل کرنک- نیکلسن شناخته می‌شود، معادله تعادل ترکیبی مساوی از روش‌های صریح و ضمنی می‌باشد (Crank & Nicolson, 1947). دقت این روش از روش صریح و ضمنی بیشتر می‌باشد و دمای گره‌ها در زمان آینده با استفاده از میانگین انتقال حرارت، دریافت و ذخیره گرما در زمان حال و آینده محاسبه می‌شود. با ترکیب معادلات (۴) و (۵) و تقسیم آن به حجم کنترلی گره (ΔxΔyΔz) و انتقال جملات مجهول زمان آینده معادله به سمت چپ و جملات زمان حال معادله به سمت راست، معادله گسسته تعادل (۶) برای گره‌های داخلی عناصر ساختمانی به دست می‌آید.

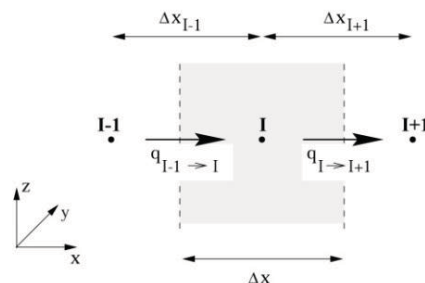
در این معادله Cp بیانگر ظرفیت حرارتی ویژه، ρ جرم حجمی مصالح، TI<sup>t</sup> دمای گره I در شروع بازه زمانی و TI<sup>t+Δt</sup> دمای گره I در انتهای بازه زمانی می‌باشند. t به عنوان زمان حال و t+Δt به عنوان زمان آینده در نظر گرفته می‌شود.

در این معادله Cp بیانگر ظرفیت حرارتی ویژه، ρ جرم حجمی مصالح، TI<sup>t</sup> دمای گره I در شروع بازه زمانی و TI<sup>t+Δt</sup> دمای گره I در انتهای بازه زمانی می‌باشند. t به عنوان زمان حال و t+Δt به عنوان زمان آینده در نظر گرفته می‌شود.

$$q_{I-1 \rightarrow I} \approx \frac{k_{I-1} \Delta y \Delta z}{\Delta x_{I-1}} (T_{I-1}^t - T_I^t) \quad (2)$$

$$q_{I \rightarrow I+1} \approx \frac{k_{I+1} \Delta y \Delta z}{\Delta x_{I+1}} (T_I^t - T_{I+1}^t) \quad (3)$$

$$\left[ \frac{2 \cdot (\rho c_p)_I}{\Delta t} + \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} + \frac{k_{I+1}}{\Delta x \Delta x_{I+1}} \right] T_I^{t+\Delta t} - \left[ \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} \right] T_{I-1}^{t+\Delta t} - \left[ \frac{k_{I+1}}{\Delta x \Delta x_{I+1}} \right] T_{I+1}^{t+\Delta t} = \left[ \frac{2 \cdot (\rho c_p)_I}{\Delta t} + \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} + \frac{k_{I+1}}{\Delta x \Delta x_{I+1}} \right] T_I^t + \left[ \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} \right] T_{I-1}^t + \left[ \frac{k_{I+1}}{\Delta x \Delta x_{I+1}} \right] T_{I+1}^t \quad (6)$$



شکل ۳ گره I بر روی سطح داخلی دیوار را نشان می‌دهد. حجم کنترلی، بخش سمت چپ گره (بخش طوسی

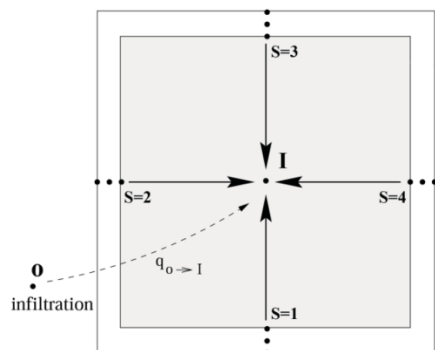
شکل ۲. شرایط گسسته سازی برای گره داخل عناصر ساختمانی

$$\left[ \frac{2 \cdot (\rho c_p)_I}{\Delta t} - \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} - \frac{h_{c,I}^t}{\Delta x} - \frac{\sum_{s=1}^N h_{r,s \rightarrow I}^t}{\Delta x} \right] T_I^t + \left[ \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} \right] T_{I-1}^t + \left[ \frac{h_{c,I}^t}{\Delta x} \right] T_{I+1}^t + \frac{q_{solar,I}^t}{\Delta x \Delta y \Delta z} + \frac{q_{cas-rad,I}^t}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (8)$$

در مقطع نشان داده شده در شکل ۴ عناصر جامد اطراف منطقه، حجم کنترلی (بخش طوسی رنگ در شکل) را در میان خود گرفته‌اند. در این نمونه I نشان دهنده گره هوا و گره‌های S مرز بین هوا و دیوارها می‌باشند. گره J نشان دهنده هوای منطقه کناری و O هوای خارجی می‌باشد. با فرض اینکه هوای اتاق به صورت یکنواخت می‌باشد اطلاعات گره I نشان دهنده شرایط کل حجم هوا می‌باشد. رابطه (۹) معادله تعادل صریح گره هوای داخل منطقه را نشان می‌دهد.

$$(\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z)_I \frac{T_I^{t+\Delta t} - T_I^t}{\Delta t} = \sum_{s=1}^N h_{c,s}^t A_s (T_s^t - T_I^t) + \dot{m}_{O \rightarrow I}^t C_p (T_O^t - T_I^t) + q_{cas-rad,I}^t + q_{plant,I}^t \quad (9)$$

در این معادله N تعداد سطوح مرزی در ارتباط با هوا،  $A_s$  مساحت و  $h_{c,s}^t$  ضریب انتقال همرفتی بین سطح S و هوای اتاق در زمان حال می‌باشند. همچنین M تعداد منطقه‌هایی است که هوا از آنها به حجم کنترلی انتقال پیدا می‌کند.  $\dot{m}_{O \rightarrow I}^t$  میزان نفوذ هوای بیرون در زمان حال و  $T_O^t$  دمای هوای محیط بیرون در زمان حال هستند.  $q_{cas-rad,I}^t$  انتقال حرارت همرفتی از منابع موجود در اتاق (مانند افراد، چراغ‌ها، تجهیزات اداری) در زمان حال،  $q_{plant,I}^t$  انتقال حرارت همرفتی به گره I در زمان حال از طریق تأسیسات مکانیکی مانند رادیاتور و یا سیستم تأسیساتی هوایی می‌باشند.



