دوفصلنامه علمی- پژوهشی مرمت و معماری ایران
سال ششم، شماره یازدهم، بهار و تابستان ۱۳۹۵

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۲۶
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۵

ارزیابی اثر بهره‌وری انرژی ساختمان‌های خاک‌پناه در کاربری‌های مختلف نمونه‌موردی: اقلیم گرم و خشک شهر یزد*

نازنین نصراللهی** فاطمه اکرمی ابرقویی***

چکیده

روند رو به رشد طراحی و ساخت ساختمان‌ها، بدون توجه به کاهش منابع انرژی یکی از تهدیدات محیط‌زیست و زندگی بشر است. بنابراین ضروری است تا راهبردهای طراحی در ساختمان‌های جدید، با هدف کاهش انرژی مصرفی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، جهت‌گیری شوند. ساختمان‌های خاک‌پناه ازجمله ایده‌هایی است که به‌صورت غیرفعال، کاهش مصرف انرژی ساختمان و تأمین آسایش حرارتی را تاحد زیادی تضمین می‌نماید. پناه‌بردن به دل زمین و استفاده از خاصیت حرارتی خاک، یکی از راهبردهایی است که در گذشته نیز مورداستفاده قرار می‌گرفته است. تحقیق حاضر، ساختمان خاک‌پناه را از نقطه‌نظر بهره‌وری انرژی با تأثیر متقابل کاربری‌های مختلف در شهر یزد بررسی می‌کند. برای تحقق این امر پس از مطالعه نیازهای اولیه انجام تحقیق خاص بر روی موضوع، از شبیه‌سازی حرارتی به کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز حرارتی انرژی پلاس استفاده گردیده است. باتوجه‌به نتایج، با افزایش عمق فرورفتن ساختمان در دل خاک، درصد صرفه‌جویی آن نسبت به ساختمان متداول روی سطح زمین افزایش می‌یابد. در این شرایط با افزایش عمق فرورفتن ساختمان، کاربری مسکونی بیشترین و کاربری آموزشی کمترین میزان همبستگی را با کاهش مصرف انرژی دارد. همچنین عمق بهینه برای هر کاربری مقداری متفاوت پیش‌بینی می‌شود. در شرایط عمق، بهینه کاربری مسکونی ۶۹ درصد و کاربری مذهبی، اداری و آموزشی به‌ترتیب ۶۱، ۶۰ و ۵۴ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهند داشت.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

کلیدواژگان: ساختمان خاک‌پناه، آسایش حرارتی، تعدیل دما، نوع کاربری ساختمان، بهره‌وری انرژی.

---

* مقاله پیش‌رو، برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد فاطمه اکرمی ابرقویی "بررسی عملکرد حرارتی ساختمانهای خاک‌پناه" به راهنمایی دکتر نازنین نصراللهی در دانشگاه ایلام است.

** استادیار، دانشکده انرژی و معماری، دانشگاه ایلام.
*** کارشناس‌ارشد انرژی و معماری، دانشگاه ایلام.
nafisse.akrami@gmail.com

مقدمه

عدم هم‌خوانی ساختمان‌ها با اقلیم بستر خود و همچنین فراموشی تجربه‌های گذشته باعث پیدایش آسیب‌هایی شده است که از آن جمله می‌توان به بالاتررفتن مصرف انرژی اشاره نمود. از آن گذشته، تولید مصالح و احداث بی‌شمار ساختمان در سال‌های اخیر، انرژی بسیار زیادی را به خود اختصاص داده و به آلودگی زیست‌محیطی فراوانی منجر شده است. براین‌اساس، ضروری است تا راهبردهای طراحی در ساختمان‌های جدید، با هدف کاهش انرژی مصرفی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، جهت‌گیری شوند. جهت تحقق این هدف، طراحی ساختمان‌های غیرفعال، ایده‌ای است که در عصر حاضر در میان مجامع مطرح شده است. ساختمان خاک‌پناه ایده‌ای است که به‌صورت غیرفعال، کاهش مصرف انرژی ساختمان و تأمین آسایش حرارتی را، تاحد بسیار زیادی تضمین می‌نماید.

خاک یکی از ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین مصالحی است که در محیط زندگی بشری یافت می‌شود. پناه‌بردن به دل زمین و استفاده از خاصیت حرارتی خاک یکی از ترفندهایی است که در گذشته برحسب تجربه، در برخی اقلیم‌ها مورداستفاده قرار می‌گرفته است (Al-Mumin, 2001: 104).

امروزه این گونه ساختمانی به‌دلیل مزایای بسیار زیاد مورداستقبال قرار گرفته است. این موضوع بر اهمیت مطالعه در حوزه الزامات و توصیه‌های مفید، جهت نیل به طراحی کارآمد تأکید می‌کند. به دلیل فقدان اطلاعات آزموده‌شده ویژگی‌هایِ مؤثر ساختمان خاک‌پناه در کشور، لازم است تا تحقیقاتی مدون و منسجم بر روی این حوزه صورت گیرد. تحقیق حاضر به‌صورت تخصصی و با نگاه اهمیت مصرف انرژی، به‌کارگیری کاربری‌های مختلف را با ایده خاک‌پناهندگی در شهر یزد که تجربه استفاده از این ایده را دارد، بررسی می‌کند. نتایج بررسی این موضوع، رهنمود مهمی در عرصه طراحی، ساخت و بهبود این‌گونه ساختمان‌های غیرفعال است که خلأ آن در میان منابع مستند کشور احساس می‌شود.

