نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۹- شماره‌ی ۲/تابستان ۱۳۹۹

بررسی میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی مسکن زمین‌پناه در مقایسه با مدل مستقر بر سطح زمین (مطالعه موردی: شهر شیراز)

پژوهشی

علی اقتداری[۱]؛ طاهره نصر[۲*]؛ خسرو موحد[۳]؛ زهرا برزگر مروستی[۴]

۱- دانشجوی دکتری؛ گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، *Alieghtedari57@yahoo.com*

۲- استادیار؛ گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، *Nasr@iaushiraz.ac.ir*

۳- دانشیار؛ گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، *khm@iaushiraz.ac.ir*

۴- استادیار مدعو، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، *Zahrabarzegar86@yahoo.com*

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۱۲/۰۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶
شماره صفحات: ۱۸۵ تا ۲۰۶
شناسه دیجیتال (*DOI*): *10.22044/tuse.2020.5547.1308*

واژگان کلیدی
کاهش مصرف انرژی
آسایش حرارتی
توسعه پایدار
ساختمان زمین‌پناه
دمای خاک
شبیه‌سازی حرارتی

چکیده

در اغلب کشورها ساختمان‌ها مسوول حداقل ۴۰ درصد مصرف کل انرژی هستند و این مقدار در کشورهای در حال توسعه باز هم در حال افزایش است، در عین حال رسیدن به آسایش حرارتی در مناطقی با اقلیم گرم و خشک بدون استفاده از دستگاه‌های مکانیکی، بسیار دشوار است و استفاده از تکنیک‌های طراحی غیرفعال، کمک قابل توجهی به کاهش مصرف انرژی می‌کند. یکی از روش‌های کاهش کل انرژی موردنیاز، جایگزینی ساختمان‌های زمین‌پناه با ساختمان‌های معمولی بالای سطح زمین است. در این پژوهش با هدف بررسی عملکرد حرارتی بنای زمین‌پناه، میزان مصرف انرژی در یک مدل ساختمانی زمین‌پناه در اعماق متفاوتی از خاک در مقایسه با ساختمانی مستقر بر سطح زمین، مورد بررسی قرار گرفت و بدین منظور، ابتدا مدل‌سازی با نرم‌افزار اسکچاپ انجام شد، سپس دمای خاک در شهر شیراز در اعماق متفاوت با استفاده از فرمول مربوطه و اطلاعات آب و هوایی از نرم‌افزار متئونرم برای ورود به نرم‌افزار انرژی‌پلاس استخراج گردید و در نهایت شبیه‌سازی حرارتی با نرم‌افزار انرژی‌پلاس صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که میزان صرفه‌جویی در مصرف سالیانه انرژی به‌ترتیب برای بارهای سرمایشی و گرمایشی برای ساختمان مستقر در عمق ۶ متری زمین به‌عنوان عمق بهینه، حدود ۵۰ درصد و ۲۰ درصد بیشتر از ساختمان مستقر بر سطح زمین است و برای ساختمانی در همین عمق خاک، مجموع انرژی سالیانه مصرفی در زمینه سرمایش و گرمایش ۴۰ درصد کمتر از ساختمان روی سطح زمین است.

۱- مقدمه

در طول پنجاه سال گذشته، جهان افزایش بی‌سابقه‌ای را در رشد جمعیت تجربه کرده است. از طرفی گرمایش جهانی چالش جدیدی را در زندگی بشریت ایجاد نموده است و به‌طور روزافزون توجه ما را به کاهش استفاده از انرژی‌های تجدید ناپذیر و کاهش تولید دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی جلب می‌نماید (*Saqaff, et al., 2016*). تغییرات جمعیتی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در فرآیند توسعه و البته مصرف انرژی شناخته می‌شوند (*Delangizaan, et al., 1394*). بررسی‌ها در سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که ساختمان‌ها، تولید حدود نوزده درصد کل گازهای گلخانه‌ای را بر عهده داشته و سی و دو درصد انرژی

* نویسنده مسوول؛ شیراز؛ کیلومتر ۵ شهر صدرا؛ پردیس دانشگاه آزاد اسلامی شیراز؛ کدپستی ۷۴۷۳۱-۷۱۹۸۷؛ تلفن: ۰۷۱۳۶۴۱۲۷۱۶؛ دورنگار: ۰۷۱۳۶۴۱۲۴۸۷

