

# آموزش تجزیه و تحلیل شدت تابش جذب شده به وسیله سقف های

## گنبدی و مورب و مقایسه آن با سقف تخت

سعید مهران<sup>۱</sup>، منوچهر راد<sup>۲</sup> و فرزاد جعفر کاظمی<sup>۳</sup>

### چکیده

سقف های گنبدی، مورب و تخت کاربرد وسیعی در صنعت ساختمان سازی دارند. در این کار پژوهشی و آموزشی عملکرد حرارتی سقف ها نسبت به حالت مبنا یعنی سقف تخت از نظر شدت تابش جذب و مصرف انرژی برای شرایط متفاوت بررسی شد. نتیجه ها نشان می دهد که زاویه سقف و نحوه قرار گیری آن بر میزان شدت تابش جذب شده از سقف مؤثر است. هنگامی که سقف گنبدی با زاویه نصف گنبد  $\theta \leq 55^\circ$  درجه ساخته شود شدت تابش جذب شده به تقریب برابر سقف تخت متناظرش می شود. سقف مورب با جهت شمال جنوب حرارت خورشیدی بیشتری را نسبت به سقف مورب با جهت شرق - غرب جذب می کند. بنابراین از نظر جذب تابش خورشید در فصل تابستان توصیه می شود که از سقف مورب با جهت شرق - غرب استفاده شود. همچنین اگر سقف مورب با زاویه شیب  $60 \leq \theta \leq 45$  درجه ساخته شود مصرف انرژی به مقدار  $1/3 - 1/4$  برابر سقف تخت کاهش می یابد. در مناطق گرم و مرطوب، دمای هوا و شدت تابش پخش بیشتر بوده و سقف مورب برای چنین مناطقی مناسب است در صورتی که در مناطق گرم و خشک شدت تابش پخش کمتر بوده و سقف گنبدی برای این مناطق مناسب است.

**کلمات کلیدی:** انتقال حرارت، سقف های گنبدی و مورب، تابش مستقیم، حل تحلیلی

### ۱- مقدمه

معین از اهمیت بسزایی برخوردار است. سقف یکی از بخش های اصلی ساختمان است. با توجه به اینکه ساختار هندسی سقف بخش وسیعی از سطح ساختمان را پوشش می دهد لذا تأثیر عمده ای در مصرف انرژی و آسایش حرارتی در ساختمان دارد. هندسه سقف ها از نظر شکل اعم از قوسی، گنبدی، تخت و مورب معیاری عمده برای مشخص نمودن عملکرد حرارتی ساختمان است. پژوهشگرانی چون فیسی، مین استون، بوئن و کویتا پژوهش هایی درباره انعکاس تابشی سقف های قوسی و گنبدی انجام دادند. رانشنگ و همکارانش [۱] بیان کردند در مناطقی با آب و هوای گرم و خشک، سقف های گنبدی، دمای هوای اتاق را در فصل تابستان کاهش می دهند و انعکاس تابشی سقف های گنبدی بیشتر از سقف تخت متناظرش است. از این رو سقف های گنبدی به طور عمده در مناطق گرم و خشک مورد استفاده قرار می گیرند که مقدار تابش یکسانی در مقایسه با سقف تخت جذب می کنند اما حرارت بیشتری به وسیله انتقال حرارت جابه جایی از دست می دهند. بهادری و حقیقت [۲] بیان

سقف های گنبدی و مورب به صورت کلی در ساختمان های خاورمیانه و بسیاری از مناطق جهان مشاهده می شوند. این بناها بیشتر با سنگ یا آجر و آستر گچ و آهک و با توجه به شرایط اقلیمی و جوی منطقه، آیین، مذهب و فرهنگ رایج در جامعه طراحی و ساخته می شوند. نظر به این که بخش اعظمی از مصرف سالیانه انرژی (به تقریب ۳۸ درصد سوخت مصرفی در کشور) مربوط به بخش ساختمان است لذا شناسایی راهکارهای لازم در جهت کاهش مصرف انرژی در ساختمان چه از نظر بهبود کارایی سیستم های گرمایش و سرمایش و چه از نظر طراحی ساختمان با استانداردهای

مقاله دریافت ۸۶/۱۱/۱۷ در یافت و در تاریخ ۸۷/۳/۲۷ به تصویب نهایی رسید.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، مکانیک - تبدیل انرژی دانشکده تحصیلات تکمیلی واحد تهران جنوب  
پست الکترونیکی: Saied\_m1360@yahoo.com

<sup>۲</sup> استاد، عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شریف و دانشکده تحصیلات تکمیلی واحد تهران جنوب

<sup>۳</sup> استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده تحصیلات تکمیلی واحد تهران جنوب

## ۲- روش پژوهش

در این پژوهش از یک مدل کلی و متقارن برای سقف های گنبدی و مورب استفاده شده است. با توجه به این که جذب تابش خورشیدی با زاویه سقف و نحوه قرار گیری آن رابطه‌ی مستقیم دارد، لذا بهترین حالتی که می تواند منجر به کاهش شدت تابش جذب شده، و در نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی شود ارائه شده است.

در این پژوهش معادله‌های ریاضی حاکم بر شدت تابش جذب شده در دو سقف گنبدی و مورب اعمال شده و بوسیله محاسبات کامپیوتری و به صورت عددی، حل شده است. لازم به ذکر است که معادله‌های ارائه شده معادله‌های نظری و تحلیلی بوده و از رابطه‌های تجربی به علت بالا بودن درصد خطا استفاده نشده و نتیجه به صورت نمودار برای حالت‌های متفاوت بیان شده است.