ایده خاک‌پناهندگی

سامانه‌های غیرفعال از ارزان‌ترین روش‌های تأمین سرمایش و گرمایش بنا هستند. این سامانه‌ها، کمترین اثرات تخریب زیست‌محیطی را داشته و بهره‌وری ساختمان را از طریق کاهش دریافت و اتلاف حرارت به حداکثر می‌رسانند. ساختمان‌های خاک‌پناه ازجمله ایده‌هایی است که به‌صورت غیرفعال، آسایش حرارتی را درکنار کاهش مصرف انرژی تأمین می‌نمایند. ماهیت این گونه ساختمانی، بنایی است که برای بهره‌گیری از طبیعت و تأمین مقاصد خود، به دل زمین و خاک آن فرومی‌رود. استفاده از نام خاک‌پناه و یا زمین‌پناه، لزوماً به این معنا نیست که ساختمان بایستی در زیرزمین احداث گردد. درواقع اطلاق نام خاک‌پناه به این گونه ساختمانی، زاییده نحوه ارتباط او با محیط پیرامون است. به‌عبارت دیگر ساختمان خاک پناه، همان سازه معمولی و رایج خود را دارد با این تفاوت که بخشی یا تمام پوسته آن با لایه ضخیمی از خاک پوشیده می‌شود.

در اعصار گذشته مطابق آنچه در متون تاریخی مشاهده می‌گردد، بشر از ظرفیت نساخته طبیعت بهره گرفته و بنای خود را با آن همساز می‌کرده است، همچون غارهای کافر کلی در بابل. این نمونه‌های طبیعی به‌ندرت در مناطق خاص که بستر زمین مهیا بوده است، دیده می‌شود. در نمونه‌های غیرطبیعی جهت احداث این‌گونه بناها، با مداخله دست و ابزار حفره‌ای جهت قرارگیری بنا احداث می‌شده است؛ گودال باغچه‌های فلات مرکزی (یزد، نایین و کاشان) و همچنین نمونه روستاهای دستکند میمند و کندوان ازاین‌دست هستند (تصویر ۱). نمونه‌های امروزی، بنا به مصالح زمین و موقعیت احداث و به مدد ابزارهای پیشرفته راه‌حل آسان‌تری یافته است. در این نمونه‌ها احداث بستر ساختمان توأمان با خاک‌برداری و خاک‌ریزی صورت می‌گیرد. یعنی به‌جای قرارگیری کل بنا در محدوده خاک‌برداری‌شده، اطراف ساختمان خاک‌ریزی می‌شود که به آن نمونه خاک‌پناه دارای خاک‌ریز می‌گویند. در این شرایط، به مدد پیشرفت تکنولوژی ساخت و همچنین نیازهای گوناگون بشر، امکان ساخت انواع کاربری‌های گسترده، به شیوه خاک‌پناه به‌وجود آمده است (تصویر ۲).

ساختار معماری خاک‌پناه، ویژگی‌های متنوعی دارد که هم‌ذات با احداث آن متولد می‌شود. ویژگی‌های غالبی که سبب توجه به استفاده از این ایده شده، عبارت‌اند از:

- بهره‌وری انرژی،
- بهره‌وری از سطح زمین و محیط‌زیست،
- زیبایی‌شناسی به‌عنوان یک کانسپت متفاوت معماری،
- اهمیت چرخه زندگی بنا.

درحال حاضر در جهان، استفاده از کانسپت معماری خاک‌پناه به دلایل مختلفی به‌خصوص ازحیث حفظ انرژی و محیط‌زیست، برای طراحی بناهای مختلف مطرح است. بنابراین استفاده از ایده خاک‌پناهندگی بسیاری از معماران و طراحان را به خود جلب می‌کند. این موضوع اهمیت مطالعه عمیق‌تر را از جوانب مختلف، برای به‌کارگیری این ایده پررنگ‌تر می‌نماید. ساخت گسترده ساختمان‌های خاک‌پناه با کاربری‌های متنوع در عصر معاصر، نشان‌دهنده امکان ساخت این ایده با بهره‌برداری‌های

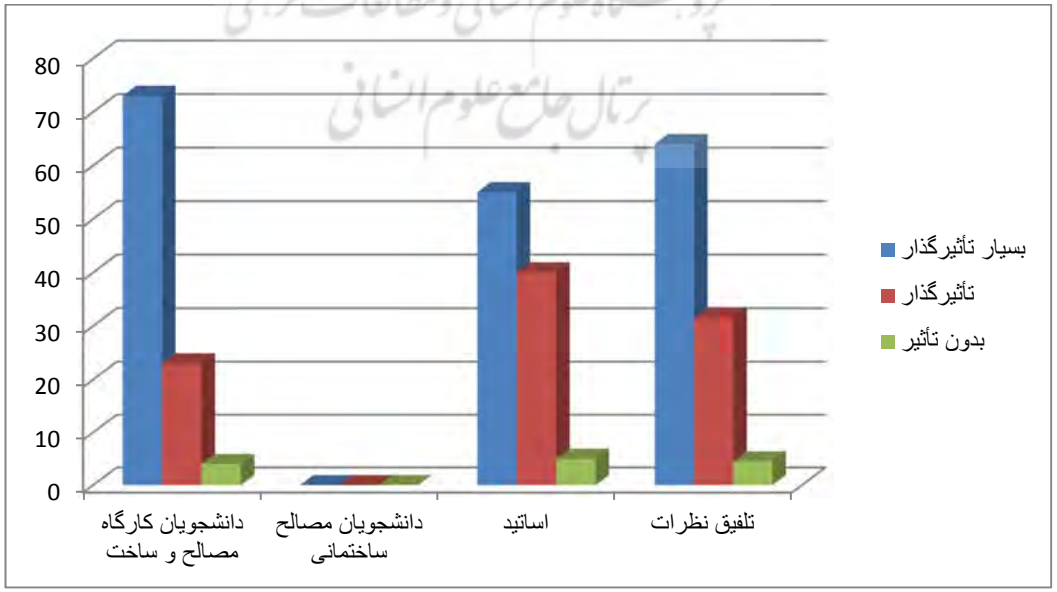
مختلف است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد، بیشترین نمونه کاربری با ساختار خاک‌پناه در سرتاسر جهان، مربوط به کاربری مسکونی است (تصویر ۳).

