

تأثیر بهینه‌سازی مصرف انرژی در کیفیت هوای داخل ساختمان (مطالعه موردی: ساختمان آموزشی)

فرزانه مهلب*^۱ و مجید شفیعی‌پور^۲

۱. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

shafiepourm@yahoo.com

۲. استادیار دانشکده محیط‌زیست، مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۵/۲۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۶

چکیده

مباحث انرژی مصرفی در ساختمان‌ها و کیفیت هوای داخل آن به‌منزله جدیدترین موضوعات تحت بررسی در بخش تحقیقاتی ساختمان و محیط‌زیست است. امروزه محیط‌زیست، صرفه‌جویی در مصرف انرژی‌های فسیلی و توسعه پایدار به مباحث بسیار مهم و رایج در سطح بین‌المللی تبدیل شده‌اند. از طرفی نیز بررسی کیفیت هوای داخل ساختمان به علت زمان زیاد حضور افراد داخل محیط‌های بسته، دارای اهمیت زیادی است. در این مقاله تلاش شده است تا اثر بهینه‌سازی مصرف انرژی در کیفیت هوای داخل ساختمان ارزیابی شود. در جهت رسیدن به این هدف ساختمانی با کاربری آموزشی به‌منزله مطالعه موردی انتخاب و از طریق نرم‌افزار ممیزی انرژی میزان بارهای گرمایی و سرمایی آن محاسبه و عامل تهویه ساختمان و نرخ نشت و نفوذ به‌منزله رابطه بین میزان مصرف انرژی و کیفیت هوای داخل ساختمان ارزیابی شد. میزان دی‌اکسیدکربن برای بررسی کارآمدی تهویه در ساختمان مورد مطالعه ملاک ارزیابی قرار گرفت. با مدل‌سازی در نرم‌افزار کانتیم مشاهده شد که در نرخ تعویض هوا برابر با ۲/۴ بار در ساعت برای کلاسی دارای ۲۰ نفر دانشجوی، این میزان نرخ تهویه مناسب است، اما با افزایش تعداد افراد تا ۳۰ نفر میزان سطح دی‌اکسید به ۸۰۰ ppm رسیده و هوا کهنه می‌شود و به افزایش میزان تعویض هوا نیاز است. از طرفی با افزایش میزان نرخ تعویض هوا، بار گرمایی ساختمان به میزان زیادی افزایش می‌یابد و موجب افزایش مصرف انرژی خواهد شد. در ادامه اقدامات بهینه‌سازی بر ساختمان اعمال شد و بار گرمایی ساختمان ۶۷ درصد و نرخ تعویض هوا به ۲/۲ بار در ساعت کاهش یافت، اما پس از مدل‌سازی دوباره ساختمان با این نرخ تعویض هوا، در نرم‌افزار کانتیم، مشاهده شد که سطح دی‌اکسیدکربن از حد مجاز بسیار فراتر رفته است.

کلیدواژه

بهینه‌سازی مصرف انرژی، کیفیت هوای داخل ساختمان، نرخ نشت و نفوذ.

۱. سرآغاز

پتانسیل‌های اقلیمی و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به یکی از اهداف اصلی معماران، مهندسان در بخش عمران و شهرسازی و مهندسان محیط‌زیست تبدیل شده است (صادقی‌پور، ۱۳۸۷). کاهش مصرف انرژی و بهینه‌کردن مصرف آن و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، بهبود عملکرد ساختمان و فراهم کردن شرایط آسایش ساکنان،

امروزه محیط‌زیست، صرفه‌جویی در مصرف انرژی‌های فسیلی و توسعه پایدار به مباحث بسیار مهم و رایج در سطح بین‌المللی تبدیل شده‌اند. به طوری که حفظ منابع انرژی، جلوگیری از آلوده‌کردن زمین و محیط‌زیست، کاهش میزان مصرف انرژی‌های فسیلی از طریق یافتن

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها صورت گرفته است. آیهام و کرارتی در سال ۲۰۱۲ به بررسی راهکارها و طراحی در جهت بهینه‌کردن مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی در تونس پرداختند. این راهکارها به طور نمونه شامل توجه به جهت‌گیری ساختمان، کاهش نرخ نشت و نفوذ و عایق‌کردن سقف است که نتایج نشان داد در صورت به‌کارگیری تمامی موارد میزان مصرف انرژی در حدود ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت (Ihm & Krarti, 2012). وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ به مطالعه راهکارهای طراحی ساختمان‌هایی با مصرف انرژی صفر پرداختند. روش‌های طراحی مختلف از طریق نرم‌افزار انرژی پلاس شبیه‌سازی و در نهایت روش بهینه در جهت نیل به هدف بیان شد (Wang et al., 2009).

در سال ۱۹۹۲، در اروپا پروژه‌ای از سوی گروهی از متخصصان آغاز شده است که در آن به بررسی تهیه در ساختمان‌های اداری پرداخته و تلاش می‌شود راهکارهای ممکن برای کاهش میزان مصرف انرژی و نگاه‌داشتن سطح کیفیت هوای داخل ساختمان در حد مطلوب ارزیابی شود (Bluyssen et al., 1995). طهماسبی در سال ۱۳۸۷ ساختمانی مسکونی در اقلیم تهران را بررسی و میزان مصرف انرژی آن را محاسبه کرد، سپس با توجه به شرایط اقلیمی و آب و هوایی تهران ساختمانی طراحی شد تا در حد امکان قابلیت بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر را دارا باشد و میزان مصرف انرژی فسیلی آن کاهش یابد (طهماسبی، ۱۳۸۷). تحقیقات وسیع صورت گرفته در این زمینه نشان‌دهنده اهمیت این موضوع در سطح جهانی است. در این تحقیق ساختمانی به‌منزله مطالعه موردی انتخاب و در شاخص‌ترین نرم‌افزارهای ممیزی انرژی مدل شد تا میزان مصرف انرژی آن برآورد شود. این کار از طریق برآورد بارهای گرمایی و سرمایی ساختمان در فصول مختلف سال انجام می‌شود. سپس، میزان تهویه ساختمان به‌منزله یکی از عوامل مؤثر در میزان مصرف انرژی و تعیین

ساختمان را به مفهوم سبز بودن و پایداری نزدیک می‌کند. بررسی و شناخت استانداردهای روز دنیا که در جهت ساخت ساختمان‌های پایدار در کشورهای توسعه‌یافته تدوین شده‌اند کمک شایانی به این امر کرده است و سبب می‌شود متخصصان راهکارهای پیشنهادی را با استانداردهای موجود در کشور مقایسه کنند و مطابق شرایط اقتصادی و جغرافیایی کشور به این قوانین بیفزایند و آن‌ها را بهبود بخشند.