## ۲-۱ وابستگی زاویه ای ضریب جذب خورشید به زاویه

### برخورد اشعه خورشید

ضریب جذب سطحی به زاویه برخورد پرتو خورشید و ویژگی‌های سطح بستگی دارد و با افزایش زاویه برخورد پرتو خورشید کاهش می یابد که در شکل ۱ ارائه شده است. تنها رابطه‌ی موجود در مورد وابستگی زاویه ای ضریب جذب خورشید رابطه ای است که توسط **دافی** و **بکمن** ارائه شده است [۸].

$$0 \leq \theta \leq 80 \quad (\text{الف-۱})$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} = 1 + 2.0345 \times 10^{-3} \theta - 1.99 \times 10^{-4} \theta^2$$

$$+ 5.324 \times 10^{-6} \theta^3 - 4.799 \times 10^{-8} \theta^4 \quad (\text{ب-۱})$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} = 0.064938(90 - \theta) \quad 80 < \theta < 90$$

$\theta$  زاویه برخورد پرتو خورشید می باشد که بین ۰ تا ۹۰ درجه تغییر می کند و  $\alpha_n$  ضریب جذب تابش هنگامی که پرتو خورشید به طور قائم به سطح اصابت کند. فرض بر این است که انتشار تابش خورشید به طور یکسان روی کل سطح نیم کره توزیع شود. بنابراین، معادل متوسط ضریب

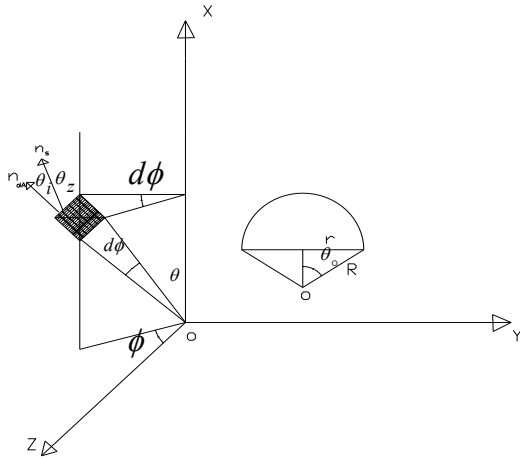
کردند که لایه بندی حرارتی هوای زیر سقف گنبدی یا قوسی به گونه‌ای است که هوای گرم شده در زیر سقف قرار می گیرد. بنابراین، شرایط مطلوبی برای زندگی در ساختمان فراهم می شود. رفتار حرارتی سقف های تخت و قوسی بر حسب دمای داخل ساختمان توسط **پیلموتر** [۳] بررسی شد و اما وابستگی زاویه ای ضریب جذب توسط او مورد توجه قرار نگرفت. در سال های اخیر کارهایی توسط **تانگ رانشنگ** و همکارانش براساس موقعیت و وابستگی زاویه ای ضریب جذب خورشید انجام شده است. **الجیای و فیسی** بیان کردند [۴] که سقف گنبدی اثر شار تابشی در اطراف ساختمان را کم می کند و دمای سقف کاهش می یابد. **نهار** و همکارانش [۵] در مناطق گرم و خشک شار حرارتی ورودی به ساختمان به وسیله ی سقف را ۵۰ درصد برآورد کردند. آنها با روش های گوناگون مثل عایق کاری حرارتی و نقاشی کردن سقف با رنگ های روشن، شار حرارتی ورودی به ساختمان را محاسبه کردند. بررسی عملکرد سقف از نظر میزان مصرف انرژی سرمایه در فلوریدا توسط **پارکر و برکازی** [۶] انجام شده است. مطابق نظریه آنها، ساختمان هایی به رنگ صیقلی بار حرارتی ساختمان را کاهش می دهند. متوسط صافی و عدم صاف بودن آسمان که نقش عمده در جذب تابش خورشیدی به وسیله سقف را مشخص می کند، توسط **ویلاسنر و مینزیکو** [۷] بیان شد. طبق نظریه ی آنها انعکاس تابشی مستقیم در برخورد به سطح ابر حدود ۷۵ درصد است. بنابراین در آسمان ابری در مقایسه آسمان بدون ابر تنها ۲۰ تا ۲۵ درصد از تابش قادر به نفوذ تا سطح زمین است.

در پژوهش حاضر هدف ارزیابی میزان افزایش گرمای خورشیدی در سقف های گنبدی براساس ژئومتری خورشیدی و وابستگی زاویه ای ضریب جذب برای سقف های گنبدی و بدون وابستگی زاویه ای ضریب جذب برای سقف های مورب بوده و در این رابطه مقایساتی میان تابش های جذب شده به وسیله سقف گنبدی و مورب با سقف تخت به عمل آمده است. تأثیر پارامتر هندسی مانند زاویه نصف گنبد بر افزایش گرمای خورشید نیز ارزیابی شد و برخی از توصیه ها در این رابطه در این بناها به منظور بهبود عملکرد آنها در مناطق آب و هوایی گرم و خشک و گرم و مرطوب در فصل تابستان در تهران ارائه شد.

که

$$f(\theta_i) = \alpha / \alpha_n \quad (5)$$

ضریب جذب تعدیل کننده به وسیله معادله های الف- ۱ و ب- ۱ محاسبه می شود (در محاسبه های عددی وقتی  $\cos \theta_i < 0$ ،  $f(\theta_i)$  صفر می شود یعنی تابش در این حالت به المان سطح  $dA$  برخورد نمی کند).