پیشینه پژوهش

مدارک مستند نشان می‌دهد که پناه‌بردن به دل زمین، از قدیمی‌ترین تکنولوژی‌های ساختمان‌سازی و شهرسازی در سرتاسر جهان است (Al-Temeemi & Harris, 2004: 253). نمونه‌های بی‌شماری از این گونه ساختمانی، در کشورهای آسیایی نظیر ایران و کویت نیز وجود دارد. از اولین اقدامات جهت تدوین ویژگی‌های کلی ساختمان‌های خاک‌پناه، به‌خصوص در حوزه معماری، تحقیقات *کارمودی* است که آن را از ابعاد متفاوت موردبحث قرار می‌دهند (Bonan, 2002: 36;Carmody & Sterling, 1993: 45). محققان دیگر در سال‌های بعد، راهنمایی برای ارزیابی ساخت خانه‌های خاک‌پناه در اقلیم گرم و خشک تدوین کردند. آنها به بحث درباره ویژگی‌ها و همچنین ضروریات این ساختمان‌ها در اقلیم منطقه، با ارائه راهبرد برای نمونه بناهای مسکونی پرداختند (carmody et al., 1994: 20; Al-Temeemi & Harris , 2001: 840). ازآنجاکه عملکرد حرارتی خاک مهم‌ترین و بزرگ‌ترین جنبه استفاده از فضاهای خاک‌پناه است، اولین توجیه استفاده از آن، بنابر تجربه عموم، کاهش میزان مصرف انرژی است. درواقع کاهش ارتباط ساختمان خاک‌پناه با محیط بیرون و هوای آزاد، باعث کاهش دریافت و اتلاف حرارت از طریق پوسته‌ها می‌گردد و درنتیجه اوج بار گرمایشی و سرمایشی بنا کاهش می‌یابد

تصویر ۱. گودال باغچه خانه هوشمند در یزد؛ یکی از نمونه خانه‌های خاک‌پناه (نگارندگان)

تصویر ۲. نمونه ساختمان خاک‌پناه معاصر با روش خاک‌ریزی [۱] (WWW.arabella.co.za)



تصویر ۳. فراوانی نوع کاربری ساختمان‌های خاک‌پناه در سرتاسرجهان (Van Dronkelaar, 2013: 50)

(Golany, 1983: 34). علاوه‌بر موارد ذکرشده، انتقال حرارت به‌دلیل اینرسی حرارتی بالای خاک، با تأخیر به درون ساختمان خاک‌پناه نفوذ می‌کند. تمامی این موارد، امکان صرفه‌جویی بیشتری را برای آن، در مقایسه با ساختمان‌های مشابه روی سطح زمین ایجاد می‌کند. (Jacovides et al., 1996: 170; El-Hamid & Khair-El-Din, 1991: 15).

این تحقیقات، بیشتر کیفی بوده و ویژگی‌های بارزگونه ساختمان خاک‌پناه را صرفاً از منظر تجربه توصیف کرده‌اند. بنابراین، اثبات مزیت‌های حرارتی این ایده، نیازمند بررسی‌های عملی و جدی‌تری است که دراین‌راستا، پژوهشگرانی از ابزار شبیه‌سازی حرارتی استفاده کرده‌اند. از اولین پژوهش‌های شبیه‌سازی، بررسی پنج نوع مدل مختلف ساختمان خاک‌پناه در شهر دهلی نو بود که نشان داد، عملکرد حرارتی با ارتفاع تدفین رابطه‌ای مستقیم دارد و بیشترین مسیر اتلاف حرارت در این گونه ساختمان‌ها، گوشه‌های آن است که بهتر است عایق گردد (Kumara et al., 2007: 1455). تحقیقات *آنسلم* نیز درباره عملکرد ذخیره حرارت خانه‌های خاک‌پناه دارای یک آتریوم در منطقه گرم و خشک، نشان می‌دهد که در عمق ۵ متر حدود ۱۱ درجه از دمای هوا در فصل تابستان کاسته می‌شود (Anselm, 2008: 1215). تحقیقات مذکور، میزان مصرف انرژی ساختمان را بدون مقایسه با نمونه متداول روی سطح زمین بررسی می‌کند. نیاز به بررسی تفاوت عملکرد حرارتی ساختمان‌های خاک‌پناه با نمونه‌های رایج روی سطح زمین، تحقیقات اخیر را به سوی این مقایسه هدایت کرده است. تحقیقات *النعمه* بر روی استفاده از عایق و همچنین تحقیقات *کریس ون درانکلار* بر روی کاربری‌ها در اقلیم‌های متفاوت جهان، براساس مقایسه دو گونه ساختمان خاک‌پناه و ساختمان روی سطح زمین صورت گرفته است (Al-Neama, 2011; Van Dronkelaar, 2013).

اکثر تحقیقات مرتبط با عملکرد حرارتی ساختمان‌های خاک‌پناه، موضوع را از جهت رابطه عمق و جنس خاک با وضعیت حرارتی داخل بنا بررسی می‌نماید. بررسی سایر عوامل مؤثر بر عملکرد حرارتی این گونه ساختمانی همچون ارزیابی تأثیر عامل کاربری، نور و تهویه در پژوهش‌های حاضر مغفول مانده است که بایستی در تحقیقات آتی به آن توجه گردد.

روش پژوهش

بررسی وضعیت خاک

شهر یزد، در قسمت فلات مرکزی ایران و در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۲ دقیقه و در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی، واقع شده است. براساس تقسیم‌بندی اقلیمی کوپن، شهر یزد در منطقه‌ای گرم و خشک واقع شده است. باتوجه‌به رطوبت نسبی اندک در این شهر، تفاوت دمایی عمده‌ای بین ماه‌های مختلف و نیز در طول شبانه‌روز وجود دارد. این شهر به‌دلیل قرارگیری در منطقه گرم و خشک و شرایط سخت اقلیمی، از گذشته درپی مقابله با مضرات محیطی و سختی‌های آب و هوایی است. ازاین‌رو، با تکنیک‌ها و ترفندهای مختلف، گونه زندگی همساز با اقلیم را پیش‌رو گرفته است. یکی از ویژگی‌های معماری سنتی شهر یزد، استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا است. در این اقلیم، ساخت مساکن خشت و گلی از شیوه‌های انطباق با محیط سخت بیابان بوده است. یکی از ایده‌هایی که این شهر در معماری خود پی‌می‌گیرد، استفاده از ظرفیت حرارتی خاک است. پناه‌بردن به دل زمین یکی از شیوه‌های معمول و متداولی است که در گونه‌های مختلف ساختمانی در این شهر رواج دارد.