برای مثال، دولت انگلیس طرح طراحی ساختمان‌های پایدار را در سال ۲۰۰۶ تصویب کرد و متعهد شد نیاز تمامی واحدهای مسکونی دولتی در این کشور به استفاده از سوخت‌های کربنی تا سال ۲۰۱۶ میلادی برطرف شود. این مهلت برای واحدهای مسکونی خصوصی و ساختمان‌های تجاری جدید به ترتیب سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ در نظر گرفته شده است (Wang et al., 2009). استاندارد لید^۱ نیز که از سوی انجمن ساختمان سبز ایالات متحده برای یکپارچه‌کردن معیار ساختمان سبز، تنظیم شده است به ارائه ۵ سرفصل زیست‌محیطی مرتبط با صنعت ساختمان می‌پردازد (LEED, 2009).

کیفیت هوای داخل ساختمان که یکی از سرفصل‌های استاندارد لید است، وابسته به اندرکنش بین سایت، شرایط آب و هوایی، سیستم ساختمان (طراحی اولیه و تغییرات انجام‌شده در سازه و سیستم مکانیکی)، تکنیک‌های ساخت، منابع آلاینده‌ها (مصالح ساختمان، رنگ‌ها و پوشش‌های کف، نوع کاربری هر فضا) و ساکنان ساختمان است (EPA, 2010).

کیفیت هوای داخل ساختمان به لحاظ زیست‌محیطی را می‌توان شامل موارد زیر دانست:

۱. حذف یا کاهش منابع آلوده‌کننده داخل ساختمان؛
۲. تهویه هوا و کنترل آلوده‌کننده‌ها؛
۳. مطالعات حرارتی و برودتی و جلوگیری از پرت حرارتی؛
۴. کنترل کیفیت هوا؛
۵. استفاده صحیح و بهینه از نور و منظر (LEED, 2009).

این پژوهش برای شبیه‌سازی انرژی، دیزاین بیلدر^۴ است. نرم‌افزار دیزاین بیلدر بر پایه اطلاعات و مشخصات ساختمان، اطلاعات مربوط به ساکنان، نوع و میزان استفاده از تجهیزات تهویه مطبوع و سایر اطلاعات ورودی، همچنین داده‌های آب‌وهوایی، بارهای سرمایش و گرمایش و میزان مصرف انرژی را محاسبه می‌کند.

شبیه‌سازی بر پایه حل گستره معادلات ریاضی، بر پایه معادله تعادل حرارتی و بر اساس حل معادلات انرژی و تعادل رطوبتی در یک ناحیه انجام می‌شود.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{Si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + Q_{sys}$$

$$= \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i = C_z \frac{dT_z}{dt} = \text{انرژی ذخیره‌شده در هر ناحیه،}$$

$$= \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{Si} - T_z) = \text{مجموع بارهای داخلی همرفتی،}$$

$$\text{حرارت همرفتی منتقل شده از سطح هر ناحیه و}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) = \text{انتقال حرارت ناشی از اختلاط}$$

هوای داخل ناحیه.

۲.۲. شبیه‌سازی چندناحیه‌ای^۵ جریان هوا

برای پیش‌بینی جریان‌های هوا و نحوه توزیع آلاینده‌ها در محیط‌های بسته می‌توان به دو روش مدل‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی اشاره کرد. مدل‌های میکروسکوپی از CFD برای محاسبه مقادیر پارامترها در نقاط بسیار نزدیک فضایی و با درجه بالایی از تجزیه و تحلیل استفاده می‌کنند. روش دوم مدل‌های ماکروسکوپی‌اند که به دو بخش شبیه‌سازی تک‌ناحیه‌ای و چندناحیه‌ای تقسیم می‌شوند. مدل‌های تک‌ناحیه‌ای، ساختمان یا بخش مورد نظر را به منزله یک ناحیه خوب اختلاط یافته در نظر می‌گیرند. آن‌ها غالباً برای مدل کردن

غلظت سطح گازهای موجود در محیط‌های بسته بررسی می‌شود، زیرا به نوعی تمامی قوانین وضع شده به صورت مستقیم و غیرمستقیم، تلاشی در جهت بهبود شرایط زندگی انسان‌اند. سپس، اقدامات بهینه‌سازی بر ساختمان اعمال می‌شود تا رابطه بین میزان مصرف انرژی و کیفیت هوای داخل ساختمان مشخص شود.

۲. روش‌شناسی تحقیق

۱.۲. شبیه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها

به طور معمول در محاسبات دستی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها شرایط محیطی به صورت پایدار^۲ در نظر گرفته می‌شود؛ به این معنی که تبادل حرارت انواع سیستم‌های ساختمانی (پوسته، تأسیسات و ...) با فرض ثبات عناصر اقلیمی (به خصوص دمای ثابت برای فضاهای داخلی و خارجی) و با صرف نظر از اثر همزمان عناصر اقلیمی متغیر مانند تابش آفتاب، دمای هوا، رطوبت هوا و ... محاسبه می‌شود. اما در حقیقت، شرایط جوی و به تبع آن وضعیت فضاهای داخلی طی زمان متغیر است و ناپایدار^۳ خوانده می‌شود. در این حالت هر کدام از جداره‌های پوسته خارجی ساختمان که در محاسبات پایدار تنها انتقال‌دهنده گرما فرض می‌شوند، هم انتقال‌دهنده و هم ذخیره‌کننده گرما خواهند بود. همچنین، جداره‌های داخلی ساختمان که میان دو فضای کنترل شده هم‌دمای قرار گرفته‌اند و در محاسبات پایدار مورد نظر قرار نمی‌گیرند، به منزله جداره‌های ذخیره‌کننده گرما در شرایط دمایی فضاهای داخلی ساختمان تأثیرگذار خواهند بود. به این ترتیب مشخص می‌شود که در محاسبات در شرایط پایدار بسیاری از متغیرها نادیده گرفته می‌شوند و تحلیل دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت عملکرد حرارتی ساختمان‌ها نیازمند انجام محاسبات در حالت ناپایدار است. تحلیل عملکرد حرارتی ساختمان در شرایط ناپایدار نیازمند انجام محاسبات بسیاری است که با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌های ممکن می‌شود. نرم‌افزار اصلی استفاده شده در