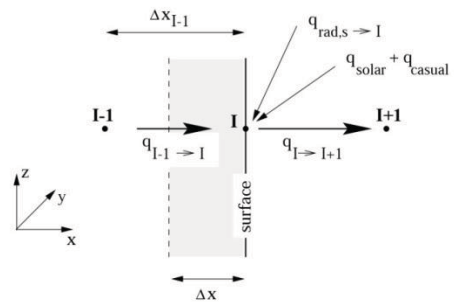
شکل ۴. تعادل حرارتی در گره هوای داخلی

رنگ) می‌باشد و بین گره I و I-1 قرار دارد. بخش سمت راست حجم کنترلی، در بین سطح صلب دیوار و هوای اتاق قرار دارد. گره همسایه در سمت راست گره مورد نظر، I+1 می‌باشد که این گره نماینده هوای اتاق است.

معادله تعادل حرارتی حجم کنترلی گره سطحی I ساختاری شبیه به معادله گره داخلی دارد با این تفاوت که دو نوع مختلفی از انتقال حرارت را نیز شامل می‌شود. رابطه (۷) معادله تعادل صریح برای گره سطح داخل عناصر ساختمانی را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} (\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z)_I \frac{T_I^{t+\Delta t} - T_I^t}{\Delta t} &= \frac{k_{I-1} \Delta y \Delta z}{\Delta x_{I-1}} (T_{I-1}^t - T_I^t) + \\ q_{solar,I}^t + q_{cas-rad,I}^t + \sum_{s=1}^N h_{r,s \rightarrow I}^t \Delta y \Delta z (T_s^t - T_I^t) &+ h_{c,I}^t \Delta y \Delta z (T_{I+1}^t - T_I^t) \end{aligned} \quad (7)$$

در این معادله N تعداد سطوح اطراف که با گره مورد نظر در ارتباط با طول موج بلند می‌باشند است.  $h_{r,s \rightarrow I}^t$  ضریب انتقال حرارت تابشی،  $h_{c,I}^t$  ضریب انتقال حرارت سطحی بین گره I و گره هوای اتاق در زمان حال می‌باشند.  $q_{solar,I}^t$  میزان تابش خورشیدی جذب شده توسط گره I در زمان حال و  $q_{cast-rad,I}^t$  تابش دریافتی از منابع موجود در اتاق (مانند افراد، چراغ‌ها، تجهیزات اداری) می‌باشند. رابطه (۸) گسسته‌سازی معادله تعادل برای گره‌های سطحی جدارها می‌باشد.



شکل ۳. تعادل حرارتی برای گره سطحی داخلی

$$\begin{aligned} \left[ \frac{2 \cdot (\rho c_p)_I}{\Delta t} + \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} + \frac{h_{c,I}^{t+\Delta t}}{\Delta x} + \frac{\sum_{s=1}^N h_{r,s \rightarrow I}^{t+\Delta t}}{\Delta x} \right] T_I^{t+\Delta t} &- \left[ \frac{k_{I-1}}{\Delta x \Delta x_{I-1}} \right] T_{I-1}^{t+\Delta t} - \left[ \frac{h_{c,I}^{t+\Delta t}}{\Delta x} \right] T_{I+1}^{t+\Delta t} \\ - \frac{\sum_{s=1}^N h_{r,s \rightarrow I}^{t+\Delta t} T_s^{t+\Delta t}}{\Delta x} &- \frac{q_{solar,I}^{t+\Delta t}}{\Delta x \Delta y \Delta z} - \frac{q_{cas-rad,I}^{t+\Delta t}}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \end{aligned} \quad (7)$$

### ۲-۳- روند محاسباتی و اطلاعات ورودی

کد محاسباتی، بر اساس معادلات ذکر شده در بخش قبل تهیه شده است. نرم‌افزار تهیه شده بر اساس اطلاعات ورودی طی مراحل مختلفی نتایج مورد نیاز را محاسبه می‌کند. در بخش نخست، پارامترهای مختلف مورد نیاز برای انجام محاسبات وارد برنامه تهیه شده می‌گردد. این اطلاعات شامل شرایط لایه بندی جدارها، ویژگی‌های حرارتی مصالح، هندسه منطقه مورد نظر، گام زمانی محاسبات و اطلاعات آب و هوایی می‌باشند. در مرحله بعد، اطلاعات ورودی طبقه بندی شده و هر یک از اطلاعات در قسمت محاسباتی مورد نیاز استفاده می‌شود در این مرحله، بر اساس شرایط لایه بندی جدارها و هندسه منطقه، شبکه گره بندی مورد نیاز برای انجام محاسبات انتقال حرارت تعیین می‌شود. میزان تابش دریافتی در هر سطح با محاسبه زاویه تابش خورشید (Duffie & Athienitis, 2003) و هندسه سطوح اتاق (Beckman, 2003) و محاسبه می‌شود. در بخش نهایی، برای هر یک از گره‌های تعریف شده معادله تعادل حرارتی نوشته می‌شود و ضرایب و اطلاعات بدست آمده از مراحل قبلی در معادلات قرار می‌گیرند. با توجه به مجهول بودن دمای گره‌ها در زمان آینده تمام معادلات مربوط به گره‌ها به صورت همزمان و به روش ماتریس حل می‌شوند (Morrison, 2000: 26). همچنین الگوریتم کنترل سایه بان متحرک، با تکرار محاسبات تعادل حرارتی، برای مقدار مختلف تابش عبوری از سایه بان، مناسب ترین حالت را بر اساس شرایط تعریف شده انتخاب می‌کند. این مراحل برای هر یک از گام‌های زمانی تکرار می‌شود. روند محاسباتی الگوریتم تهیه شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

اطلاعات آب و هوایی وارد شده به محاسبات از اطلاعات آب و هوایی نرم‌افزار انرژی پلاس گرفته شده است که مربوط به ایستگاه مهرآباد شهر تهران می‌باشد (EnergyPlus Engineering Reference, 2010: 134). این اطلاعات شامل میزان تابش خورشیدی، دمای هوای خارجی و سرعت باد می‌باشند که به صورت ساعتی هستند و متناسب با گام زمانی انتخاب شده درون‌یابی شده و در معادلات تعادل حرارت استفاده می‌شوند.