همان‌طور که ذکر شد، بهره‌وری انرژی یکی از مزیت‌هایی است که در رابطه با ساختمان‌های خاک‌پناه مطرح می‌گردد. حضور گسترده خاک در اطراف ساختمان، رفتار متفاوتی را از لحاظ انتقال حرارت ارائه می‌نماید. خواص فیزیکی خاک، مزیت‌های متنوعی از لحاظ مصرف انرژی ارائه می‌کند که مجموع این مزیت‌ها کارآیی ایده خاک پناهندگی را اثبات می‌کند. علاوه‌بر تأثیر حرارتی خاک، راه‌های نفوذ جریان هوا نیز در این ایده، از طریق پوسته‌ها تاحدودی مسدود می‌گردد. بنابراین تنها عامل انتقال هوا، بازشوهای کنترل‌شده محسوب می‌شود. کاهش انتقال حرارتی خاک، افزایش اینرسی حرارتی، ثبات دمای زمین، کنترل میزان هوای ورودی و همچنین کاهش دریافت حرارت، ازجمله محاسنی هستند که وابستگی گونه ساختمان خاک‌پناه را به مصرف انرژی کاهش می‌دهند. این موضوع باعث صرفه‌جویی بسیار زیادی در مصرف انرژی این ساختمان‌ها می‌گردد.

دمای هوا در طول سال نوساناتی دارد که این نوسان در زیر لایه‌های خاک متفاوت است. الگوی نوسان دمای زمین تقریباً مشابه نوسان دمای سالانه هواست با این تفاوت که دامنه نوسان در زیر لایه‌های خاک کاهش می‌یابد (تصویر ۴). میزان انتقال حرارت از طریق خاک تفاوت اساسی با هوای پیرامون آن دارد. خاک به واسطه جنس، بافت، رطوبت و چگالی خود رفتار متفاوت‌تری در برابر انتقال حرارت دارد. رابطه ۱، دمای خاک پیرامون ساختمان خاک‌پناه را در عمق‌های مختلف و در طول روزهای سال نشان می‌دهد و تاکنون موردقبول مجامع علمی بوده است (Labs, 1979: 48). این رابطه با درنظرگرفتن ویژگی پخشندگی حرارت مخصوص هر خاک،

دمای آن را با درنظرگرفتن دمای هوای منطقه موردنظر محاسبه می‌نماید. محاسبه دمای خاک بنابر ویژگی‌های اقلیمی شهر یزد، داده‌های ورودی لازم را برای انجام شبیه‌سازی، مهیا می‌کند (جدول ۱)[۲].

رابطه (۱)

$$T(d,t) = T_m - A_s\, e^{-d\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}}\, cos\{\, 2\pi/365\left\{t_t_0_\frac{d}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right\}\}$$

مدل‌سازی نمونه

برای آزمودن هدف تحقیق بایستی از مدلی استفاده گردد که نتایج آن قابلیت تعمیم برای ساختمان‌های مختلف دیگر را نیز داشته باشد. از طرف دیگر ساده‌سازی مدل، از ملزومات شبیه‌سازی با نرم‌افزار منتخب شبیه‌سازی است. بنابر این، انتخاب مدل ساختمانی خاص با پلان محدود نتایج قابل‌قبولی را ارائه نمی‌کند که از آن بتوان برای سایر ساختمان‌های دیگر با فرم و پلانی متفاوت استفاده کرد. درنتیجه، برای مقایسه عملکرد حرارتی ساختمان خاک‌پناه نسبت به سایر ساختمان‌های متداول ساخته‌شده بر روی سطح زمین، بایستی مدلی یکسان در دو شرایط روی سطح زمین و همجواری خاک

جدول ۱. داده‌های موردنیاز برای سنجش دمایی خاک

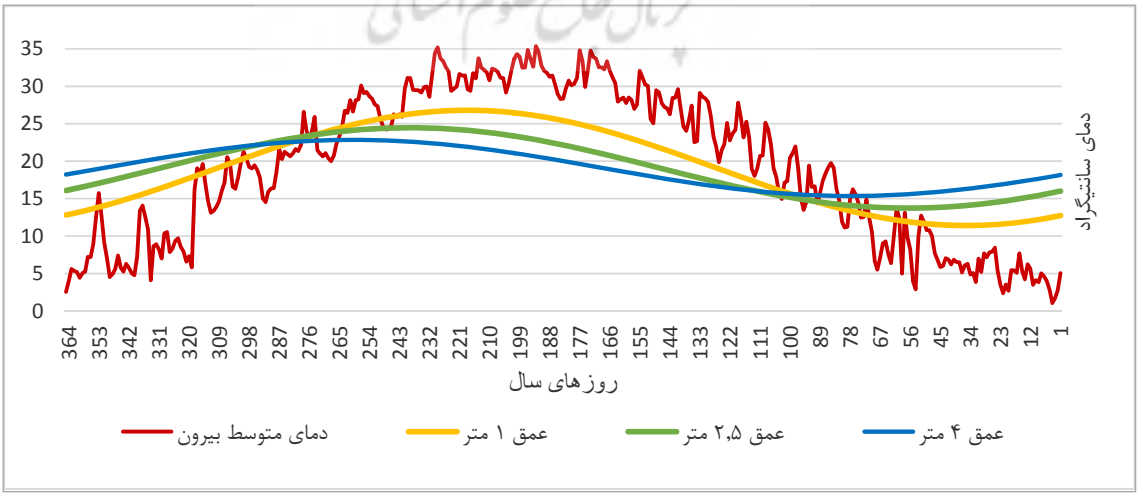
عامل	واحد	مقدار
t_m	(C°)	۱۹,۱
$t_.$		۳
A_s		۱۳,۵
α	(day/m^۲)	۰,۰۰۳۶

(نگارندگان)

پوسته زمین شبیه‌سازی و مقایسه گردد. براین اساس، مدل نمونه منتخب[۳] ۹۰۰ پیشنهادشده توسط استاندارد اشری[۴]، به‌عنوان نمونه یکسان جهانی برای چنین ساختمان‌هایی با پوسته حجیم و سنگین، پیشنهاد می‌گردد. این مدل درواقع نمونه کوچکی است تا شبیه‌سازی‌های گوناگون حرارتی را با مدل یکسان موردقضاوت قرار دهد (Judkoff, 2009: 43)، (تصویر ۵). این مدل استاندارد تأییدشده، در سایر تحقیقات پیرامون ساختمان‌های خاک‌پناه نیز به‌کار برده شده است (Van Dronkelaar, 2014: 48; Van, 2013: 41).