شکل ۲ بردار پرتو خورشید و بردار عمود بر سطح در هر نقطه از سقف گنبدی

زاویه برخورد پرتو خورشید روی المان سطح  $dA$  با ضرب نقطه ای بین بردار واحد المان سطح  $n_{dA}$  و پرتو خورشید  $n_s$  محاسبه می گردد.

$$n_s = (\cos \theta_z, 0, \sin \theta_z) \quad (6)$$

$$n_{dA} = (\cos(\theta), -\sin(\theta) \sin(\phi), \sin(\theta) \cos(\phi)) \quad (7)$$

$$\cos(\theta_i) = \cos(\theta) \cos(\theta_z) + \sin(\theta) \sin(\theta_z) \cos(\phi) \quad (8)$$

با جای گذاری معادله ی ۸ در معادله ی ۴ و انتگرال گیری روی سطح سقف در معرض تابش خورشید، شدت تابش جذب شده  $I_{b,dome}$  به وسیله سقف گنبدی در هر زمان مشخص می شود.

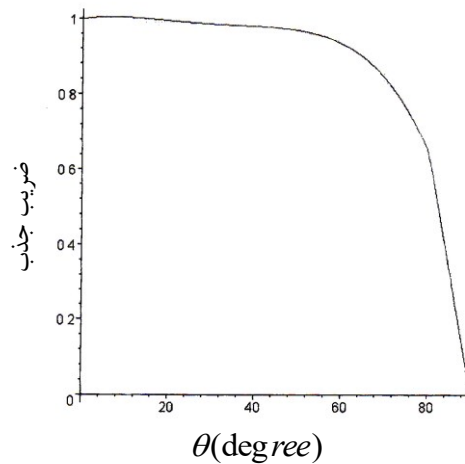
$$I_{b,dome} = I_b R^2 \alpha_n \int_{Ae} \int \frac{\sin(\theta) f(\theta_i) (\cos \theta \cos \theta + \sin \theta \sin \theta_z \cos \phi)}{r^2} d\theta d\phi \quad (9)$$

جذب  $\langle a \rangle$  با محاسبه متوسط وزنی ضریب جذب روی کل نیم کره محاسبه می شود:

$$\langle a \rangle = \int_0^{90} 2 \times \sin \theta \times \cos \theta \times \alpha(\theta) d\theta \quad (2)$$

با جای گذاری رابطه های الف- ۱ و ب- ۱ در معادله ی ۲ و محاسبه عددی انتگرال فوق مقدار متوسط ضریب جذب خورشید محاسبه می شود:

$$\langle a \rangle = 0.93335 \times \alpha_n \quad (3)$$



شکل ۱ وابستگی ضریب جذب به زاویه برخورد

### ۳- تابش دریافتی سقف گنبدی از خورشید

#### ۳-۱ شدت تابش جذب شده سقف گنبدی

قبل از شروع محاسبه ها باید دستگاه مختصات مناسبی در نظر گرفته شود بنابراین، دستگاه مختصات اصلی در مرکز کره با شعاع  $R$  و  $\theta_0$  نصف زاویه گنبد، پیشنهاد می شود. شدت تابش  $I_b$  در المان سطح سقف گنبدی در زاویه سمت الراس  $\theta_z$  در شکل ۲ ارایه شده، فرض بر این است که پرتو خورشید با صفحه ی XOZ هم صفحه است (به علت تقارن کروی سقف گنبدی). در هر زمان معین، شدت تابش جذب شده با مساحت  $dA$  سقف گنبدی با معادله ی ۴ بیان می شود [۱]:

$$dI_{b,dome} = I_b dA \times \cos(\theta_i) \times \alpha(\theta_i) = I_b R^2 \alpha_n \sin \theta \cos \theta \cos \phi f(\theta_i) d\theta d\phi \quad (4)$$

با زاویه سمت الرأس  $\theta_z$  و زاویه نصف گنبد  $\theta_0$  وابسته است که مطابق فرمول زیر محاسبه می شود [۱].

(۱۵)

$$\frac{A_e}{A} = 1 - \frac{\theta_z \sin \theta_x}{\pi(1 - \cos \theta_0)} + \frac{\int_0^{\theta_x} \cos \theta \arcsin(\cos \theta_0 / \cos \theta) d\theta}{\pi(1 - \cos \theta_0)}$$

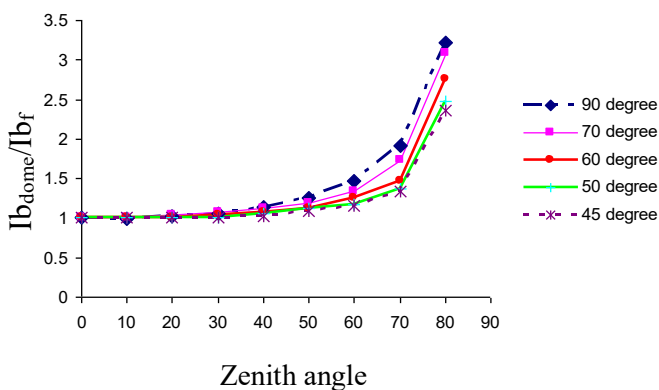
که

$$\theta_x = \arccos(\cos \theta_0 / \sin \theta_z) \quad (16)$$

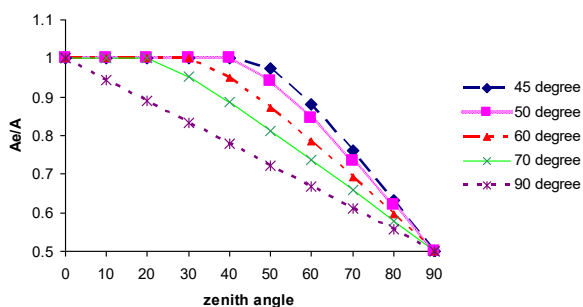
اگر  $\theta_z = 90$  و  $\theta_0 = 90$  باشد نسبت مساحت به صورت زیر می شود:

$$\frac{A_e}{A} = 1 - \frac{\theta_z}{\pi} \quad (17)$$

یعنی نسبت مساحت ها به زاویه سمت الرأس وابسته است که جهت خورشید، مدت تابش را در آسمان مشخص می کند.