معادله گسسته شده تعادل مربوط به گره هوای داخلی منطقه در رابطه (۱۰) نشان داده شده است.

$$\left[ \frac{2 \cdot (\rho c_p)_I}{\Delta t} + \frac{\sum_{s=1}^N h_{c,s}^{t+\Delta t} A_s}{VOL_{room}} + \frac{\dot{m}_{o \rightarrow I}^{t+\Delta t} C_p}{VOL_{room}} \right] T_I^{t+\Delta t} - \left[ \frac{\dot{m}_{o \rightarrow I}^{t+\Delta t} C_p T_o^{t+\Delta t}}{VOL_{room}} \right] - \frac{q_{cas-conv,I}^{t+\Delta t}}{VOL_{room}} - \frac{q_{plant,I}^{t+\Delta t}}{VOL_{room}} = \left[ \frac{2 \cdot (\rho c_p)_I}{\Delta t} - \frac{\sum_{s=1}^N h_{c,s}^t A_s}{VOL_{room}} - \frac{\dot{m}_{o \rightarrow I}^t C_p}{VOL_{room}} \right] T_I^t + \left[ \frac{\dot{m}_{o \rightarrow I}^t C_p T_o^t}{VOL_{room}} \right] + \frac{q_{cas-conv,I}^t}{VOL_{room}} + \frac{q_{plant,I}^t}{VOL_{room}} \quad (10)$$

### ۲-۲- ضریب انتقال حرارت سطحی

ضرایب انتقال حرارت سطحی استفاده شده در محاسبات به روش ارائه شده توسط علمداری و هموند می‌باشد (Alamdari & Hammond, 1983). با توجه به متفاوت بودن میزان جریان هوا در سطوح جداره‌های افقی و عمودی معادله این دو حالت متفاوت می‌باشد. معادله (۱۱) برای جداره‌های افقی و معادله (۱۲) برای جداره‌های عمودی استفاده شده است.

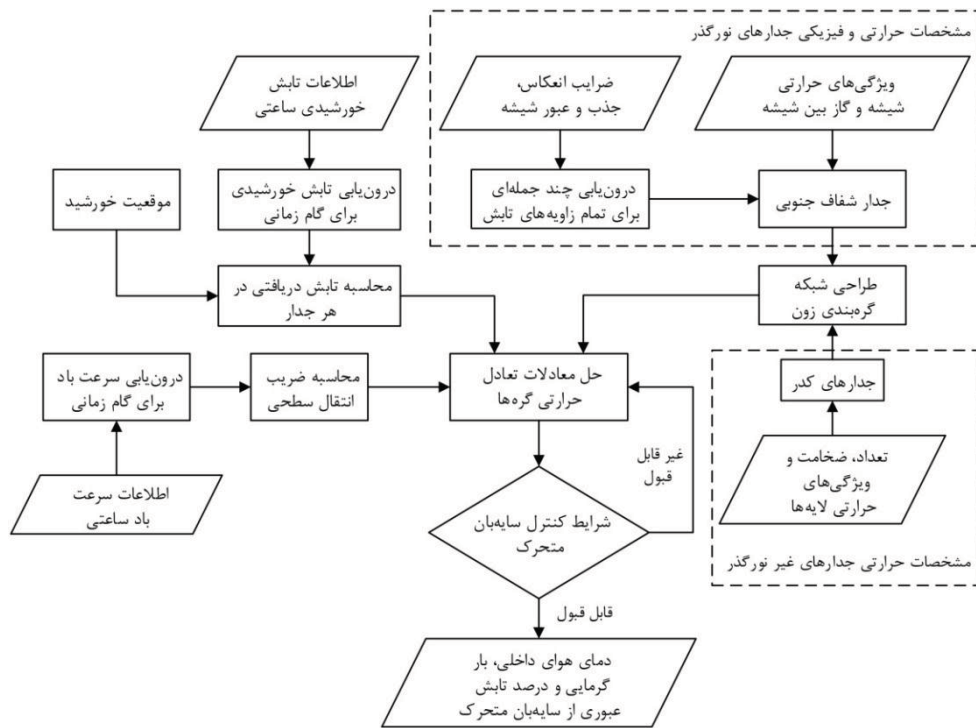
$$h_c = \left\{ \left[ 1.4 \cdot \left( \frac{\Delta T}{D_h} \right)^{1/4} \right]^6 + [1.63 \Delta T^{1/3}]^6 \right\}^{1/6} \quad (9)$$

$$h_c = \left\{ \left[ 1.5 \cdot \left( \frac{\Delta T}{H} \right)^{1/4} \right]^6 + [1.23 \Delta T^{1/3}]^6 \right\}^{1/6} \quad (10)$$

در این معادلات  $\Delta T$  اختلاف دمای بین سطح و هوای فضای داخلی و  $H$  ارتفاع دیوار می‌باشند.  $D_h$  قطر هیدرولیک برای سطوح افقی می‌باشد و معادله آن به صورت رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (13)$$

در این معادله  $A$  مساحت سطح مورد نظر و  $P$  محیط آن می‌باشند. همچنین برای محاسبات ضریب انتقال حرارت در سطوح داخلی و خارجی و همچنین در فاصله بین دو جداره شیشه از معادلات ارائه شده در ایزو ۱۵۰۹۹ سال ۲۰۱۳ که مربوط به پنجره می‌باشد استفاده شده است (ISO 15099, 2013: 10).



شکل ۵. مراحل عملکرد الگوریتم تهیه شده به منظور انجام تحلیل حرارتی

#### ۴-۲- شبکه‌بندی و گام زمانی

برای انجام محاسبات عددی انتقال حرارت، جدارهای منطقه گره‌بندی شده و معادله تعادل حرارت برای هر یک از گره‌ها نوشته شده است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه تعیین شده، دمای داخلی منطقه برای شبکه با فواصل ۱، ۲، ۵ و ۱۰ میلیمتری بین گره‌ها محاسبه شد. بر اساس نتایج بدست آمده، نمودار تغییرات دمای داخلی برای فواصل مختلف بین گره‌ها بر روی هم منطبق بوده و بیشترین اختلاف برابر ۰.۱/ درجه سلسیوس می‌باشد. با توجه به اینکه با کاهش فاصله بین گره‌ها تا ۲ میلیمتر، زمان مورد نیاز برای تحلیل تغییر چندانی نمی‌کند، در جهت افزایش دقت و اطمینان از نتایج از نتایج از فاصله ۲ میلیمتر برای شبکه‌بندی استفاده شده است. سزار و ولاسکو در سال ۲۰۱۳ مطالعاتی در مورد تأثیر گام زمانی بر نتایج محاسبات عددی انجام داده‌اند. بر اساس این مطالعه به منظور رسیدن به نتایج دقیق بهتر است از گام زمانی زیر ۱۰ دقیقه استفاده شود (Velasco & Cesar, 2013). بر این اساس دو گام زمانی ۳ و ۶ دقیقه مورد بررسی گرفت. بیشترین اختلاف دمای داخلی بدست آمده برای این دو حالت برابر ۰.۵/ درجه سلسیوس می‌باشد. با توجه به اختلاف کم نتایج این دو حالت از گام زمانی ۶ دقیقه در محاسبات استفاده شد.