از دیگر عواملی که در فرایند آزمایش نمونه‌ها دخیل است، وضعیت همجواری پوسته‌ها و همچنین میزان دریافت داخلی، به تناسب کاربری‌هاست. بنابر مدل نمونه منتخب ۹۰۰ اشری، تنها یکی از جبهه‌های ساختمان دارای دو بازشوی شفاف است. بازشوها رو به جنوب جهت‌گیری شده‌اند تا علاوه‌بر تأمین روشنایی طبیعی، از نعمت گرمایش تابش خورشید در زمستان نیز بهره گرفته شود. بدین‌ترتیب، به‌جز جبهه نورگذر که همجوار با محیط بیرون است، سایر جبهه‌های مدل در تماس با خاک قرار می‌گیرند. در این تحقیق، سایر ویژگی‌های فیزیکی و کاربری مطابق جدول‌های ۲ و ۳ برای نرم‌افزار شبیه‌سازی تعریف شده‌اند. یکی دیگر از ویژگی‌هایی که به‌دلیل تفاوت کاربری‌ها مطرح می‌گردد، تفاوت زمان استفاده کاربران است. برنامه زمانی کاربران مطابق تصویر ۶ برای شبیه‌سازی مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفته است.

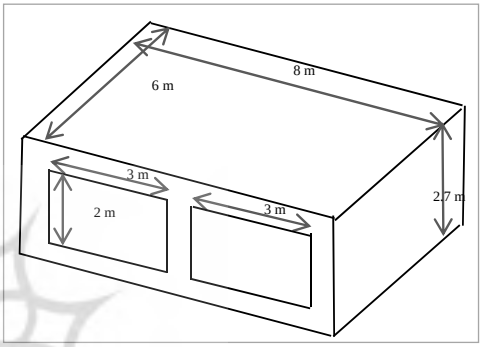
پیش‌بینی رفتار حرارتی ساختمان‌های خاک‌پناه با استفاده از شبیه‌سازی، کمی متفاوت‌تر از سایر ساختمان‌هاست. بنابراین انتخاب نرم‌افزاری مناسب با توانایی مناسب برای شبیه‌سازی خاک بسیار مهم است. اگرچه در این تحقیق، نرم‌افزار انرژی پلاس[۵] نسخه (۸-۱-۰) با توانایی شبیه‌سازی پوسته‌های همجوار



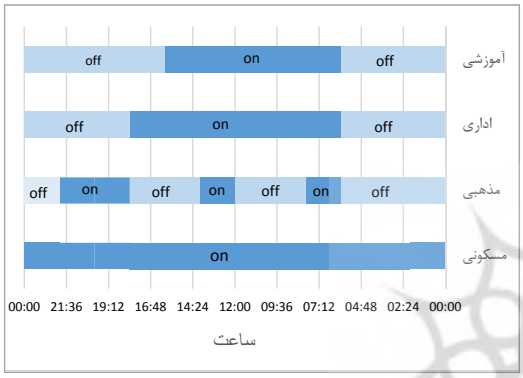
تصویر ۴. نمودار مقایسه دمای هوا و دمای عمق خاک شهر یزد (نگارندگان)

با خاک انتخاب شده است؛ اما به‌دلیل رفتار حرارتی متفاوت خاک، نحوه شبیه‌سازی ساختمان در جوار خاک مانند سایر ساختمان‌های روی سطح زمین نیست و نیاز به روشی مناسب دارد تا ویژگی خاک را برای ساختمان در روند شبیه‌سازی، عرضه کند. تحقیقات اخیر با آزمایش روش‌های مختلف، نحوه مناسب شبیه‌سازی ساختمان‌های خاک‌پناه را با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس سنجیده است (Barbaresi et al., 2014: 365).

با بهره‌گیری از مدل نمونه منتخب ۹۰۰ اشری و مشخص‌شدن شرایط ثابت خاک پیرامون بنا، می‌توان محیط خاکی جوانب ساختمان را برای نرم‌افزار انرژی پلاس تعریف نمود و انتقال حرارت آن را به‌دقت بررسی کرد. جهت انجام شبیه‌سازی، با فرض ثابت‌ماندن ویژگی‌های حرارتی پوسته نمونه، عمق خاک پیرامون مدل تغییر داده می‌شود. سپس با افزایش تدریجی عمق خاک بر روی مدل، شرایط حرارتی بنا در گام‌های نیم‌متری بررسی می‌گردد (تصویر ۷). در این شرایط میزان نرخ تهویه مدل برابر ۰٫۵ و دمای مبنای آسایش برای راه‌اندازی دستگاه‌های مکانیکی براساس استاندارد اشری، بین ۲۱ تا ۲۸ درنظر گرفته شده است.