شکل ۳ نسبت شدت تابش سقف گنبدی به تخت



شکل ۴ نسبت مساحت در معرض خورشید به مساحت کل سطح سقف گنبدی

که  $A_e$  مساحت سطح سقف گنبدی در معرض تابش خورشید، مجموع کل المان سطوح  $dA$  با  $\cos \theta_i > 0$  رابطه دارد. به طور کلی حل تحلیلی برای معادله‌ی ۹ وجود ندارد. پس معادله‌ی فوق با استفاده از محاسبه‌های کامپیوتری (Maple) به دست آورده شد. در حالت ویژه اگر ضریب زاویه برخورد  $\alpha(\theta_i)$  ثابت مستقلی از زاویه برخورد  $\theta_i$  باشد، و تمام سطح گنبد در معرض تابش خورشید باشد، معادله‌ی ۹ بدین گونه بیان می شود:

$$I_{b,dome} = I_b \pi R^2 \alpha \sin^2 \theta_0 \cos \theta_z \quad (10)$$

در این حالت شدت تابش جذب شده از سقف گنبدی فقط معادل با سقف تخت مشابه است و مساحت پایه سقف گنبدی  $A_b$  مطابق معادله‌ی ۱۱ محاسبه می شود.

$$A_b = \pi R^2 \sin^2 \theta_0 \quad (11)$$

بنابراین

$$I_{b,dome} = I_{b,flat} = A_b I_b \alpha \cos \theta_z \quad (12)$$

با انتگرال گیری روی یک روز، شدت تابش جذب شده روزانه برای سقف گنبدی و تخت محاسبه می شود:

$$Q_{b,dome} = \int_{-t_s}^{t_s} I_{b,dome} dt \quad (13)$$

$$Q_{b,flat} = \int_{-t_s}^{t_s} A_b I_b \alpha(\theta_z) \cos \theta_z dt \quad (14)$$

که  $t_s$  زمان غروب خورشید در روز معینی از سال است. شدت تابش جذب شده سقف گنبدی در مقایسه با سقف تخت متناظر در شکل ۳ ارایه شده و نسبت مساحت تخت معرض خورشید به مساحت کل سطح سقف گنبدی در زاویه‌های متفاوت سمت الرأس در شکل ۴ نشان داده شده است. از این نظر هنگامی که زاویه سمت الرأس کوچکتر از  $(\theta_z < 35)$  درجه- ساعت های نزدیک به ظهر باشد، شدت تابش جذب شده به وسیله‌ی سقف گنبدی کمتر از سقف تخت متناظر است. از شکل های ۳ و ۴ مشخص می شود اگر مساحت سطح گنبد تحت معرض خورشید بیشتر باشد، نسبت شدت تابش سقف گنبدی در مقایسه با سقف تخت به عدد یک نزدیک می شود. نسبت مساحت تحت معرض خورشید به مساحت کل سطح سقف گنبدی

و با انتگرال گیری روی یک روز شدت تابش پخشی جذب شده روزانه برای سقف گنبدی محاسبه می شود.

$$Q_{d,dome} = \langle a \rangle \int_{-t_s}^{t_s} \left[ 0.5I_d(1 + \cos\theta) + 0.5I_h\rho_g(1 - \cos\theta) \right] dt \quad (26)$$

در تحلیل بالا اگر ضریب جذب پخشی ثابت بماند سقف گنبدی مقدار یکسانی شدت تابش جذب می کند، اما تابش پخش بیشتری در مقایسه با سقف تخت متناظر جذب کرده بنابراین، انرژی بیشتری نسبت به سقف تخت، جذب می کند.

### ۳-۳ متوسط شدت تابش روزانه و ماهانه

متوسط صافی یا عدم صاف بودن آسمان نقش عمده در جذب تابش خورشیدی به وسیله سقف را مشخص می کند و برای ماهی از سال در مکان معین معلوم است، می توان در معرض خورشید بودن روزانه و ماهانه را محاسبه کرد. معادله های زیادی در این باره پیشنهاد شده است، یکی از آن معادله ها ضریب تمیزی بود که توسط رابل پیشنهاد شد که عبارت است [۱۰]:

$$K_T = \frac{H_h}{H_0} \quad (27)$$

که  $H_h$  متوسط روزانه در معرض خورشید بودن سطح افق در ماه است و  $H_0$  متوسط ماهانه تابش روزانه خورشید بیرون از جو روی سطح افق و به صورت زیر بیان می شود:

$$H_0 = \frac{1}{\pi} (\tau_{day} I_{o,eff} \cos\lambda \cos\delta \sin\omega_s - \omega_s \cos\omega_s) \quad (28)$$