#### ۵-۲- الگوریتم کنترل سایه‌بان متحرک

به منظور انتخاب مقدار بهینه تابش عبور داده شده از سایه‌بان در هر گام زمانی، الگوریتمی طراحی شده است.

پارامترهای متفاوتی مانند روشنایی روز، تابش خورشیدی، خیرگی، دید بصری و ... را می‌توان به عنوان متغیر کنترل کننده سایه‌بان متحرک، مورد بررسی قرار داد. با توجه به اهداف مطالعه مبنی بر بررسی توانایی سایه‌بان متحرک در کنترل دمای داخلی و کاهش مصرف انرژی، دمای هوای فضای داخل به عنوان پارامتر تأثیرگذار در کنترل سایه‌بان انتخاب شد. در جهت جامع بودن و امکان استفاده از نتایج مطالعه، برای تمامی سایه‌بان‌های متحرک خارجی و با هندسه‌های متفاوت، از متغیر درصد تابش عبوری از سایه‌بان، در محاسبات استفاده شده است. الگوریتم طراحی شده در گام نخست با انجام محاسبات تعادل حرارتی در حالتی که بیشترین میزان تابش خورشیدی از سایه‌بان عبور کرده است، شروع به مقایسه دمای داخلی خروجی از معادلات، با شرایط تعریف شده می‌کند و در صورت مغایر بودن نتایج با شرایط، به میزان پنج درصد از میزان تابش خورشیدی عبور داده شده از سایه‌بان کم کرده و محاسبات را تکرار می‌کند. این مرحله تا رسیدن به شرایطی که اطلاعات خروجی از محاسبات با شرایط تعریف شده همخوانی داشته باشد، تکرار می‌شود. در صورت تکرار محاسبات برای تمامی درصدهای تابش عبوری و مغایر بودن نتایج با شرایط معیار، میزان صفر درصد انتخاب می‌شود که به معنی جلوگیری از ورود تابش خورشیدی می‌باشد. با توجه به هندسه سایه‌بان و سایه اندازی عناصر آن در حالتی که بر روی عبور تابش حداکثری تنظیم شده، بیشترین

عملکرد فرض شده برای منطقه انتخابی، فضای اداری می باشد. با توجه به نیاز این فضا به تهویه، میزان تعویض یک حجم هوا در ساعت برای انجام محاسبات تعریف شده است. تحلیل و ارزیابی عملکرد سایه بان متحرک با مقایسه نتایج آن، با نتایج مربوط به سایه بان ثابت صورت گرفته است. هندسه سایه بان ثابت استفاده شده در تحلیل در شکل ۸ نشان داده شده است. عناصر تشکیل دهنده این سایه بان کرکره‌های خارجی افقی می‌باشند که فاصله بین کرکره‌ها مساوی با عمق (عرض) آن‌ها و برابر ۲۰ سانتیمتر است. همچنین کرکره‌ها به رنگ سفید و با ضریب انعکاس ۰/۷ در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبات تابش عبوری از سایه بان از روش ارائه شده در ایزو ۱۵۰۹۹ سال ۲۰۱۳ استفاده شده است (ISO 15099, 2013: 31).



شکل ۷. هندسه منطقه و شرایط مرزی جداره‌ها با محیط بیرون

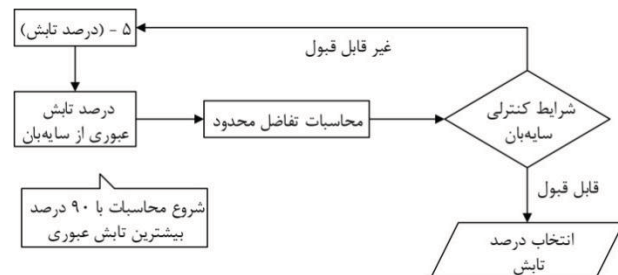


شکل ۸. هندسه سایه بان ثابت استفاده شده برای محاسبات

دیوارهای منطقه بررسی شده با بلوک‌های گچی به ضخامت هشت سانتیمتر، و کف و سقف بتنی به ضخامت ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده‌اند. جداره جنوبی شفاف، شامل دو لایه شیشه به ضخامت سه میلیمتر با فاصله هوایی دو سانتیمتر است. میزان ضرایب مربوط به جذب، انعکاس و عبور تابش خورشیدی از شیشه برای زوایای (۷۰، ۸۰، ۹۰، ...، صفر) در نرم‌افزار ویندو محاسبه شده و وارد مدل‌سازی شده است (WINDOWS 6.3, 2011). از روش درون‌یابی چند جمله‌ای برای محاسبه مقدار این ضرایب برای تمامی زوایای تابشی استفاده شده است.

مقدار تابش در دسترس بعد از سایه بان ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است. روند کارکرد الگوریتم کنترلی در شکل ۶ نشان داده شده است.

موقعیت سایه بان متحرک و درصد تابش عبور داده شده از بین آن بر اساس مقایسه بین دمای هوای داخلی منطقه و دمای آسایش تعریف شده تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه در این مطالعه عملکرد سایه بان متحرک در فصل سرد بررسی شده است، دمای آسایش برابر با ۲۱ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. نحوه عملکرد شرایط کنترلی سایه بان متحرک در جدول ۱ برای دوره بررسی شده نشان داده شده است. با توجه به اینکه محاسبات با بیشترین درصد تابش قابل عبور شروع می‌شود در صورت پایین‌تر بودن دمای هوای داخل از دمای معیار درصد بررسی شده انتخاب می‌شود. در حالتی که دمای هوای داخلی گرم‌تر از دمای آسایش باشد با کم کردن تابش عبوری محاسبات تکرار می‌شود تا دمای داخلی به شرایط تعریف شده برسد.