۳.۲. مشخصات کلی ساختمان

ساختمان مورد نظر با کاربری آموزشی و زیربنای ۱۰۰۰ متر مربع است. ساختمان قدیمی ساز و در ابتدا با کاربری مسکونی بوده است. دیوارهای این ساختمان از آجر توپر ۳۵ سانتی متری و دیوارهای داخلی از آجر توپر ۲۲ سانتی متری ساخته شده‌اند. ضریب انتقال حرارت دیوار با آجر توپر ۳۵ سانتی متری و مجاور فضای خارج با لحاظ کردن اندوذهای دیوار و ضرایب موجود در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، $U=1.798[W/m^2.k]$ و ضریب انتقال حرارت دیوار با آجر توپر ۲۲ سانتی متری مجاور فضای کنترل نشده، $U=1.976[W/m^2.k]$ و ضریب انتقال حرارت بام $1.256[W/m^2.k]$ محاسبه شد. ضرایب انتقال حرارت درها و پنجره‌ها نیز از مبحث نوزدهم استخراج شدند. گرمایش ساختمان به وسیله سیستم مرکزی (موتورخانه) تأمین می‌شود و از سیستم گرمایش مستقلی استفاده نمی‌شود. سیستم سرمایش ساختمان نیز به صورت مستقل و شامل ۵ عدد کولر آبی است. همین‌طور سیستم روشنایی ساختمان، از نوع لامپ‌های مهتابی‌اند. از آنجا که مدل قابلیت ترسیم فضا را به صورت هندسی دارد، درها و پنجره‌ها و تمامی بازشوها مطابق ابعاد واقعی خود و در مکان و جهت گیری مشابه ساختمان اصلی در نرم‌افزار ترسیم شد.

۳. مدل سازی

۳.۱. مدل سازی انرژی

از اصلی ترین شاخص‌هایی که در این مطالعه برای ارزیابی مصرف انرژی بنا در نظر گرفته شده، بار گرمایی و سرمایی ساختمان است. بدین منظور ابتدا، بار گرمایی و سرمایی مدل اولیه در نرم‌افزار برآورد شد تا اثر این اقدامات گوناگون در تغییر آن‌ها مشخص شود. دماهای پایه گرمایش و سرمایش، با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در محل به ترتیب ۲۱ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌اند.

در جدول ۱ بار گرمایی و سرمایی برآورد شده بنا، همچنین اجزای مختلف تبادل حرارت فضاهای کنترل شده

ساختمان‌های یک طبقه، تک واحدی و فاقد دیوار جداکننده داخلی، با فرض اینکه تمام درهای داخلی بازند به کار می‌روند. در موارد تحقیقاتی و دقیق لازم است مدل‌هایی استفاده شوند که در آن‌ها بیش از یک ناحیه به صورت خوب اختلاط یافته قابل فرض و مدل‌سازی باشند. در مدل‌های چندناحیه‌ای ارتباط بین فضاها و محیط‌های مجاور تعریف و نرخ جریان مابین فضاها از طریق یک سری معادلات جریان که همزمان با هم حل خواهند شد، تعیین می‌شود. برای پیش‌بینی تغییرات غلظت برحسب زمان، در هر گام زمانی تعادل جرمی در هر بخش یا ناحیه محاسبه می‌شود. استفاده از روش چندناحیه‌ای جریان هوا برای شبیه‌سازی، می‌تواند در بسیاری از موارد برای آنالیز جریان هوا در ساختمان، تفاوت فشار و مسیر حرکت ذرات معلق به کار رود. در نرم‌افزار کانتیم^۶ اطلاعات مکان تحت بررسی به‌منزله ورودی به نرم‌افزار وارد می‌شود. نشان دادن طرح کلی ساختمان همراه مشخص کردن نواحی و بخش‌های ساختمان و محل بازشوها و ورود جریان هوا، از ویژگی‌های این مدل است. همین‌طور عوامل محیطی مانند دمای هوای بیرون و داخل، سرعت و جهت باد، ضریب سرعت باد و آلاینده‌های محیط بیرون نیز به‌منزله ورودی به مدل معرفی می‌شوند.

مدل با استفاده از معادله زیر غلظت آلاینده‌ها را محاسبه می‌کند.

$$\begin{aligned} & \left[V_i \rho_i + \Delta t \left(\sum_j F_{i \rightarrow j} + R_i^\alpha \right) \right] C_i^\alpha \Big|_{t+\Delta t} \\ & \approx V_i \rho_i C_i^\alpha \Big|_t \\ & + \Delta t \left[\sum_j F_{i \rightarrow j} (1 - \lambda_j^\alpha) C_j^\alpha + G_i^\alpha \right. \\ & \left. + m_i \sum_j K^{\alpha, \beta} C_i^\beta \right] \end{aligned}$$

که در آن:

V = حجم مورد نظر، R = ثابت گازها برای هوا، ρ = دانسیته هوا، C = غلظت آلاینده، m = جرم هوای داخل، K = ضریب واکنش بین آلاینده‌های α و β ، G = نرخ تولید آلاینده، λ = بازده فیلتر و $F_{i \rightarrow j}$ = نرخ دبی جرمی هوا از نقطه I به J است.