مصرفی کل سالیانه نیز مربوط به این بخش بوده است (*Van Dronkelaar, 2013*). در دهه گذشته مصرف انرژی در بخش خانگی، عمومی و تجاری رشدی معادل ۶ درصد داشته که این میزان تنها برای زیربخش خانگی معادل ۶/۲ درصد بوده است و بیشترین مصرف این بخش مربوط به مصرف وسایل گرمایشی، سرمایشی و پخت و پز است (*Gholizadeh & Baraati, 1390*). کاهش مصرف انرژی و تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر دو رکن اصلی برای رسیدن به ساختمانی با مصرف انرژی پایین است که بخش عمده‌ای از کار وابسته به طراحی معماری صحیح ساختمان است؛ لذا با طراحی معماری صحیح و به‌کار گرفتن حداکثر پتانسیل‌های اقلیمی، می‌توان مصرف انرژی ساختمان در زمینه سرمایش، گرمایش و روشنایی را به کمترین میزان خود رساند. این مساله بشر را بر آن داشت که به سوی ایجاد سکونتگاه‌هایی هماهنگ با طبیعت و مصرف کم انرژی پیش برود (*El-Hamid & Khair-El-Din, 1991*). استفاده از فضاهای زمین‌پناه در دنیا به‌صورت مداوم رو به افزایش بوده که قیمت بالای زمین در شهرها و پیشرفت‌های تکنولوژیک در زمینه حفاری از دلایل عمده آن می‌باشند. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ حدود ۶۶ درصد از جمعیت مردم جهان در مناطق شهری زندگی خواهند کرد و این پدیده، افزایش تراکم شهری و استفاده از فضاهای زیرزمینی را با خود به همراه خواهد داشت (*Soh, et al., 2016*). فضاهای زمین‌پناه، فرصت‌های جدیدی را در اختیار طراحان و سازندگان قرار می‌دهند و به‌دلیل مزایای بی‌شمار مورد استقبال فراوانی قرار گرفته‌اند. پذیرش زندگی در چنین فضاهایی، چیزی ورای تامین یک سرپناه است و امتیازات بی‌شماری را به همراه دارد. از جمله صرفه‌جویی در مصرف انرژی، حفاظت از کیفیات زیبایی شناسانه و تاریخی منطقه، حداقل دخل و تصرف در سایت، آزاد ماندن سطح زمین و حفاظت بیشتر در برابر بلایای طبیعی مانند بادهای تند، گردباد و طوفان (*Benardos, et al., 2014*). این نوع معماری با رویکردهای کلی مصرف کم انرژی برای ایجاد دمای آسایش، پتانسیل خوبی برای قدم برداشتن در راستای معماری سبز دارد و همین مساله بر اهمیت پژوهش و تحقیق در حوزه الزامات و توصیه‌های مفید برای دستیابی به طراحی اصولی آن‌ها با تکیه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی و شناخت عمیق‌تر ویژگی‌های متفاوت آن‌ها می‌افزاید.

۱-۱- معماری زمین‌پناه

ماهیت این‌گونه ساختمانی، بنایی است که برای بهره‌گیری از طبیعت و تامین مقاصد خود به دل زمین و خاک فرو می‌رود. استفاده از نام خاک‌پناه یا زمین‌پناه، لزوما به این معنا نیست که ساختمان بایستی در زیرزمین احداث گردد، بلکه زاییده نحوه ارتباط او با محیط پیرامونش است. به‌عبارت دیگر، ساختمان خاک‌پناه، همان سازه معمول و رایج خود را دارد با این تفاوت که بخشی یا تمام پوسته آن با لایه ضخیمی از خاک پوشیده می‌شود (*Nasrollahi & Akrami, 1395*). یک ساختمان می‌تواند زمین‌پناه توصیف شود، چنان که سطح بیرونی آن در تماس با حجم مناسبی از خاک بوده و سهمی قابل توجه در بازده حرارتی ساختمان داشته باشد. تنوع طرح‌های زمین‌پناه ساخته شده در دنیا، از گذشته تاکنون آن چنان زیاد است که به راستی نمی‌توان یک دسته‌بندی دقیق و مشخص ارایه داد؛ اما شباهت‌های موجود در آنان از لحاظ ظاهری می‌تواند استنتاجی را به همراه داشته باشد که در آن پناه گرفتن در زمین به سه طریق انجام می‌شود: فرورفتن ساختمان در زمین حفاری شده، ایجاد خاکریز در اطراف ساختمان و پناه گرفتن ساختمان در دامنه یک کوه یا تپه (*Saqaff, et al., 2016*).

ساختار زیرزمینی کاملا فرورفته در زمین (آتریوم): الگوی آتریوم *(Atrium)* و یا حیاط مرکزی، گونه‌ای است که در آن ساختار کلی زیرسطح زمین ساخته می‌شوند و دیوارهای اطراف و سقف کاملا با خاک پوشیده شده‌اند. فضاها در اطراف یک حیاط یا پاسیو مرکزی سازماندهی می‌شوند و آتریوم امکان نوررسانی، چشم‌انداز، دسترسی و تهویه را برای کلیه فضاهای اطرافش را فراهم می‌سازد (*Al-Temeemi & Harris, 2004*). یک طرح آتریوم‌دار یا حیاط مرکزی بیشتر برای یک زمین مسطح مناسب است (*El-Hamid & Khair-El-Din, 1991*) **(شکل ۱، حالت الف)**.