شکل ۶. الگوریتم کنترل سایه بان متحرک

جدول ۱: شرایط کنترل سایه بان متحرک برای فصول سرد

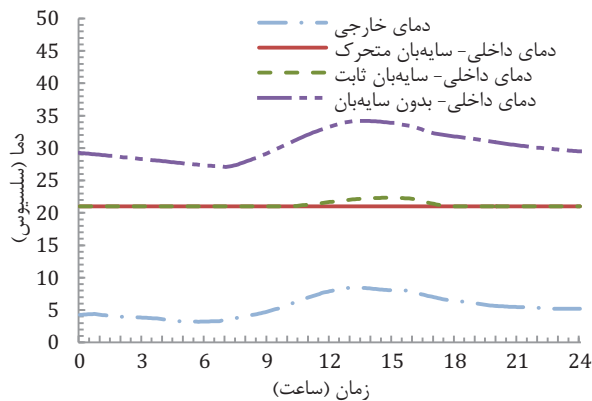
نتیجه شرایط	شرایط کنترلی سایه بان متحرک
قابل قبول	دمای آسایش معیار < دمای هوای داخلی
غیر قابل قبول	دمای آسایش معیار > دمای هوای داخلی
قابل قبول	صفر = درصد تابش عبوری

### ۳- هندسه منطقه و ویژگی‌های مصالح

حجم انتخاب شده برای انجام تحلیل، یک فضای مکعب مستطیل پنج در چهار متر با ارتفاع سه متر می‌باشد، که ضلع بزرگتر در جهت جنوبی و جداره شفاف می‌باشد. تمام جداره‌های این فضا بجز جداره شفاف جنوبی به صورت بی دررو در نظر گرفته شده است و تنها جبهه ارتباط منطقه با محیط بیرون جداره جنوبی آن می‌باشد. هندسه منطقه و شرایط بی‌دررو بودن جداره‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.



ممکن باشد. از ساعت ۹:۳۰ کاهش میزان تابش عبوری نشان دهنده رسیدن دمای داخل به دمای آسایش بدون نیاز به تأسیسات مکانیکی می‌باشد و دمای داخل با انتقال بخشی از تابش در دسترس به فضای داخل به دمای آسایش می‌رسد و سیستم تأسیسات مکانیکی خاموش می‌باشد. همچنین با کنترل مناسب تابش از گرمایش اضافی فضای داخل جلوگیری می‌شود. این حالت تا ساعت ۱۶ ادامه دارد و بعد از این ساعت با توجه به تغییرات زاویه تابش و کاهش شدت تابش، به منظور رسیدن دمای داخل به دمای آسایش، حداکثر تابش در دسترس به فضای داخلی عبور داده می‌شود تا در کنار تأسیسات مکانیکی دمای داخل را به دمای آسایش برساند. از ساعت ۱۷ به بعد با توجه به عدم دریافت تابش خورشیدی دمای داخلی بوسیله گرمایش تأسیسات مکانیکی بر روی ۲۱ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته می‌شود.



شکل ۹. نمودار دمای خارجی و دمای هوای داخلی برای سه حالت سایه‌بان متحرک، ثابت و بدون سایه‌بان برای روز ۲۲ دسامبر

با توجه به اینکه دمای داخلی در حالت سایه‌بان ثابت در ساعاتی بالاتر از دمای آسایش می‌باشد، انرژی ذخیره شده در جداره‌ها ناشی از این افزایش دما باعث دوام بیشتر دمای هوای داخلی در بالای دمای آسایش پس از کاهش شدت تابش خورشیدی می‌شود. در نتیجه میزان بار گرمایی در این حالت نسبت به شرایط سایه‌بان متحرک کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر زمان خاموشی سیستم تأسیسات مکانیکی در حالت سایه‌بان متحرک بین ساعات ۹:۳۰ الی ۱۶ می‌باشد در حالی که در سایه‌بان ثابت این بازه بیشتر و بین ساعات ۱۰ الی ۱۸ است. به منظور بهینه کردن شرایط کنترلی سایه‌بان متحرک در تحلیل دیگری اجازه افزایش دمای داخلی به دو درجه بالای دمای آسایش داده می‌شود. در این حالت دمای هوای داخلی در شرایطی که توسط سیستم

#### ۴- بحث در نتایج

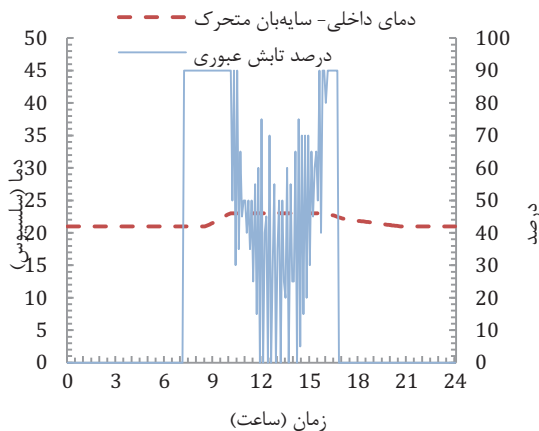
ماه دسامبر به عنوان نمونه فصول سرد برای انجام تحلیل انتخاب شده است. در تحلیل‌ها، بار گرمایی منطقه به صورت ساعتی محاسبه شده است. با توجه به شرایط کنترلی تعریف شده در الگوریتم، در صورت کم بودن دمای هوای داخل منطقه از دمای آسایش تعریف شده، سیستم کنترلی سایه‌بان اجازه ورود تابش خورشیدی را تا رسیدن دمای هوای داخل به دمای آسایش می‌دهد. پس از رسیدن دمای داخل به دمای آسایش، سیستم کنترلی، دمای داخل را بر روی دمای آسایش نگه می‌دارد و از گرمایش اضافی جلوگیری می‌کند. در بازه‌های زمانی که تابش خورشیدی قادر به افزایش دما تا میزان دمای آسایش نیست، سیستم تأسیسات مکانیکی دمای داخلی را به دمای آسایش می‌رساند و بار گرمایی مورد نیاز محاسبه می‌گردد.