دیوارها، سقف‌ها و پنجره‌ها، مسیر لوله‌های تأسیسات، ونت‌ها و ... است.

۳.۲. مدل‌سازی کیفیت هوای داخل ساختمان

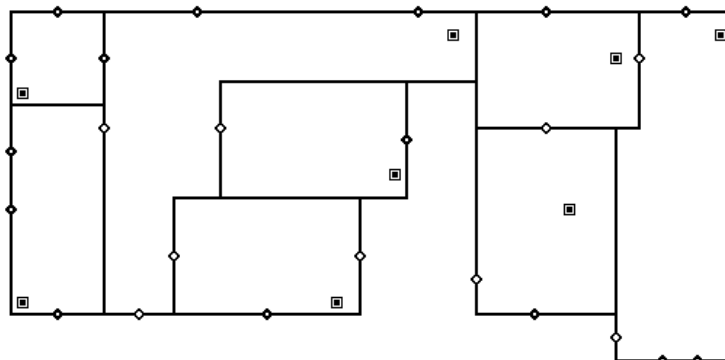
برای مدل‌سازی کیفیت هوا از نرم‌افزار کانتم استفاده شده است. در این برنامه امکان ترسیم هندسی مدل به طور کامل وجود ندارد. تنها می‌توان دیوارها و جداکننده‌های داخلی را در فضاها رسم کرد تا برنامه بتواند برای هر فضا جریانی مجزا در نظر بگیرد، بنابراین پلان ساختمان با رسم دیوارهای خارجی و جداکننده قابل رسم است. در واقع تنها می‌توان طرحی کلی از ساختمان را به مدل معرفی کرد. شکل ۱ ترسیم هندسی پلان ساختمان در محیط نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

ساختمان نشان داده شده است. در تنظیم گزارش‌های نرم‌افزار سعی شده است مجموعه‌ای از خروجی‌ها که تشکیل‌دهنده کل بار سرمایی و گرمایی ساختمان‌اند، کنار یکدیگر قرار داده شوند (جمع جبری اجزای مختلف تبادل حرارت با اختلافی در حدود ۶ درصد برابر با بار گرمایی و سرمایی برآورد شده است). به این ترتیب شناخت درستی از اجزای تبادل حرارت ساختمان و سهم هر یک از آن‌ها حاصل شده است و اثر اقدامات بهینه‌سازی در هر کدام مشخص می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میزان دفع حرارت در ساختمان از طریق تهویه زیاد است. اتلاف حرارت از طریق تهویه شامل دفع حرارت از طریق بازشدن در و پنجره‌ها به فضای خارج و فضای کنترل‌نشده، نشت و نفوذ هوا از ترک‌ها روی بدنه ساختمان و از درزهای

جدول ۱. اجزای مختلف تبادل حرارت ساختمان و بار گرمایی و سرمایی برآوردشده پیش از بهینه‌سازی

تبادل حرارت در ساختمان	پوسته ساختمان		پنجره‌ها		تهویه		کسب حرارت داخلی	بار گرمایی/سرمایی
	کسب حرارت	دفع حرارت	کسب حرارت	دفع حرارت	کسب حرارت	دفع حرارت		
دوره گرمایش ۶ ماه	۲۳۸۹	۵۶۹۱۵	۲۳۶۵۲	۱۱۲۸۷	۰	۸۰۹۹۶	۵۸۷۹۱	۶۴۵۰۸
دوره سرمایش ۶ ماه	۳۴۱۶۷	۱۱۹۷۸	۳۲۵۷۵	۴۸۰	۹۲۵۹	۹۸۲۵	۴۵۹۲۸	۹۹۳۰۹
کل سال	۳۶۲۵۶	۶۸۸۹۳	۵۶۲۲۷	۱۱۷۶۷	۹۲۵۹	۹۰۸۲۱	۱۰۳۷۱۹	۱۷۳۱۹۵



شکل ۱. پلان رسم‌شده از ساختمان در نرم‌افزار

دی‌اکسیدکربن محصول جانبی تنفس است. هنگام تنفس، افراد اکسیژن را به درون ریه تنفس و دی‌اکسیدکربن را بازدم می‌کنند. این امر سبب می‌شود سطح دی‌اکسیدکربن ساختمان به مرور افزایش یابد و بعد از چندین ساعت به مقدار بیشینه برسد. به همین دلیل دی‌اکسیدکربن به منزله شاخصی از گردش هوا در محیط به کار می‌رود، زیرا غلظت آن با تعداد افراد ساکن در ساختمان و نرخ کلی تهویه در ارتباط است (توکلی، ۱۳۸۷). به طور کلی در اماکن و ساختمان‌های غیرمسکونی، در صورت نبود منابع احتراق، نباید غلظت دی‌اکسیدکربن بیش از 650 ppm از مقدار آن در محیط بیرون تجاوز کند (Smith, 2003).

تهویه ناکافی سبب افزایش سطح دی‌اکسیدکربن در مقایسه با حالت طبیعی می‌شود. زمانی که غلظت این ماده به 800 ppm برسد احساس ناراحتی در محیط ایجاد و اصطلاحاً گفته می‌شود که هوا کهنه شده است (توکلی، ۱۳۸۷). میزان دی‌اکسیدکربن در محیط داخل ساختمان معمولاً بین 400 تا 2000 ppm متغیر است و غلظت در محیط بیرون بین 350 تا 450 ppm در نظر گرفته می‌شود. البته در مناطقی در مجاورت بخش‌هایی با فعالیت صنعتی این غلظت به حدود 800 ppm نیز می‌رسد (Halgamuge, 2009).