تصویر ۵. مدل هندسی پیشنهادشده نمونه منتخب ۹۰۰ اشری
(Judkoff, 2009: 43)



تصویر ۶. نمودار برنامه زمانی استفاده از کاربری‌ها (نگارندگان)

جدول ۲. شرایط فیزیکی و کاربری مدل موردنظر

کاربری	سطح زیر بنا(m^2)	تعداد افراد	سطح زیر بنا به‌ازای هر فرد	مصرف الکتریسیته دستگاه ها (W)
اداری	۴۸	۴	۱۲	۴۲۰
کلاس درس	۴۸	۲۵	۱٫۸۵	۴۰۰
مذهبی	۴۸	۴۸	۱	۱۰۰۰
مسکونی	۴۸	۴	۱۲	۲۰۰

(نگارندگان)

جدول ۳. مصالح مدل موردمطالعه- نمونه منتخب ۹۰۰ اشری (مطابق ویژگی خاک منطقه موردمطالعه)

عناصر	مصالح	عامل هدایت حرارتی (W/m.K)	ضخامت (m)	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.K)
بدنه	بتن مسلح	۲٫۱۵	۰٫۲۵	۱۴۰۰	۱۰۰۰
	گچ	۰٫۱۶	۰٫۰۲		
کف و سقف	دال بتنی	۲٫۱۵	۰٫۲	۱۴۰۰	۱۰۰۰
پنجره دوجداره	شیشه	۱٫۰۶	۰٫۰۰۳۱۷		
	هوا		۰٫۰۱۳		
خاک*		۱٫۵		۱۹۲۵	۹۰۰

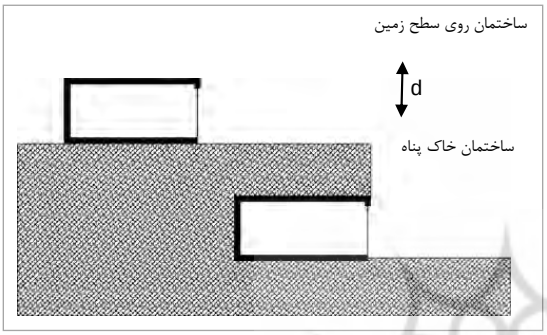
(نگارندگان)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

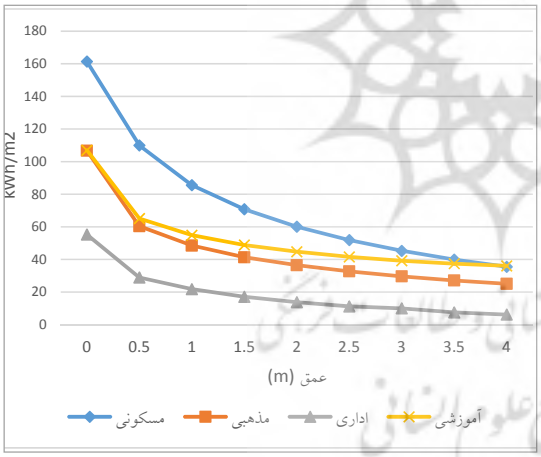
از مسائل مهمی که در رابطه با ساختمان‌های خاک‌پناه مطرح می‌گردد، کاربری‌های مختلفی است که به این سبک ساختمانی برپا می‌گردند. در ایران، نمونه‌های کاربری مختلفی به‌صورت زیرزمینی از گذشته تا کنون وجود داشته است، همچون مسجد آقابزرگ کرمان و تیمچه‌های گودال باغچه کاشان. به‌دلیل تفاوت زمان استفاده کاربران از فضا و همچنین تغییر میزان دریافت درونی، کاربری‌های مختلف از لحاظ حرارتی رفتار متفاوتی را نشان می‌دهند.

بنابر محدودیت کاربری‌های سازگار با ایده ساخت خاک‌پناه و باتوجه‌به حجم نمونه موردمطالعه (۴۸ *۲,۷ متر مکعب)، چهار کاربری: مسکونی، آموزشی، اداری و مذهبی که از لحاظ کاربرد گستردگی بیشتری داشتند، جهت مطالعه رفتار حرارتی انتخاب شدند. با شبیه‌سازی مدل موردمطالعه در شرایط اقلیمی یکسان، برای کاربری‌های مختلف شرایط متفاوتی از لحاظ حرارتی پیش‌بینی می‌شود. با به‌دست‌آمدن نتایج شبیه‌سازی مدل مذکور با شرایط کاربری متفاوت، میزان مصرف انرژی هریک از کاربری‌ها با افزایش عمق خاک، روبه کاهش می‌رود. در این شرایط کاربری اداری کمترین و کاربری مسکونی بالاترین حجم مصرف انرژی را دارد. همچنین طبق تصویر ۸، هریک از کاربری‌ها در یک عمق مشخص به مقدار تقریباً ثابتی از درصد صرفه‌جویی انرژی می‌رسند. به‌عبارت دیگر در عمق مشخص، میزان تفاوت کاهش مصرف انرژی به مقدار کم (کمتر از 6 kWh/m^2) و تقریباً ثابت می‌رسد. کاهش این میزان صرفه‌جویی که با هزینه خاک‌برداری مضاعف همراه است، مقرون به صرفه نیست و این نقطه می‌تواند به‌عنوان عمق مناسب برای قرارگیری کاربری محسوب گردد. این عمق برای هر کاربری مقداری متفاوت است. بنابر این نتایج، کاربری مسکونی در عمق ۲,۵ و کاربری مذهبی، اداری و آموزشی به‌ترتیب در عمق‌های ۱,۵ ، ۱ و ۱,۵ متر، به بهینه‌ترین حالت خود از لحاظ حراتی می‌رسد.