#### ۴-۱- بررسی دمای داخلی و بار گرمایی روزانه

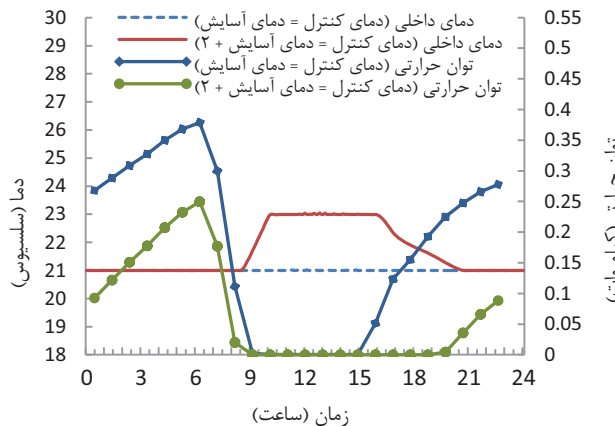
نمودار نشان داده شده در شکل ۹ مربوط به روز ۲۲ دسامبر (اول دی) می‌باشد. در این نمودار دمای هوای خارجی و دمای داخلی برای سه حالت سایه‌بان متحرک، ثابت و بدون سایه‌بان نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، در حالت بدون سایه‌بان با وجود کم بودن دمای محیطی، هوای داخلی در طول شبانه روز به میزان زیادی بالای دمای آسایش می‌باشد. برخلاف شرایط بدون سایه‌بان، حالت سایه‌بان ثابت عملکرد بهتری دارد و دمای هوای داخلی در این حالت نزدیک دمای آسایش می‌باشد. در حالت سایه‌بان ثابت، به دلیل بالا بودن دمای داخلی از دمای آسایش تعریف شده در بین ساعات ۱۰ تا ۱۸ سیستم گرمایش تأسیسات مکانیکی خاموش می‌باشد. در حالت سایه‌بان متحرک دمای داخلی به وسیله تأسیسات مکانیکی و سیستم کنترلی سایه‌بان در طول روز بر روی عدد ۲۱ ثابت نگه داشته شده است. در این حالت سایه‌بان متحرک از گرمایش اضافی فضای داخلی جلوگیری کرده و در مواقعی که تابش خورشیدی توان گرمایش فضای داخلی تا دمای آسایش را ندارد، دمای داخلی توسط تأسیسات مکانیکی گرمایشی بر روی عدد ۲۱ ثابت نگه داشته شده است.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات دمای داخلی به همراه میزان درصد تابش دریافتی در حالت سایه‌بان متحرک را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار از ساعت ۷ صبح که امکان دریافت تابش خورشیدی در جداره جنوبی وجود دارد، سیستم کنترلی اجازه ورود حداکثر میزان تابش خورشیدی به داخل فضا را می‌دهد تا میزان بار گرمایی تأسیسات مکانیکی برای رسیدن به دمای آسایش در کم‌ترین حالت

استفاده نمی‌شود و دمای هوای داخلی با گرمای دریافت شده از تابش خورشیدی بالای دمای آسایش می‌باشد.



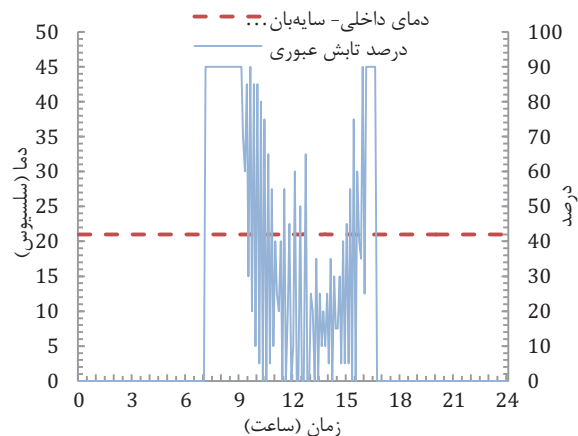
شکل ۱۲. نمودار دمای داخلی برای حالت سایه‌بان متحرک و میزان تابش عبوری از سایه‌بان با شرایط کنترلی بهینه شده برای روز ۲۲ دسامبر



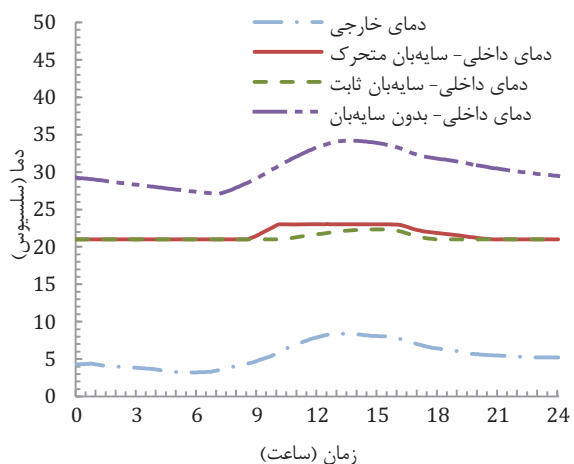
شکل ۱۳. نمودار دمای هوای داخلی و توان حرارتی برای دو شرایط کنترل برابر دمای آسایش و دو درجه بالای دمای آسایش برای روز ۲۲ دسامبر

در نمودار نشان داده شده در شکل ۱۳ دمای داخلی و میزان بار گرمایی در حالت سایه‌بان متحرک برای دو شرایط مختلف کنترلی نشان داده شده است. بر اساس این نمودار با بهینه کردن شرایط کنترلی می‌توان به میزان قابل توجهی بار گرمایی تأسیسات مکانیکی را کاهش داد. با توجه به نمودار، در حالت کنترل دمای داخلی بر روی دمای آسایش، از ساعت ۱۶ نیاز به گرمایش مطرح می‌شود، در حالی که در شرایط کنترلی بهینه شده، گرمایش از ساعت ۲۱ شروع می‌شود. در نتیجه با اجازه افزایش دمای داخل به دو درجه بالای دمای آسایش توسط انرژی خورشیدی، می‌توان پنج ساعت نیاز به گرمایش را منتفی کرد. همچنین به دلیل ذخیره‌سازی بیشتر انرژی در جدارها، میزان بار گرمایی در طول شبانه‌روز نیز کمتر می‌شود. میزان بار گرمایی در روز ۲۲ دسامبر برای دو حالت کنترلی بر روی دمای معیار و دو درجه بالای دمای معیار به

تأسیسات مکانیکی گرم می‌شود بر روی دمای آسایش تنظیم می‌شود و در ساعاتی که تابش خورشیدی در دسترس می‌باشد امکان افزایش دمای داخلی تا دو درجه بالای دمای آسایش توسط انرژی خورشیدی داده می‌شود. در این شرایط امکان ذخیره بیشتر انرژی خورشیدی در جداره‌های منطقه فراهم می‌شود در حالی که دمای داخلی نوسان کمی به میزان دو درجه خواهد داشت که محسوس نمی‌باشد. نمودار مربوط به دمای داخلی با شرایط بهینه شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۴. نمودار دمای داخلی برای حالت سایه‌بان متحرک و میزان تابش عبوری از سایه‌بان برای روز ۲۲ دسامبر