در مدل غلظت آلاینده برای محیط بیرون 400 ppm و برای هر فرد نیز نرخ تنفسی برابر با 30 l/h در نظر گرفته شده است. همچنین، فرض شده است کلاس ساعت ۸ صبح شروع و ۱۲ ظهر به اتمام رسیده است. بازه زمانی تا ساعت ۱۴ و تعداد افراد حاضر ۲۰ نفر در نظر گرفته شده است. شکل ۲ روند تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن را در بازه زمانی یادشده نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود در زمان شروع غلظت 400 ppm است که معادل غلظت دی‌اکسیدکربن در محیط بیرون است. پس از گذشت زمان و افزایش میزان دی‌اکسیدکربن محیط، غلظت به حدود 642 ppm می‌رسد و پایدار می‌ماند و پس از اتمام ساعت کلاس غلظت به تدریج کاهش می‌یابد و دوباره به مقدار 400 ppm می‌رسد.

تعیین محل قرارگیری درها و پنجره‌ها با استفاده از تعریف جریان هوا^۱ صورت می‌گیرد. در دیوارها و محل قرارگیری بازوها علامت جریان قرار می‌گیرد. بسته به محل قرارگیری بازو، مدل، جریان هوا را از نواحی داخل یا از محیط بیرون به داخل هر فضا منتقل می‌کند.

برای تعریف مسیر جریان هوا، مدل از روابط ریاضی استفاده می‌کند که رابطه بین اختلاف فشار و جریان هوا را تبیین می‌کنند. یکی از روابط ریاضی که مسیر جریان هوا را یک‌سویه و در سمت کاهش فشار در نظر می‌گیرد به شرح زیر است:

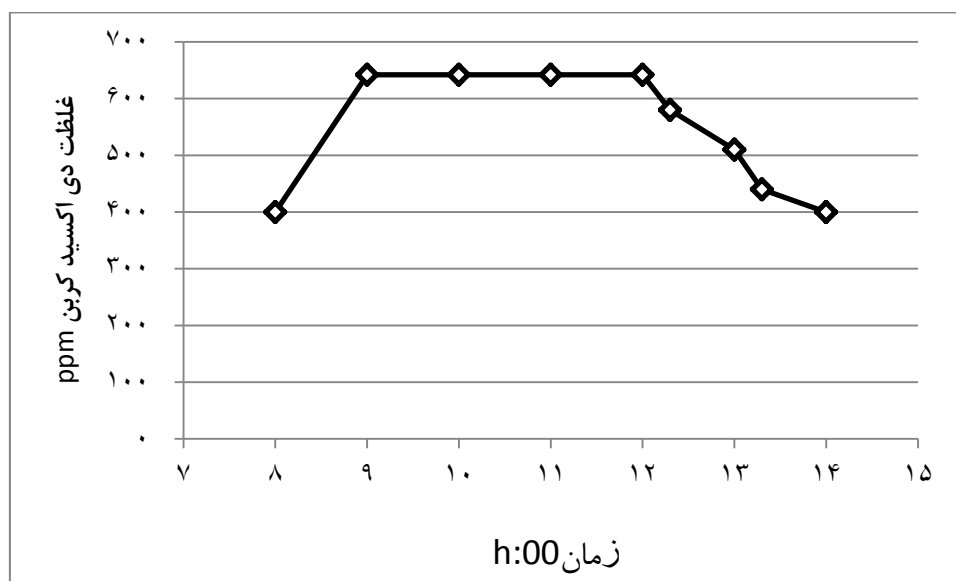
$$Q = C(\Delta P)^n$$

این معادله، جریان را به صورت حجمی در نظر می‌گیرد که در آن C ثابت جریان برای بازوها و n توان جریان است. ثابت جریان برای بازوهای به مساحت ۱ متر مربع 0.77 است و توان جریان نیز عددی بین 0.6 تا 0.7 در نظر گرفته می‌شود. دمای هوای خارج، فشار مطلق، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد از پارامترهای هواشناسی مورد نیاز مدل‌اند. طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از دریا نیز در معرفی محل، لازم‌اند.

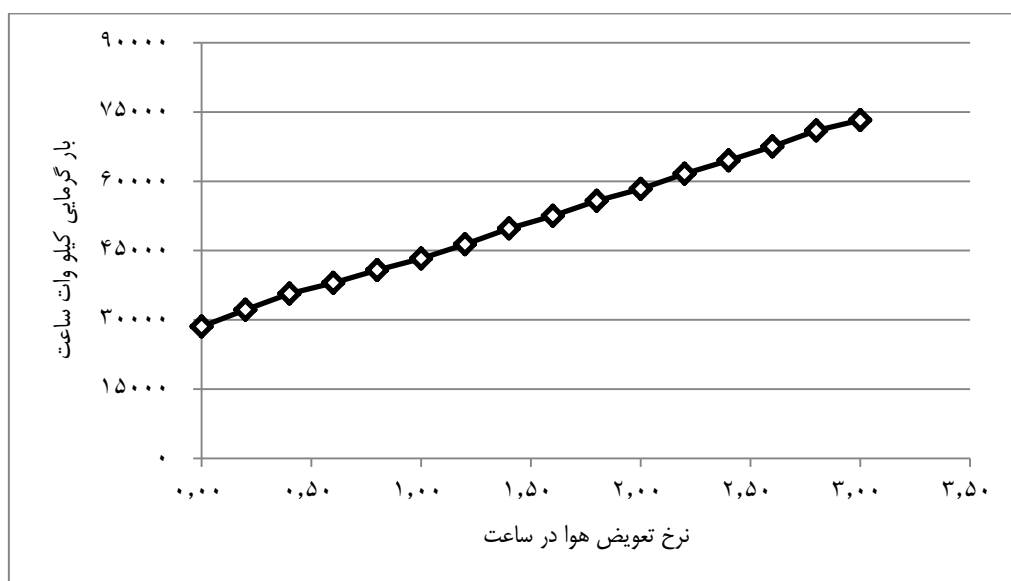
۴. بحث و تحلیل نتایج

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده شد یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در میزان مصرف انرژی ساختمان، تهویه و میزان نشت و نفوذ هوا از ساختمان است. در ساختمان مورد مطالعه میزان تعویض ناخواسته هوا، هم به واسطه باز و بسته شدن زیاد در و پنجره‌ها و هم به علت نشت و نفوذ هوا از درها و پوسته ساختمان، بالاست. مجاورت فضاهای داخلی کنترل‌شده با فضاهای کنترل‌نشده ساختمان نیز بر این اتلاف حرارت دامن می‌زند. زمانی که منبعی چون استعمال دخانیات یا پخت و پز در محل وجود نداشته باشد، غلظت دی‌اکسیدکربن به منزله شاخصی از کیفیت هوای محیط بسته قابل قبول خواهد بود (توکلی، ۱۳۸۷).