که

$$\tau_{day} = 24h \quad (29)$$

$$I_{o,eff} = [1 + 0.033 \cos(360n/365.25)] I_0 \quad (30)$$

به وسیله ی ثابت خورشید  $1377 \frac{W}{m^2}$  و روز مشخص می شود،  $\omega_s$  زاویه ساعت طلوع و غروب خورشید است و بدین صورت محاسبه می شود:

$$\cos\omega_s = -\tan\lambda \tan\delta \quad (31)$$

### ۲-۳ جذب تابش پخشی سقف گنبدی

تابش جذب شده به وسیله سقف گنبدی نسبت به سقف تخت مقایسه شده است، پس تابش پخش شده باید در نظر گرفته شود اما سقف تخت تابش انعکاسی از زمین را دریافت نمی کند، و با توجه به اینکه تابش انعکاسی سهم بسزایی در تابش پخششی دارد بنابراین، مقایسه ای بین دو نوع سقف وجود ندارد. ضریب جذب تابش پخش شده  $\langle a \rangle$  مستقل از زاویه شیب سطح فرض شده است و مقدارش  $0.93335 \times a_n$  در نظر گرفته شده است و شدت تابش پخش شده روی المان سطح  $dA$  به دست می آید:

$$dI_{d,dome} = \frac{1}{2} (\langle a \rangle I_d dA (1 + \cos\beta)) \quad (18)$$

$$= 0.5 \langle a \rangle I_d R^2 \sin\theta (1 + \cos\beta) d\theta d\phi \quad (19)$$

$$\cos\beta = \cos\theta \quad (20)$$

$$I_{d,dome} = \frac{1}{2} \langle a \rangle I_d R^2 \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_0} \sin\theta (1 + \cos\theta) d\theta \\ = \langle a \rangle \pi I_d R^2 (1 - \cos\theta_0 + 0.5 \sin^2\theta_0) \quad (21)$$

همچنین لیو و جردن روشی برای محاسبه شدت تابش پخشی ارائه کردند [۹].

$$I_d = (0.271I_0 - 0.2939I_b) \cos\theta_z \quad (22)$$

با جای گذاری شدت تابش در معادله ی فوق، تانگ رانشنگ [۱] شدت تابش پخشی را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$I_b = (I_h - I_d) / \cos\theta_z \quad (23)$$

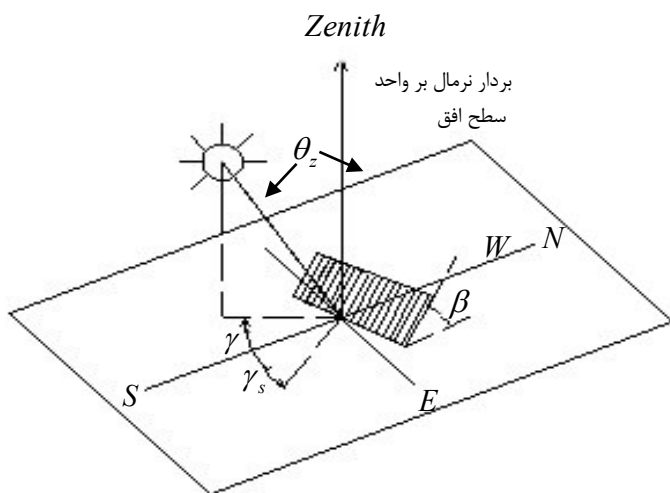
$$I_d = 0.3838I_0 \cos\theta_z - 0.4162I_h \quad (24)$$

نسبت شدت تابش پخشی جذب شده به وسیله سقف گنبدی در مقایسه با سقف تخت متناظر، مطابق معادله ۲۵ است.

$$K_d = \frac{I_{d,dome}}{I_{d,flat}} = \frac{(1 - \cos\theta_0 + 0.5 \sin^2\theta_0)}{\sin^2\theta_0} \quad (25)$$

با توجه به معادله ی فوق نسبت شدت تابشی پخشی بین سقف های تخت و گنبدی به زاویه نصف گنبد وابسته است

افق،  $\omega$  زاویه ساعت و  $\gamma$  زاویه جهتی صفحه یا زاویه سمت (Azimuth Angle) نام دارد که برای صفحه شمال-جنوب  $\gamma = 0^\circ$  و برای شرق-غرب  $\gamma = 90^\circ$  خواهد بود.



شکل ۵ زاویه های ناشی از برخورد پرتوهای خورشید با صفحه مورب

#### ۴-۲ شدت تابش روی سطح زمین

انرژی تابشی خورشید به دو صورت تابش مستقیم و تابش پراکنده به سطح زمین می رسد. تابش مستقیم بیانگر تابشی است که به طور مستقیم از خورشید به زمین می رسد و شامل بخشی از تابش خورشید است که پراکنده یا منعکس نشده است. تابش پراکنده خورشید که به آن تابش آسمان نیز گفته می شود، برابر با تابش های انعکاس یافته و پراکنده شده به وسیله ی جو زمین است که به سطح زمین می رسد. مجموع تابش مستقیم و تابش پراکنده خورشید را تابش کل خورشید روی سطح زمین می نامند.

دقیق ترین روش برای به دست آوردن مقدار شدت تابش خورشید روی سطح زمین، استفاده از ابزار اندازه گیری شدت تابشی است در ایران، به طور عمده در ایستگاه های هواشناسی مقدار شدت تابش کل روی سطح افق به صورت روزانه اندازه گیری می شود. دانشسپار [۱۳] مدل هایی تجربی برای محاسبه مقدار میانگین روزانه شدت تابش کل خورشید برای مناطق متفاوت ایران ارائه داد و در محاسبه های شدت تابش مستقیم و پراکنده، ضریبی تحت عنوان ضریب ابرناکی (CF) را در نظر گرفت و برای ۳۰

بهداری و میرحسینی [۱۱] با کمک نرم افزار آماری SPSS رابطه ای برای  $K_T$  بر حسب پارامترهای هواشناسی ذکر کرده و ضریب صافی هوا را برای شهرهای متفاوت ایران در ماه های متفاوت سال به دست آوردند. نتیجه های به دست آمده نشان داد که از میان ۳۶ شهر انتخاب شده شهر طبس با میانگین سالانه ضریب صافی هوا ۰/۶۹ بیشترین مقدار  $K_T$  و شهرهای شمالی کشور با میانگین ضریب صافی هوا ۰/۳۹ کمترین مقدار را نسبت به دیگر شهرهای ایران دارا هستند.