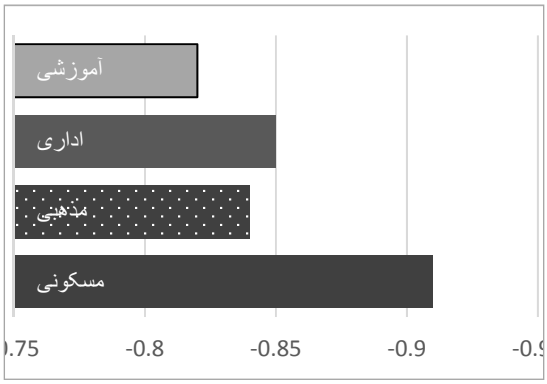
برای روشن‌ترشدن چگونگی میزان ارتباط میان مصرف انرژی و کاربری‌های مختلف در نمونه ساختمان خاک‌پناه، از تحلیل آماری کمک گرفته‌ایم. با بررسی همبستگی بین این دو متغیر از آزمون پیرسون استفاده شد. نتایج تست همبستگی مدل‌های موردنظر از سطح معناداری برخوردار بود. بنابراین انجام این تست صحیح بود و میزان ضرایب همبستگی میان دو متغیر با رابطه قوی و معکوس، در تصویر ۹ گزارش شد. طبق این نمودار با افزایش عمق ساختمان، بیشترین میزان همبستگی مصرف انرژی و نوع کاربری، مربوط به ساختمان مسکونی است. این موضوع نشان می‌دهد که با هر گام افزایش عمق، بیشترین تغییر مصرف انرژی در کاربری مسکونی رخ می‌دهد. ازآنجایی که این نوع کاربری به‌صورت شبانه‌روزی مورداستفاده قرار می‌گیرد، این پیش‌بینی چندان دور از انتظار نیست. پس از کاربری مسکونی، کاربری اداری با ساختار خاک‌پناه بیشترین همبستگی را با مصرف انرژی به‌ازای افزایش عمق خاک دارد. در این میان، کاربری آموزشی کمترین میزان همبستگی را نسبت به سایر کاربری‌ها داشت. با بررسی تغییر میزان همبستگی مصرف انرژی در کاربری‌های مختلف خاک‌پناه مشهود است که با شرایط یکسان پوسته فیزیکی و حجم



تصویر ۷. نمونه‌های مدل‌شده در هشت عمق مختلف در زیر خاک‌رسی منطقه یزد d (m) = 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 2.5 , 3 (نگارندگان)



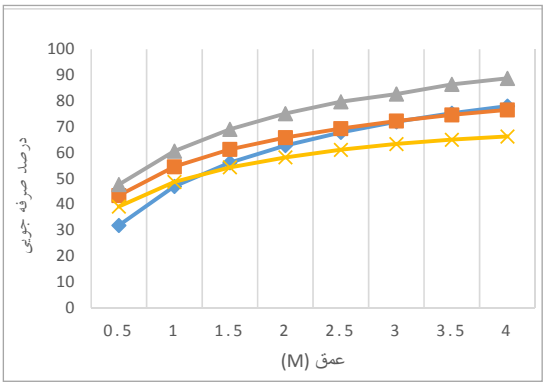
تصویر ۸. میزان مصرف انرژی کاربری‌های متفاوت (نگارندگان)



تصویر ۹. نمودار میزان همبستگی کاربری‌های مختلف با میزان مصرف انرژی به‌ازای افزایش عمق خاک (نگارندگان)

ساختمان، آنچه رفتار حرارتی را در واکنش با محیط خاکی پیرامون متأثر خود کرده است، میزان دریافت داخلی است.

تصویر ۱۰ نیز نشان می‌دهد، به‌ازای افزایش عمق خاک، شیب درصد صرفه‌جویی کاربری‌های مختلف نسبت به نمونه ساختمانی بر روی سطح زمین، با یکدیگر متفاوت است. این موضوع، نشان‌دهنده آن است که میزان صرفه‌جویی هر کاربری در هر عمق مشخص، متفاوت است. در این شرایط کاربری اداری در هر عمق، بالاترین درصد صرفه‌جویی را دارد. این موضوع قابلیت بالای این کاربری، برای ساخته‌شدن به‌صورت گونه خاک‌پناه را نشان می‌دهد.



تصویر ۱۰. نمودار درصد صرفه‌جویی کاربری‌های خاک‌پناه در اعماق مختلف به نسبت ساختمان مشابه روی سطح زمین (نگارندگان)

نتیجه‌گیری

در بحث عملکرد حرارتی ساختمان‌های خاک‌پناه، بررسی عامل نوع کاربری از آن جهت اهمیت دارد که تغییر میزان دریافت داخلی، میزان مصرف انرژی را نیز تغییر می‌دهد. بنابراین امکان دارد که ایده قرارگرفتن ساختمان در میان توده خاک برای برخی ساختمان‌ها چندان مقرون به صرفه نباشد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، افزایش عمق فروروی برای ساختمان‌های مختلف، کاهش مصرف انرژی را به همراه دارد. میزان کاهش مصرف انرژی به‌ازای افزایش عمق یکسان، برای هر کاربری میزانی متفاوت است. در این شرایط با افزایش عمق فرورفتن ساختمان در نمونه شهر یزد، کاربری مسکونی بیشترین و کاربری آموزشی کمترین میزان همبستگی را با مصرف انرژی دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش عمق قرارگیری ساختمان در میان خاک، کاربری مسکونی بیشترین و کاربری آموزشی کمترین میزان تغییر مصرف انرژی را در پی خواهند داشت. همچنین، حداکثر عمق بهینه برای هر کاربری مقداری متفاوت است. کاربری مسکونی در عمق ۲٫۵ و کاربری مذهبی، اداری و آموزشی به‌ترتیب در عمق‌های ۱٫۵ ، ۱ و ۱٫۵ متر به بهینه‌ترین حالت خود از لحاظ حرارتی می‌رسند. در این شرایط، کاربری مسکونی ۶۹ درصد و کاربری مذهبی، اداری و آموزشی به‌ترتیب ۶۱ ، ۶۰ و ۵۴ درصد صرفه‌جویی انرژی را خواهند داشت. قابل‌ذکر است که کاربری اداری در هر عمقی بیشترین درصد صرفه‌جویی را خواهد داشت.

کاهش چشمگیر مصرف انرژی در ساختمان خاک‌پناه، این‌گونه ساختمان را می‌تواند به‌عنوان ایده‌ای مناسب دربرابر سختی‌های آب و هوایی و چالش‌های بحران انرژی، مطرح گرداند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در هر شرایطی و با هر نوع کاربری، ایده ساختمان خاک‌پناه می‌تواند در زمینه کاهش انرژی توصیه گردد. لازم است یادآوری شود، برای ساخت ساختمان در عمق خاک، یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری هزینه ساخت است که در مقاله حاضر به آن پرداخته نشده است. باتوجه‌به تجربه‌های به‌دست‌آمده در روند مطالعه‌مقاله حاضر، آنچه در پژوهش‌های آتی باید دنبال گردد، یافتن نرخ تهویه مناسب برای هر کاربری در شرایط ایده خاک‌پناه است. چراکه تغییر در میزان دریافت درونی، شرایط آسایش از نظر میزان تهویه را زیر سؤال می‌برد. همچنین درمجموع باید تمامی این عوامل و هزینه‌های کاهش نرخ انرژی، در کنار هزینه ساخت مقایسه و تحلیل گردند.