بدین ترتیب، برای بررسی کارآمدی تهویه ساختمان، میزان غلظت دی‌اکسیدکربن در ساختمان شبیه‌سازی شد.



شکل ۲. نمودار تغییرات غلظت دی‌اکسید کربن با زمان



شکل ۳. میزان بار گرمایی ساختمانی با میزان متفاوت تعویض هوا در ساعت

به‌منزله راه‌حلی برای کاهش سطح آلودگی محیط، به‌ویژه در مواردی که امکان کنترل آلودگی در منبع نباشد، بسیار مهم و قابل توجه است.

در برخی بخش‌ها برای کنترل رطوبت هوا، رفع بو و دور نگه‌داشتن محیط از حالت خفقان تهویه ضروری است. از طرفی کنترل نکردن جریان هوا، علاوه بر اینکه به تهویه نامناسب منجر می‌شود، می‌تواند با تأثیر در میزان گرمایش

بیشینه غلظت دی‌اکسید کربن در محیط داخل 642 ppm است که مطابق استانداردهای موجود مجاز است، اما در صورت افزایش تعداد افراد حاضر در مدل تا ۳۰ نفر، این مقدار به رقمی نزدیک به 800 ppm خواهد رسید و به افزایش تهویه در داخل کلاس نیاز خواهد بود. همان‌طور که گفته شد تهویه یکی از عواملی است که در تغییر سطح آلاینده‌های محیط بسته نقش مهمی ایفا می‌کند. تهویه

گرمایشی متفاوت و اثر تعویض هوا در بار سرمایشی اندک است.

بر اساس این نمودار افزایش میزان تعویض هوا در ساعت از صفر تا ۱ بار تعویض هوا، سبب کاهش بار سرمایشی خواهد شد. به دنبال افزایش نرخ تعویض هوا، از ۱ تا ۳ بار تعویض هوا در ساعت، میزان بار سرمایشی ساختمان افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که اثر تعویض هوا در بار سرمایشی بسیار کمتر از اثر آن در بار گرمایشی ساختمان است.

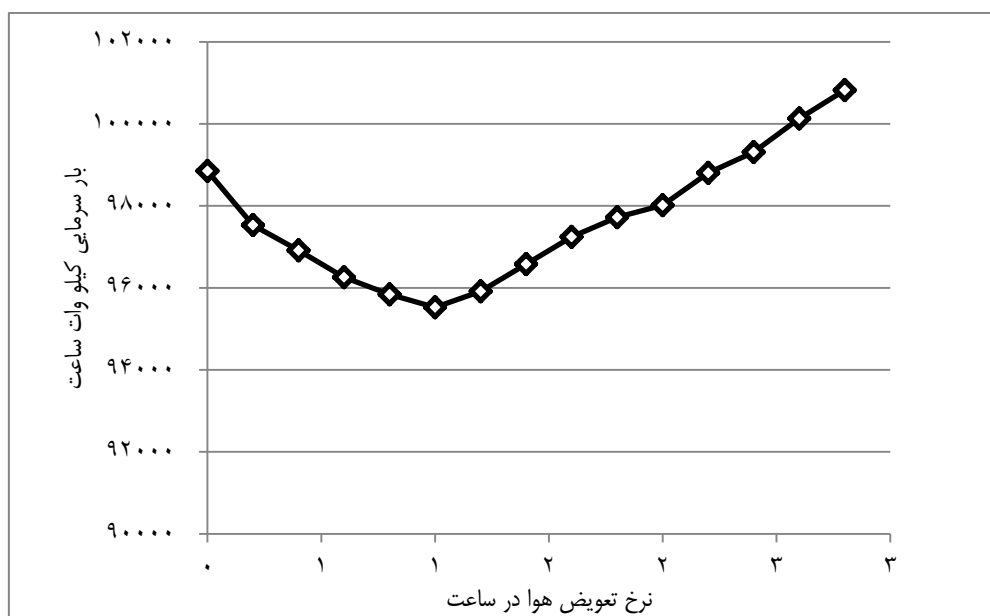
با مشاهده نتایج بالا می‌توان دریافت که از طرفی افزایش نرخ تهویه سبب کاهش میزان دی‌اکسیدکربن در ساختمان می‌شود و در بهبود شرایط و ایجاد آسایش ساکنان امری ضروری است و از طرف دیگر با افزایش تهویه و نرخ تعویض هوا میزان مصرف انرژی به خصوص انرژی گرمایشی به میزان زیادی افزایش می‌یابد. در ساختمان مورد مطالعه میزان تعویض هوا در بخش‌های مختلف متفاوت است. برای مثال، در راهروها و اتاق‌های پر رفت و آمد نرخ تعویض هوا در ساعت بالاست و این مسئله بر افزایش اتلاف انرژی دامن می‌زند.

و سرمایش در صورت حساب انرژی اثرگذار باشد. برای بررسی این موضوع چندین نرخ تهویه مختلف به نرم‌افزار دیزاین بیلدر وارد و میزان تغییرات در بارهای گرمایی و سرمایی ساختمان بررسی شد.

میزان نرخ تهویه ساختمان مورد مطالعه ۲/۴ بار در ساعت و میزان بار گرمایی ساختمان ۶۴۵۰۸ کیلووات ساعت برآورد شده است. برای بررسی اثر تعویض هوا در مصرف انرژی تمام پارامترهای مؤثر در مصرف انرژی ثابت فرض شده‌اند و در هر مرحله تنها نرخ تعویض هوا تغییر داده شده است. مطابق شکل ۳ میزان تعویض هوا در ساختمان از صفر آغاز و با فواصل ۰/۲ بار تعویض در ساعت تا ۳ بار تعویض در ساعت ختم شد.