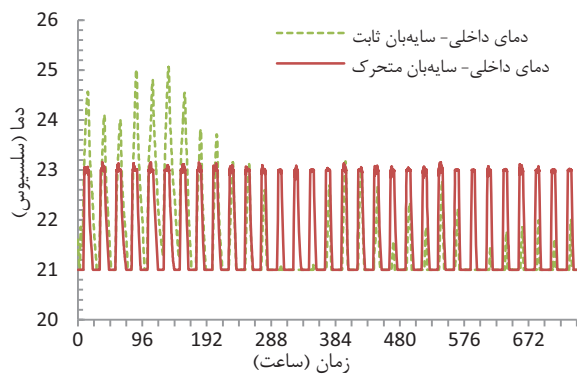


شکل ۱۵. نمودار دمای خارجی و دمای هوای داخلی برای سه حالت سایه‌بان متحرک، ثابت و بدون سایه‌بان با شرایط کنترلی بهینه شده برای روز ۲۲ دسامبر

شکل ۱۲ نمودار تغییرات دمای داخلی به همراه میزان درصد تابش دریافتی در حالت سایه‌بان متحرک با شرایط کنترلی بهینه شده را نشان می‌دهد. در این حالت از ساعت ۸:۳۰ تا ساعت ۲۱ از تأسیسات مکانیکی برای گرمایش

نشان داده شده در شکل ۱۵ دلیل این اتفاق گرمایش اضافی فضای داخلی در حالت سایه‌بان ثابت می‌باشد.

بار گرمایی در حالت سایه‌بان متحرک با شرایط کنترلی بهینه شده به میزان ۳۳ درصد از حالت سایه‌بان ثابت در ماه دسامبر کمتر می‌باشد. این در حالی است که هوای داخلی در روزهای ابتدایی ماه برای حالت سایه‌بان ثابت در ساعاتی از روز از دمای آسایش بالاتر بوده و شاهد نوسان دمای بیشتری در طول روز می‌باشیم. همچنین بار گرمایی سایه‌بان متحرک با شرایط کنترلی بهینه شده به میزان ۵۵ درصد از حالت کنترل بر روی دمای آسایش کمتر می‌باشد. در نتیجه سایه‌بان متحرک در ماه‌های سرد سال علاوه بر کاهش بار گرمایی، باعث ایجاد شرایط دمایی مناسب و بدون نوسانی در طول روز می‌شود. نمودار شکل ۱۶ میزان بار گرمایی حالت سایه‌بان ثابت و دو شرایط کنترل سایه‌بان متحرک را برای ماه دسامبر نشان می‌دهد.

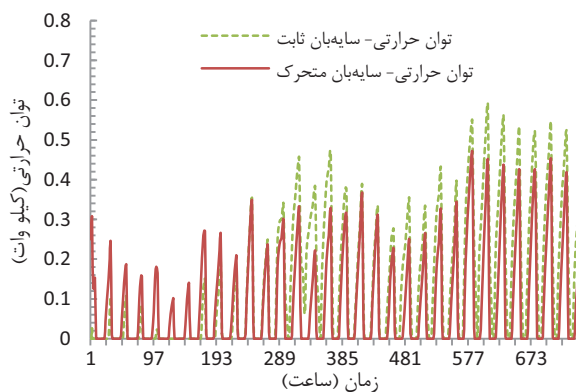


شکل ۱۵. نمودار دمای داخلی برای حالات سایه‌بان متحرک و ثابت برای ماه دسامبر

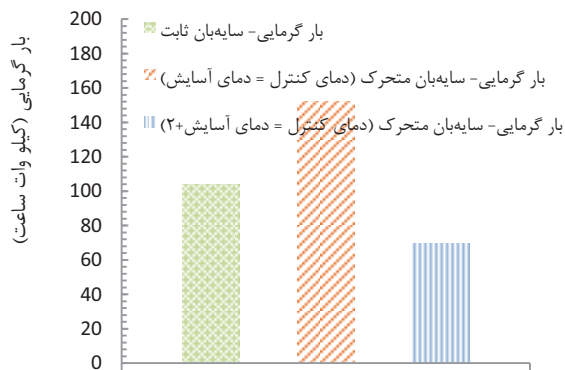
ترتیب برابر ۴/۲ و ۱/۶ کیلووات ساعت می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش مصرف انرژی به میزان ۶۱ درصد در این روز است.

#### ۴-۲- بررسی دمای داخلی و بار گرمایی ماهانه

به منظور مقایسه میزان بار گرمایی سه حالت سایه‌بان متحرک، ثابت و بدون سایه‌بان از نتایج مربوط به شرایط کنترلی بهینه شده، به دلیل کنترل بهتر و صرفه‌جویی بیشتر انرژی استفاده شده است. میزان بار گرمایی حالت بدون سایه‌بان برای ماه دسامبر صفر است. دلیل این اتفاق بالا بودن دمای داخل به مقدار زیاد از دمای آسایش می‌باشد. در نمودار نشان داده شده در شکل ۱۴ میزان بار گرمایی ساعتی حالت سایه‌بان متحرک و ثابت برای ماه دسامبر نشان داده شده است. بر اساس این نمودار در اکثر روزهای ماه میزان بار گرمایی حالت سایه‌بان متحرک کمتر از حالت سایه‌بان ثابت است بجز چند روز اول ماه که با توجه به نمودار دمای داخل



شکل ۱۴. نمودار میزان توان حرارتی ساعتی برای حالات سایه‌بان متحرک و ثابت برای ماه دسامبر



شکل ۱۶ نمودار بار گرمایی سه حالت سایه‌بان ثابت و متحرک با دو شرایط کنترل برای ماه دسامبر

ورودی به فضای داخلی پرداخته شد. با هدف ایجاد امکان محاسبات حرارتی و دستیابی به بیشترین بازدهی، الگوریتمی تهیه شد. الگوریتم تهیه شده هم زمان با محاسبات حرارتی، شرایط بهینه سایه‌بان متحرک را در هر گام زمانی تعیین

#### ۵- بحث و بررسی

در پژوهش حاضر به ارائه روشی برای کنترل سایه‌بان متحرک و بررسی عملکرد آن در کنترل تابش خورشیدی

طول روز نزدیک تر به دمای آسایش بوده و شرایط آسایش مطلوب تری، نسبت به سایه بان ثابت فراهم می کند.