پی‌نوشت

۱. مرکز تجاری، Canary WarfTube در لندن.

۲. فهرست علائم

	(دمای خاک در عمق و زمان مورد نظر)	A_s	دامنه‌ی موج دمای هوا
d	عمق خاک از سطح زمین (m)	A	ضریب نفوذ گرمایی خاک (day/m^2)
t_m	(میانگین سالانه‌ی دمای زمین)	λ_s	ضریب هدایت حرارتی خاک (W/m)
T	شماره‌ی روز موردنظر از اول ژانویه	ρ_s	جرم حجمی خاک (kg/m^3)
t_0	شماره روز سردترین روز سال از اول ژانویه	W	درصد رطوبت

3. Best Case 900 ASHRAE
4. ASHRAE Standard
5. EnergyPlusV80-1-

منابع و مـآخذ

- Al-Mumin, A. A. (2001). Suitability of Sunken Courtyards in the Desert Climate of Kuwait. **Energy and Buildings**. 33(2), 103- 111.
- Al-Neama, B. H. A. (2011). **Energy Performance of Earth Sheltered Spaces in Hot-Arid Regions** (Master's thesis). The British University in Dubai.
- Al-Temeemi, A. A. & Harris, D. J. (2001). The Generation of Subsurface Temperature Profiles for Kuwait. **Energy and Buildings**. 33(8), 837-841.
- Al-Temeemi, A. A. & Harris, D. J. (2004). A Guideline for Assessing the Suitability of Earth Sheltered Mass-Housing in Hot-Arid Climates. **Energy and Buildings**. 36(3), 251–260.
- Anselm, A. J. (2008). Passive Annual Heat Storage Principles in Earth Sheltered Housing, A Supplementary Energy Saving System in Residential Housing. **Energy and Buildings**. 40(7), 1214-1219.
- Barbaresi, A.; Torreggiani, D.; Benni, S. & Tassinari, P. (2014). Underground Cellar Thermal Simulation: Definition of a Method for Modelling Performance Assessment Based on Experimental Calibration. **Energy and Buildings**. 76, 363–372.
- Bonan, G. B. (2002). **Ecological Climatology: Concepts and Applications**. New York: Cambridge University Press.
- Carmody, J.; Olivier, H. & Sterling, R. (1994). Life Safety in Large Underground Building: Principles and Examples. **Tunneling and Underground Space Technology**, 9(1), 19–29.
- Carmody, J. & Sterling, R. (1993). Und**erground Space Design**. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Golany, G. (1983). **Earth-Sheltered Habitat; History, Architecture & Urban Design**. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Jacovides, C. P.; Mihalakakou, G.; Santamouris, M. & Lewis, J. O. (1996). On the Ground

Temperature Profile for Passive Cooling Applications in Buildings. **Solar Energy**, 57(3), 167–175.
- Judkoff, R. & Neymark, J. (2009). **International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method**. Colorado: National Laboratory of U.S. Department of Energy.
- Khair-el-Din, A. M. (1991). Earth Sheltered Housing: An Approach to Energy Conservation in Hot Arid Areas. **Architecture and Planning**, 3, 3-18.
- Kumara, R.; Sachdevab, S. & Kaushik, S. C. (2007). Dynamic Earth-Contact Building: A Sustainable Low-Energy Technology. **Building and Environment**, 42(6), 2450–2460.
- Labs, K. (1979). Underground Building Climate. **Solar Age**, 4, 44-50.
- van Dronkelaar, C. (2013). **Underground Buildings - Potential in Terms of Energy Reduction** (Master's thesis). Eindhoven University of Technology.
- van Dronkelaar, C.; Cóstola, D.; Mangkuto, R. A. & Hensen, J. L. M. (2014). Heating and Cooling Energy Demand in Underground Buildings: Potential for Saving in Various Climates and Functions. **Energy and Buildings**, Vol. 4, pp. 44-50.
- URL 1: www.arabella.co.za (access date: 20/08/2014)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Received: 2015/06/16
Accepted: 2015/10/17

Investigating the Effect of Energy Efficiency for the Earth-Sheltered Buildings in Different Uses (Case Study: Hot-arid Climate of Yazd)

Nazanin Nasrollahi[*] Fatemeh Akrami Abarghuie[**]

Abstract

The growing process of building design and construction, regardless of reducing sources of energy, is one of the threats to the environment and human life. Therefore it is necessary that design strategies in new buildings be orientated to the aim of reducing energy consumption and environmental pollution. Earth sheltering is a passive idea that reduces building energy consumption and ensures its thermal comfort to a great deal. Taking shelter in the earth and advantage from its thermal properties is one of the tricks that even was used in some climates in the past. This study investigates the energy efficiency of Earth-sheltered building with regard to the interaction of different building uses in the city of Yazd. The thermal simulation software (EnergyPlus) was applied to accomplish this aim, following the study of the basic requirements of a specific research on this subject. Regarding the results, increasing in the depth of penetration in the soil, increases the percentage of savings compared to aboveground conventional buildings. In this condition, with increase in the depth of building position, residential use has the most and educational use has the lowest correlation with energy consumption. And also the optimum depth for each building use is assessed at a different rate. In this situation, residential use has 69% and religious, administrative and educational uses respectively have 61, 60 and 54 percent energy savings.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Keywords: Earth sheltering, energy saving, thermal comfort, moderate temperature, thermal performance, buildings use, energy efficiency.

[*] Assistant Professor, Department of Architecture, University of Ilam.
[**] M.A. in Energy and Architecture, Department of Architecture, University of Ilam.