ملاحظه می‌شود که میزان بار گرمایی ساختمان به شدت و با نسبتی خطی افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان میزان تعویض هوا را از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار در مصرف انرژی گرمایشی ساختمان دانست.

در شکل ۴ میزان بار سرمایش ساختمان با میزان متفاوت تعویض هوا در ساعت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود رفتار بار سرمایشی ساختمان با بار



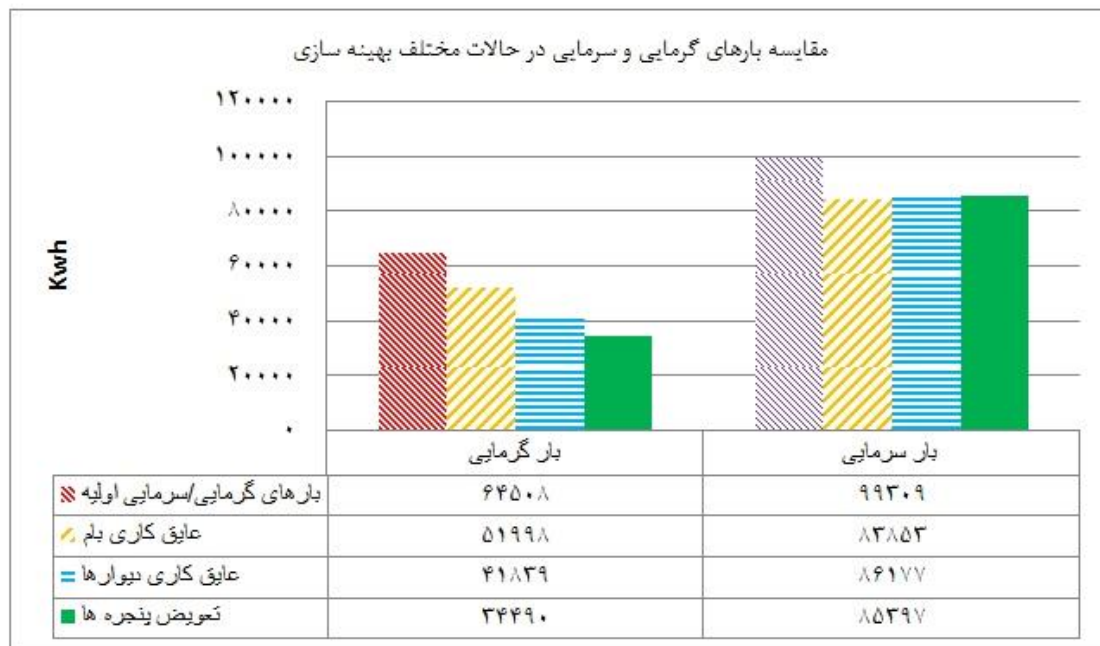
شکل ۴. میزان بار سرمایشی ساختمان با میزان متفاوت تعویض هوا در ساعت

ساختمان ۶۲ درصد و بار سرمایی ساختمان ۳۹ درصد کاهش خواهد یافت. میزان تهویه نیز حدود ۶ درصد کاهش یافته است. در پی این کاهش ۶ درصدی نرخ تعویض هوا به میزان ۲/۲ بار در ساعت کاهش می‌یابد. ساختمان با نرخ تعویض هوای ۲/۲ بار در ساعت بار دیگر در نرم‌افزار کاتم مدل شد تا میزان سطح بیشینه دی‌اکسیدکربن در کلاس بررسی شده در بخش قبلی، شبیه‌سازی شود. سطح دی‌اکسیدکربن در هوا پس از یک ساعت حضور ۳۰ نفر از دانشجویان به میزان ۱۲۰۰ppm برآورد و مطابق آنچه ذکر شد این گاز گلخانه‌ای از غلظتی بیش از ۱۰۰۰ppm به‌منزله آلاینده اطلاق می‌شود و موجب نارضایتی افراد ساکن و بروز سرگیجه و حالت تهوع خواهد شد. بنابراین، به دنبال کاهش ۶۷ درصدی بار گرمایی و کاهش میزان مصرف انرژی ساختمان، کیفیت هوای داخل ساختمان کاهش یافت. برای رفع این مشکلات می‌توان از سیستم‌های هواساز استفاده کرد. در این صورت می‌توان میزان تهویه طبیعی را به میزان زیادی کاهش داد و وظیفه تأمین هوای مناسب را به دستگاه‌های هواساز سپرد.

در ادامه به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان، مجموعه‌ای از اقدامات بهینه‌سازی شامل عایق‌کاری بام، دیوارهای خارجی، تعویض پنجره‌های ساختمان با پنجره‌های دوجداره پی وی سی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر به مدل اولیه ساختمان اعمال و فرض شد که در پی نصب پنجره‌های دوجداره علاوه بر کاهش میزان نشت و نفوذ هوا از جداره‌های پنجره، تعداد دفعات باز و بسته‌شدن پنجره‌ها نیز کاهش یافته است. شکل ۵، میزان تغییرات بارهای گرمایی و سرمایی ساختمان را در اثر هر یک از اقدامات بهینه‌سازی به طور مجزا نمایش می‌دهد و جدول ۲ نیز میزان تغییرات هر یک از عوامل مؤثر در تبادل حرارتی در ساختمان را بعد از اعمال مجموعه تغییرات نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که تعویض پنجره‌های ساختمان با پنجره‌های پی وی سی بیشترین کاهش بار گرمایی ساختمان را در پی داشته است و عایق‌کاری بام نیز، مؤثرتر از دیگر تغییرات، بار سرمایی ساختمان را در فصول گرم سال کاهش می‌دهد.