#### ۶- فهرست علائم

مساحت ( $m^2$ )	$A$
ظرفیت حرارتی ویژه ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )	$c_p$
قطر هیدرولیک ( $m$ )	$D_h$
ضریب انتقال حرارت سطحی ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )	$h_c$
ارتفاع سطح عمودی ( $m$ )	$H$
ضریب انتقال حرارت هدایتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )	$K$
میزان تعویض هوا ( $kgs^{-1}$ )	$\dot{m}$
تولید حرارت ( $W$ )	$q$
زمان (seconds)	$t$
دما ( $^{\circ}C$ )	$T$
	علائم یونانی
چگالی ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$
اختلاف دما ( $^{\circ}C$ )	$\Delta T$
	بالانویس ها
متغیر زمان در شروع بازه زمانی	$t$
متغیر زمان در پایان بازه زمانی	$t + \Delta t$
	زیرنویس ها
انتقال حرارت هدایتی	$c$
تابش	$r$
ویژگی های هوای اتاق	<i>room</i>
تأسیسات مکانیکی	<i>plant</i>
تابش خورشیدی	<i>solar</i>
انرژی تابشی از منابع داخل منطقه	<i>cas - rad</i>
انرژی همرفتی از منابع داخل منطقه	<i>cas - con</i>
گره مورد بررسی	$I$
گره های همسایه	$I - 1, I + 1$

می کند. نحوه کنترل سایه بان متحرک بر اساس مقایسه بین دمای داخلی و دمای معیار تعیین شده می باشد. به منظور تحلیل عملکرد سایه بان متحرک، نتایج آن با نتایج سایه بان ثابت و شرایط بدون سایه بان مقایسه شد.

محاسبات برای حالت های مختلف سایه بان برای ماه دسامبر (آذر - دی)، انجام شد. در تحلیل های انجام شده، دمای آسایش، ۲۱ درجه سلسیوس تعیین شد. همچنین دمای کنترل سایه بان متحرک در تحلیل اول ۲۱ درجه سلسیوس انتخاب شد. با توجه به نتایج به دست آمده، در تحلیل دوم، با هدف دریافت تابش خورشیدی بیشتر و بهینه کردن شرایط کنترل سایه بان، دمای کنترل ۲۳ درجه تعریف شد. با توجه به بررسی های انجام گرفته موارد زیر قابل استنباط می باشند:

الگوریتم کنترلی سایه بان متحرک با کنترل مناسب تابش خورشیدی در روزهای سرد، دمای داخل را به دمای آسایش رسانده و از گرمایش اضافی فضای داخلی جلوگیری می کند. سایه بان متحرک عملکرد بهتری نسبت به سایه بان ثابت و شرایط بدون سایه بان دارد که طبق پیش بینی های قبلی بود. با تغییر دمای کنترل سایه بان متحرک، از ۲۱ درجه سلسیوس به ۲۳ درجه، تابش بیشتری وارد فضای داخلی شده و باعث کاهش ۵۴ درصدی بار گرمایی می شود. در ماه دسامبر، بار گرمایی، در حالت سایه بان متحرک، با دمای کنترل ۲۳ درجه سلسیوس به میزان ۳۳ درصد از حالت سایه بان ثابت کمتر است. همچنین بار گرمایی در حالت سایه بان متحرک، با دمای کنترل ۲۱ درجه سلسیوس، به میزان ۴۷ درصد بیشتر از حالت سایه بان ثابت می باشد. در نتیجه نحوه کنترل سایه بان متحرک تأثیر زیادی در بازدهی آن دارد.

بیشترین اختلاف دمای داخلی و دمای آسایش در حالت های سایه بان متحرک و ثابت به ترتیب ۲ و ۴ درجه سلسیوس می باشد در نتیجه دمای داخلی حالت متحرک در

#### فهرست منابع

- Alamdari F., Hammond GP, (1983). Improved Data Correlations for Buoyancy-Driven Convection in Rooms, Building Services Engineering Research & Technology, Vol. 4, pp. 106-112.
- Athienitis AK, Sullivan HF, (1985). Efficient Method for Determination of Solar Radiation Absorbed by Each Room Interior Surface and Effects, International Solar Energy Society, Pergamon Press, pp. 430-434.
- Bastien D., Athienitis A., (2012). A Control Algorithm for Optimal Energy Performance of a Solarium/Greenhouse with Combined Interior and Exterior Motorized Shading, Energy Procedia, Vol. 30, pp. 995-1005.
- Carbonari A., Rossi G., Romagnoni P. (2002). Optimal Orientation and Automatic Control of External Shading Devices in Office Buildings, Environmental Management and Health, Vol. 13, pp. 392-404.
- Cho S., Shin K., Zaheer-Uddin M., (1995). The Effect of Slat Angle of Windows with Venetian Blinds on Heating and Cooling Loads of Buildings in South Korea, Energy, Vol. 20, pp. 1225-1236.

- Crank J., Nicolson P., (1947). A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of the Heat-Conduction Type, Vol. 43, pp. 50-67.
- Duffie AJ, Beckman WA, (2003). Solar Engineering of Thermal Processes 2, New York, Wiley Interscience.
- Hammad F., Abu-Hijleh B., (2010). The Energy Savings Potential of Using Dynamic External Louvers, Energy and Building, Vol. 48, pp. 1888-1895.
- ISO 15099 (2003). Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations, International Organization for Standardization.
- Kim J., Park Y., Yeo M. and Kim K., (2009). An Experimental Study on the Environmental Performance of the Automated Blind in Summer, Building and Environment, Vol. 44, pp. 1517-1527.
- LBNL, (2010). EnergyPlus Engineering Reference.
- LBNL, (2011). WINDOWS 6.3.
- Lee ES, Selkowitz S., Hughes G., Thurm D., (2004). Market Transformation Opportunities for Emerging Dynamic Façade and Dimmable Lighting Control Systems, Lawrence Berkeley National Laboratory Washington D.C.
- Lee ES, DiBartolomeo DL, Selkowitz SE, (1998). Thermal and Daylighting Performance of an Automated Venetian Blind and Lighting System in a Full-Scale Private Office, Energy and Buildings, Vol. 29, pp. 47-63.
- Morrison IB, (2000). The Adaptive Coupling of Heat and Air Flow Modeling within Dynamic Whole-Building Simulation, Ph.D Thesis, Energy Systems Research Unit Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde, Glasgow UK.
- Ochoa C., Capeluto I., (2002). Strategic Decision-Making for Intelligent Buildings: Comparative Impact of Passive Design Strategies and Active Features in a Hot Climate, Building and Environment, Vol. 43, pp. 1829-1839.
- Swaroop CH, (2013). A Byte of Python, Ebsshelf Inc.
- Velasco T., Cesar P., (2013). Time Step Considerations When Simulating Dynamic Behavior of High-Performance Homes, Buildings XII Conference, FL.
- Wiggling M., Harris J., (2002). Intelligent Skins, Architectural Press, Oxford.