#### ۴-۳ شدت تابش جذب شده توسط سقف مورب

##### ۴-۱ زاویه برخورد پرتوهای خورشید

برای به دست آوردن انرژی تابش مستقیم خورشید که با سطوح در موقعیت های متفاوت برخورد می کند لازم است که مقدار شار تابشی مستقیم خورشید در راستای قائم بر سطوح دریافت کننده محاسبه شود اگر  $\theta$  زاویه بین پرتوهای مستقیم برخوردی و خط قائم بر سطح باشد که به آن زاویه برخورد نیز گفته می شود و  $I_b(W/m)^2$  شار تابشی مستقیم در راستای پرتوها باشد، آنگاه  $I_b \cos \theta$  شار تابشی مستقیم برخوردی در راستای قائم بر سطح است. شکل ۵ زاویه برخورد پرتوهای خورشید با سطح و نیز زاویه ها در نظر گرفته شده دیگر را نشان می دهد که به وضعیت سطح و خورشید نسبت به یکدیگر بستگی دارند. زاویه برخورد را می توان از معادله ۳۲ به دست آورد [۱۲].

$$(32)$$

$$\cos \theta = \sin \phi (\sin \delta \cos \beta + \cos \delta \cos \gamma \cos \omega \sin \beta) + \cos \phi (\cos \delta \cos \omega \cos \beta - \sin \delta \cos \gamma \sin \beta) + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \sin \beta$$

برای سطح افق  $\beta = 0$  و معادله به شکل زیر در می آید:

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (33)$$

که در این حالت  $\theta$  زاویه سمت الرأس و با  $\theta_z$  نشان داده می شود. در رابطه ۳۲،  $\phi$  عرض جغرافیایی مکان مورد نظر،  $\delta$  زاویه انحراف خورشید،  $\beta$  زاویه سطح مورب با

$$I_b = I_h - I_d \quad (39)$$

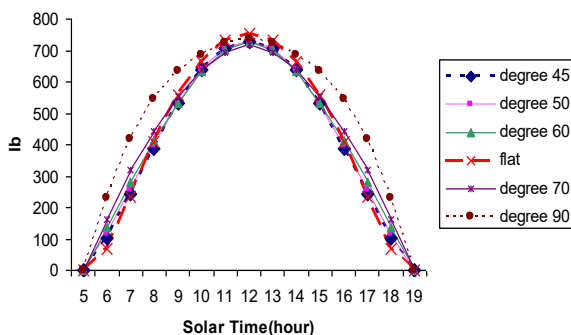
با ضرب  $I_b$  به دست آمده از فرمول ۳۹ در  $R_b$  شدت تابش جذب شده روی سقف مورب به دست می آید. نسبت تابش پراکنده روی سطح شیبدار به تابش پراکنده روی سطح افق با  $R_d$  نشان داده می شود که آن را فاکتور نسبت پراکنده می نامند و می توان آن را از مدل همگن زیر به دست آورد:

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (40)$$

با ضرب  $I_d$  بدست آمده از فرمول ۳۸ در نسبت تابش پراکنده، شدت تابش پخش در سقف مورب به دست می آید.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله پژوهشی و آموزشی جذب تابش خورشیدی سقف گنبدی در بحرانی ترین روز سال یعنی ۱۵ مرداد در شکل ۶ ارایه شده است. به هنگام ظهر محلی خورشید در بالاترین موقعیتش در آسمان قرار می گیرد. در چنین حالتی باید آموزش داده شود که به دلیل انعکاس بیشتر سقف گنبدی نسبت به سقف تخت، جذب تابش خورشیدی سقف گنبدی در مقایسه با سقف تخت متناظرش کاهش می یابد. لذا حداکثر جذب تابش خورشید به وسیله سقف گنبدی، ساعات اولیه طلوع و غروب خورشید است.



شکل ۶ شدت تابش جذب شده بر واحد سطح گنبد در

زمان های متفاوت

جذب تابش خورشیدی معادله ی مستقیم با زاویه سقف ( $\theta$ ) دارد. بنابراین، با افزایش زاویه نصف گنبد ( $\theta$ ) میزان

شهر ایران مقادیر این ضریبها را برای ماه های متفاوت سال ارایه کرد. معادله ی این پژوهشگر برای محاسبه تابش مستقیم لحظه ای به صورت زیر است:

$$I_b = c \times (1 - cf) \left\{ 1 - \exp \left[ -0.075 \times \left( \frac{\pi}{2} - \theta_z \right) \right] \right\} \quad (34)$$

$$C = 950 \frac{W}{m^2}$$

مقداری ثابت است

لازم به ذکر است که روش هایی توسط Hottel و ASHRAE [۱۴] نیز برای به دست آوردن مؤلفه های مستقیم و پخش ارایه شده است. صمیمی [۱۵] با توجه به وابستگی شدت تابش خورشید به ارتفاع منطقه، مدلی برای برآورد تابش کل روزانه خورشید به صورت مجموع تابش های مستقیم و پراکنده ارایه داده است. که مدل برآورده کننده تابش مستقیم بر پایه مدل مینل - مینل [۱۶] است که برای شرایط آب و هوایی ایران اصلاح شده است.