مشاهده می‌شود که پس از اقدامات ذکرشده بار گرمایی



شکل ۵. میزان تغییرات بار گرمایی و سرمایی ساختمان در اثر هر یک از اقدامات بهینه‌سازی

جدول ۲. تأثیر مجموعه اقدامات بهینه‌سازی در تبادل حرارتی ساختمان

بار گرمایی/سرمایی	کسب حرارت داخلی	تهویه		پنجره‌های ساختمان		پوسته ساختمان		تبادل حرارت در ساختمان Kwh
		دفع حرارت	کسب حرارت	دفع حرارت	کسب حرارت	دفع حرارت	کسب حرارت	
۲۳۹۴۶	۵۷۳۴۶	۷۵۸۹۶	۰	۱۰۰۹۵	۲۱۴۵۸	۱۸۵۰۵	۱۷۴۶	بعد از بهینه‌سازی
۶۴۵۰۸	۵۸۷۹۱	۸۰۹۹۶	۰	۱۱۲۸۷	۲۳۶۵۲	۵۶۹۱۵	۲۳۸۹	دوره گرمایش قبل از بهینه‌سازی
%-۶۲	%-۲	%-۶	۰	%-۱۰	%-۹	%-۶۷	%-۲۶	درصد تغییرات
۶۳۴۹۲	۴۴۸۷۲	۹۰۵۲	۸۸۲۳	۳۰۵	۲۲۹۴۴	۸۴۸۹	۶۹۵۰	بعد از بهینه‌سازی
۹۹۳۰۹	۴۵۹۲۸	۹۸۲۵	۹۲۵۹	۴۸۰	۳۲۵۷۵	۱۱۹۷۸	۳۴۱۶۷	دوره سرمایش قبل از بهینه‌سازی
%-۳۹	%-۲	%-۷	%-۴,۷	%-۳۶	%-۲۹	%-۳۰	%-۷۹	درصد تغییرات

۵. نتیجه‌گیری

می‌یابد. اما در پی این اقدامات نرخ نشت و نفوذ ساختمان کاهش می‌یابد و این امر سبب افزایش سطح میزان دی‌اکسیدکربن به واسطه تنفس افراد می‌شود. بنابراین، در صورت کاهش نرخ تعویض هوا باید تمهیداتی در جهت تأمین کیفیت هوای داخل ساختمان اندیشیده شود. به منظور دستیابی به سطح مطلوب کیفیت هوای داخل ساختمان در کنار مصرف بهینه انرژی باید شرایط ساختمان و کاربری هر فضا به طور مجزا در مراحل اولیه طراحی مد نظر قرار گیرد. برای مثال، در طراحی مکان‌هایی از ساختمان مانند کلاس درس یا سالن‌های کنفرانس که روزانه در ساعات مشخصی افراد زیادی در آن تنفس می‌کنند و نیاز به تأمین کیفیت هوای داخل افزایش می‌یابد، باید اصول طراحی بر اساس عملکرد تهویه طبیعی هوا مد نظر قرار گیرد. همین‌طور استفاده از ساختمان‌هایی با کاربری‌های متفاوت، به‌منزله ساختمان آموزشی می‌تواند سبب ناکارآمدی در عملکرد ساختمان شود.

گاز دی‌اکسیدکربن به‌منزله شاخص بررسی کیفیت هوای داخل ساختمان ارزیابی و مشاهده شد که با افزایش تعداد افراد حاضر در کلاسی با نرخ تعویض هوای برابر با ۲/۴ بار در ساعت، میزان دی‌اکسیدکربن ناشی از تنفس افراد، تا ۸۰۰ppm افزایش می‌یابد و به مرز حد مجاز خواهد رسید. برای رفع این مشکل نیاز است تا نرخ تعویض هوا افزایش یابد. مشاهده شد که با افزایش نرخ تعویض هوا بارهای گرمایشی ساختمان به شدت افزایش می‌یابند و این امر سبب افزایش مصرف انرژی در ساختمان می‌شود. عملکرد بارهای سرمایش متفاوت است و به طور کلی تأثیر نرخ تعویض هوا در بارهای سرمایشی ساختمان بسیار کمتر از تأثیر آن در بارهای گرمایشی است. در ادامه پاره‌ای اقدامات بهینه‌سازی بر ساختمان صورت گرفت و مشاهده شد که با اعمال تغییراتی از قبیل عایق‌کاری دیوارها و بام و تعویض پنجره‌های موجود با پنجره‌های دوجداره بار گرمایی ساختمان ۶۷ و بار سرمایی ۳۹ درصد کاهش

یادداشت‌ها

- | | |
|--|---------------------|
| 1. Leadership in Energy and Environmental Design | 5. multizone |
| 2. Steady state | 6. Contam |
| 3. Transient state | 7. Flow Path |
| 4. Design Builder | 8. Part per million |

منابع

- توکلی، آ. ۱۳۸۷. طراحی سامانه‌ی خیره و هوشمند بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان با رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران.
- صادقی‌پور، م. ۱۳۸۷. به‌کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌سازی رایانه‌های در طراحی معماری گامی به سوی طراحی همه‌جانبه‌نگر، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی.
- طهماسبی، ف. ۱۳۸۷. ممیزی انرژی یک ساختمان مسکونی با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در ساختمان، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشکده‌ی معماری، دانشگاه تهران.
- Bluyssen, Ph., De Oliveira Fernandes, E., Fanger, P.O., Groes, L., Glausen, G., Roulet, C.A., Bernhard, C.A., Valbjorn, O. 1995. European audit project to optimize indoor air quality and energy consumption in office buildings .
- Halgamuge, M.N., Chan, T.K., Mendis, P. 2009. Ventilation Efficiency and Carbon Dioxide (CO₂) Concentration.
- Iham, P., Krarti, M., 2012. Design optimization of energy efficient residential buildings in Tunisia, Building and Environment.
- Smith, K., Menta, S., Feuz, M. 2003. Indoor Smoke from Household Solid Fuels, Comparative Quantification of Health Risks
- U.S Environmental Protection Agency, An Introduction to Indoor Air Quality, 2010, <http://www.epa.gov/iaq/ia-intro.html>
- U.S Green Building Council, LEED 2009 for existing buildings operations and maintenance, <http://www.usgbc.org/leed/rating-systems/existing-buildings>
- Wang, I., Gwilliam, J., Jones, P. 2009. Case Study of Zero Energy House Design in UK, Energy and Building.