ساخت درون شیب دامنه کوه یا تپه: در این تکنیک خانه در شیب، دامنه کوه یا تپه قرار می‌گیرد. در این نوع از معماری زمین‌پناه، معمولا تنها یک دیوار نمایان برای دسترسی به نور طبیعی و چشم‌انداز وجود دارد و سایر دیوارها درون شیب کوه یا تپه مدفون است. جبهه نمادار

معمولا در سمتی از تپه است که به سمت استوا است (جنوب در نیم‌کره شمالی و شمال در نیم‌کره جنوبی). **(شکل ۱، حالت ب)**.

ساخت به صورت تپه – خاکریز *(Bermed Type)*: این گونه بر سطح زمین یا عمق کمی از خاک ساخته می‌شود و خاک در پشت دیوارهای خارجی انباشته و به سمت اطراف خانه شیب‌بندی می‌شود. بام ممکن است، به‌طور کامل با خاک پوشانده شده و یا آزاد بماند و پنجره‌ها و بازشوها می‌توانند در یک یا چند سمت ساختمان در نظر گرفته شوند. از آنجا که ساختمان در بالای زمین قرار می‌گیرد، در معرض مشکلات کمتری از نظر رطوبت نسبت به ساختارهای کاملا زیرزمینی است **(شکل ۱، حالت پ)**.

الف) حالت آتریوم‌دار ب) مستقر در دامنه کوه پ) حالت تپه- خاکریز

شکل ۱- طبقه‌بندی کلی خانه‌های زمین‌پناه (*Saqaff, et al., 2016*)

میراث به جا مانده از طرح‌های زمین‌پناه، تقریبا در همه جای جهان دیده می‌شود. دهکده ماتما *(Matma)* در تونس، منطقه کاپادوکیا (*Cappadocia*) در ترکیه، دهکده‌های گوادیکس (*Guadix*) در اسپانیا، ساسیدی مترا *(Sassi Di Matera)* در ایتالیا و خانه‌های زیرزمینی در منطقه سنتورینی *(Santorini)* کشور یونان، به‌عنوان نمونه‌های با ارزش مناطق مدیترانه‌ای در کنار نمونه‌های آسیایی از جمله خانه‌های غاری یائودونگ *(Yaodong)* در شمال چین و خانه‌های صخره‌ای منطقه کندوان و میمند در کشور ایران، همگی زنجیره وسیعی از جوامع زیرزمینی را در خود جای می‌دادند (*Benardos, et al., 2014*).

فضاهای زیرزمینی مکمل مسکن روسطحی، به‌عنوان بخشی از خانه با جنبه اقلیمی همواره در ایران کاربرد داشته است و در کنار آن گودال باغچه‌ها، شوادان‌ها، آب انبارها، سرداب و روستاهای دستکند زیرزمینی کندوان و میمند با قابلیت‌های طبیعی در سرمایش و حفاظت، نمونه‌هایی از کاربرد فضاهای زیرزمینی در تامین سرمایش، گرمایش و نگهداری مواد غذایی و کالا در شهرهای ایرانی است (*Imaani & Heydari, 1397*) که نمونه‌هایی از آن در **شکل ۲**، **شکل ۳** و **شکل ۴** نشان داده شده است. فضاهای زیرزمینی در تطابق با اصول معماری ایرانی و همچنین معماری سبز می‌باشند؛ لذا می‌توان آن‌ها را جزیی از معماری بوم‌گرای ایرانی نامید (*Khodabakhshiaan & Mofidi, 1391*). اکثر محققان بر این باورند که ساختمان‌های زمین‌پناه در مقایسه با ساختمان‌های متعارف ساخته شده بر سطح زمین، بارهای گرمایشی و سرمایشی مورد نیاز ساختمان را کاهش می‌دهند (*Al-Temeemi & Harris, 2004*) و امروزه نمونه‌هایی کاملا پیشرفته با تکنولوژی بالا و متناسب با نیازهای بشر ساخته شده است. زمین‌پناهی نیز همچون سایر روش‌های ساخت و ساز معایب و مزایایی دارد که در **جدول ۱**، ارایه شده است. فواید فضاهای زمین‌پناه بی‌شمارند و از جمله آن‌ها می‌توان به صرفه‌جویی فضایی، کاهش تراکم شهر، حمل و نقل کارآمد، افزایش فضاهای سبز بر سطح زمین، کاهش اصوات مزاحم، کاهش آلودگی هوا و ارتقا کیفی آن اشاره نمود. کاستی‌ها به لحاظ هزینه‌های اولیه برای احداث ساختمان‌های زیرزمینی، معمولا در مقایسه با هزینه‌های مصرف‌شده برای ساختمان‌های متعارف معادل خود، نقطه ضعفی برای این ساختمان‌ها محسوب می‌شود. این مساله به نوع کاربری و مکان بهینه ایجاد بنا بستگی دارد.