### ۴-۳ شدت تابش روی سطوح مایل

بیشتر وسایل اندازه گیری و معادله های نظری، مقادیر تابش خورشید روی سطح افق را مشخص می کنند. با این وجود برای به دست آوردن شدت تابش روی سطوح مورب می توان از معادله ی ۳۵ استفاده کرد [۱۷]. نسبت تابش مستقیم دریافتی روی سطح شیبدار به تابش مستقیم دریافتی روی سطح افق با  $R_b$  نشان داده می شود که به آن فاکتور نسبت مستقیم گفته شده و از معادله ی ۳۵ محاسبه می شود:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (35)$$

با توجه به این که در مرداد ماه تهران  $k_T=0.65$  است لذا برای محاسبه شار تابشی مستقیم روی سطح افق از معادله های دافی و بکمن [۱۸] استفاده شد که به صورت زیر است:

$$(36)$$

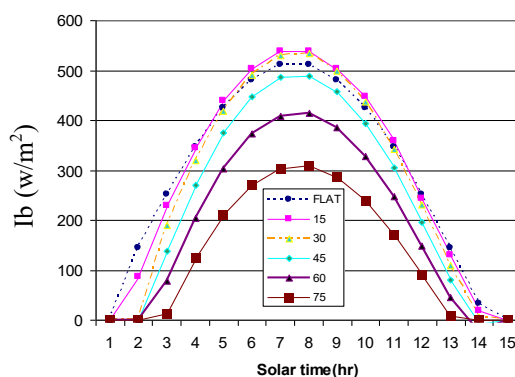
$$I_{oh} = ((24 \times 3600) / (2\pi)) Gsc (1 + 0.033) \cos d ((360(n) / 365)) (\cos d(\phi) \cos d(\delta) (\sin d(w(2)) - \sin d(w(1))) + (2\pi(w(2) - w(1))) / 360 \sin d(\phi) \sin d(\delta))$$

$$I_h = I_{oh} k_T \quad (37)$$

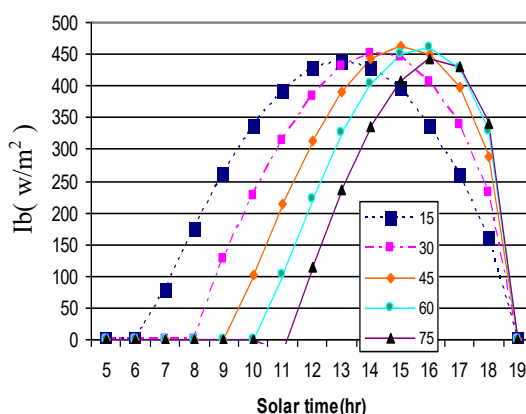
$$I_d = I_h (1.557 - 1.84 \times k_T) \quad (38)$$

جذب تابش و جذب کلی تابش خورشیدی ناشی از انعکاس و پخش زیاد می شود. از سوی دیگر با کاهش زاویه نصف گنبد ( $\theta$ ) حرارت به دست آمده از خورشید کاهش می یابد. در سقف گنبدی برای زوایای  $\theta \leq 55$  درجه جذب تابش خورشیدی به تقریب با سقف تخت برابر می شود. بنابراین، از نظر دریافت انرژی خورشیدی توصیه می شود تا سقف گنبدی ساختمان ها با زاویه نصف گنبد کوچکتر از ۵۵ درجه ( $45 \leq \theta \leq 55$ ) ساخته شوند. جذب تابش خورشیدی سقف مورب در ۱۵ مرداد ماه برای زاویه های متفاوت سقف در شکل الف-۷ و ب-۷ ارایه شده است. با توجه به شکل مشخص است که برای زوایای گوناگون سقف، میزان جذب تابش خورشیدی تغییر می کند.

سقف مورب با جهت شمال - جنوب افزایش می یابد، و در شرق - غرب کاهش می یابد. بنابراین از نظر جذب تابش خورشیدی در فصل تابستان توصیه می شود که از سقف مورب با جهت شمال - جنوب استفاده شود. ضریب جذب تابشی به شدت به زاویه تابش وابسته است. شدت تابش حرارتی محاسبه شده با فرض عدم وابستگی جهتی  $\alpha$  کمتر از شدت تابش حرارتی محاسبه شده بر مبنای ضریب جذب متغیر با زاویه است. با فرض عدم وابستگی زاویه ای شار حرارتی جذب شده ناشی از شدت تابش خورشید توسط سقف برای حالت های مختلف سقف (تخت، مورب، گنبدی) مورد بررسی قرار گرفت که کمترین شار حرارتی برای سقف تخت و بیشترین شار مربوط به سقف گنبدی است.



شکل ۷ الف - شدت تابش جذب شده سقف مورب در جهت شمال - جنوب



شکل ۷ ب- شدت تابش جذب شده سقف مورب در جهت شرق - غرب

با توجه به شکل ها در زوایای ( $45 \leq \theta \leq 60$ ) درجه جذب تابش خورشیدی



## ۶-ارایه راهکارهای عملی

است که از سقف های گنبدی با زاویه نصف سقف  $45 \leq \theta \leq 55$  درجه استفاده شود. در مناطق معتدل و مرطوب شمالی استفاده از سقف های گنبدی مناسب نیست ولی سقف مورب با زوایای  $60 \leq \theta \leq 45$  درجه میزان شار حرارتی ورودی به ساختمان را کاهش می دهد. و آسایش حرارتی بهتری را در فصل تابستان فراهم می کند، همچنین تطابق بیشتری با فصل زمستان نسبت به سقف تخت متناظر دارد و مصرف انرژی را به مقدار  $1/3 - 1/41$  برابر سقف تخت کاهش می دهد.

میزان جذب تقریبی سقف گنبدی مشابه سقف تخت متناظرش است. شدت تابش جذب شده سقف گنبدی در مقایسه با سقف تخت بیشتر است ولی جذب تابش پخشی به آسمان به وسیله سقف گنبدی در مقایسه با سقف تخت بیشتر است. ترکیب توزیع تابش جذب شده به وسیله سقف های گنبدی یا منحنی شکل منجر می شود که این نوع سقف ها برای مناطقی با پخش شدید آسمان و دمای بالا مانند مناطق گرم و مرطوب مناسب نباشد. به عبارت دیگر چنین سقف هایی برای مناطقی با تابش کلی زیاد اما شدت تابشی پخش جزئی به آسمان مانند مناطق گرم و خشک مناسب است. [۱۹] در مناطق گرم و خشک بهتر

## ۷-پی نوشت

<sup>1</sup> Fathy 1973

<sup>2</sup> Mainstone 1983

<sup>3</sup> Bowen 1981

<sup>4</sup> Kita 1981

<sup>5</sup> Tang Runsheng

<sup>6</sup> Bahadori

<sup>7</sup> Haghighat

<sup>8</sup> Pearlmutter 1993

<sup>9</sup> Olgyay 1973

<sup>10</sup> Nahar

<sup>11</sup> Dannels parker

<sup>12</sup> Steohan F.Barkaszi jr

<sup>13</sup> Jorge Mario villasenor

<sup>14</sup> JoseA. Manrique

<sup>15</sup> Duffie and Backman

<sup>16</sup> Liu and Jordan

<sup>17</sup> Rable

<sup>18</sup> Mir Hosseini

<sup>19</sup> Incidence angle

<sup>20</sup> Beam Radiation

<sup>21</sup> Diffuse radiation

<sup>22</sup> Global radiation

<sup>23</sup> Daneshyar 1978

<sup>24</sup> Cloude factor

<sup>25</sup> Samimi 1994

<sup>26</sup> Minel, A . b Minel 1977

<sup>27</sup> Diffuse ratio factor

## مراجع

- [1] Tang R.S., Meir I.A., Etzion Y., "An Analysis of Absorbed Radiation by Domed and Vaulted Roofs as Compared With Flat Roofs". Energy and Building .Vol .35, No.6, **2003**, pp. 539-548.
- [2] Bahadori MN., Haghighat F., "Passive Cooling in Hot , Arid Regions Indeveloping Countries by Employing Domed Roofs and Reducing the Temperature of Internal Surface", Building and Environment Vol. 20 ,No. 2, **1985**, pp. 103-130.
- [3] Pearlmutter D., "Roof Geometry as a Determinant of Thermal Behavior a Comparative Study of Vaulted and Flat Surface in a Hot – Arid Zone", Architectural science Review Vol. 36 ,No. 2, **1993**, pp. 75-86.
- [4] Olgyay F., "The application of ecosystems service criteria for green building assessment". solar Energy, Vol. 77, No. 4, **1973**, pp. 389-398.
- [5] Nahar NM., Sharman P. "Studies of solar passive cooling techniques for arid areas , Energy conversion & Management, Vol. 40, **1999**, pp. 89-95.
- [6] Danny S.Parker, Stephen F. Barkaszi Jr. "Roof solar reflectance and cooling energy use": filed research result from Florida. **2006**.
- [7] Jose A., Manrique, Jorge M.V., "Air pollution dispersion by using solar energy". International Communication in Heat and Mass transfer Vol. 1, **1994**, pp. 29-39

- [8] Duffie J.A., Beckman W.A., (Eds), "Solar Engineering of Thermal Processes", 2nd Edition Wiley, New York, 1960, p. 209.
- [9] Liu B.Y., Jordan R.C., "The Interrelation Ship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse, and Total Solar Radiation". Solar Energy Vol.4, No.1, 1960.
- [10] Rabble A., "Active Solar Collectors and Their Application", Oxford University Press, Oxford, 1985, pp. 65-68.
- [11] بهادری نژاد مهدی و میرحسینی عباس "ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران" سومین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران، بهمن ۱۳۸۲.
- [12] Sukhatme S.P., "Principles of Thermal Collection and Storage", New Dehli, India, Tata Mac Grow – Hill, Solar energy, 1984.
- [13] Daneshyar M., "Solar Radiation Statistics For Iran", Solar Energy, Vol. 21, 1978, pp. 345-349.
- [14] سرپوشان سعید و یعقوبی محمود، "محاسبه انرژی خورشیدی روی سطوح سه بعدی"، نشریه انرژی ایران، سال هفتم، شماره ۱۲، اردیبهشت ۱۳۸۱.
- [15] Samimi J., "Estimation Of Height – Dependent Solar Irradiation and Application to the Solar Climate of Iran", Solar Energy, Vol. 52, No. 5, 1994, pp. 401-409.
- [16] Meinel A.B., Meinel M.P., "Applied Solar Energy", Addison Wesley Publ Inc. New York, 1977.
- [17] کمالی غ و مرادی ا. "تابشی خورشید، اصول و کاربردها در کشاورزی و انرژیهای نو" انتشارات پژوهشکده هواشناسی و نشر قرن ۲۱، تهران، تابستان ۱۳۸۴.
- [18] Duffie J.A., Beckman W.A., "Solar Engineering of Thermal Processes" 2<sup>nd</sup> Ed. New York, 1980.
- [19] Tang R.S., Meir I.A., Etzion Y., "Thermal Behavior of Buildings With Curved Roofs as Compared With Flat Roofs". Solar Energy . Vol. 74, 2003, pp. 273-286.