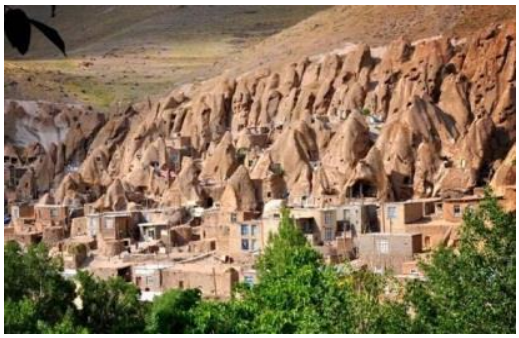
شرایط کار در محیطی محبوس، هزینه‌های جانبی مربوط به تامین زمین، نقاط دسترسی محدود برای انجام عملیات اجرایی، هزینه حفاری، حمل ضایعات و دفن خاک حفاری‌شده، هزینه‌های این پروژه‌ها را افزایش می‌دهد. از

طرفی بالاتر بودن هزینه‌های ساخت و ساز مساله‌ای قطعی نیست، چرا که افزایش هزینه‌ها در زمینه‌ی ساخت و ساز را می‌توان با کاهش هزینه‌ها در زمینه‌ای دیگر جبران کرد. برای مثال از آنجا که نیاز بار گرمایشی و سرمایشی یک ساختمان زمین‌پناه در مقایسه با مورد مشابه روی سطح زمین کمتر است، می‌توان سیستم‌های مکانیکی کوچک‌تر و ارزان‌تری تهیه کرد *(Al-Temeemi & Harris, 2004)*. استفاده از نور طبیعی، بهبود شرایط کیفی فضا را میسر می‌سازد و تامین نور طبیعی در فضاهای زیرزمینی بسیار مهم‌تر از ساختمان‌های روی سطح زمین می‌باشند. عدم وجود پنجره، تاریکی، انزوا، کمبود حس انگیزش، عدم تنوع، قطع ارتباط با سطح زمین به‌عنوان عمده‌ترین معایب فضاهای زیرزمینی در نظر گرفته می‌شوند، اما تامین نور طبیعی در آن‌ها می‌تواند با نمایش حرکت آرام و تدریجی خورشید، تغییر شدت نور، آگاهی از زمان و شرایط جوی، احساس رضایت‌مندی را تقویت کند. راه‌حل‌های متعددی در زمینه نوررسانی به فضاهای زیرزمینی وجود دارند. به‌عنوان مثال، استفاده از نورگیرهای سقفی و یا لوله‌های نوری گزینه‌های مناسبی برای ارسال نور طبیعی مطلوب، بدون خیرگی و بدون اثرات گرمایشی به عمق زمین هستند. ساخت مسکن زمین‌پناه اغلب در ساخت خانه‌های انفرادی و کوچک مقیاس خلاصه می‌شود، اما قابلیت آن را دارد که در مقیاس وسیع‌تر برای ساخت مجموعه‌های مسکونی نیز در نظر گرفته شود و در صورت توجه جدی به آن، در آینده می‌توان به ساختارهایی پایدار به لحاظ مصرف اندک انرژی و منطبق با میراث فرهنگی هر منطقه دست یافت.

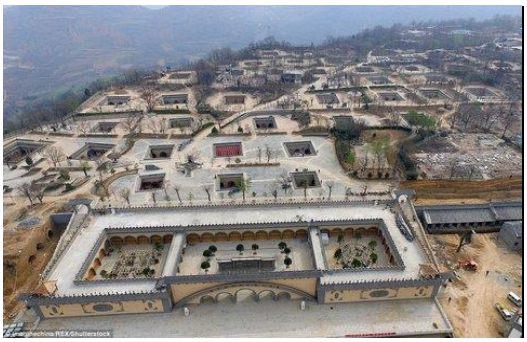
۱-۲- عملکرد حرارتی بناهای زمین‌پناه

جایگزینی فضاهای زیرزمینی به جای بناسازی روی سطح زمین، از جمله راه‌حل‌هایی است که به‌منظور کاهش مصرف سالیانه انرژی در ساختمان‌ها پیشنهاد می‌شود. بناهای زیرزمینی با استفاده از مزایایی با ارزش چون ثبات نسبی دمای خاک و پوشش ضخیم لایه زمین به‌عنوان عایق از پتانسیل بالایی برای کاهش مصرف انرژی در مقایسه با بناهایی که بر سطح زمین ساخته می‌شوند برخوردارند، اما بالعکس ساختمان‌های مستقر بر سطح زمین با قرارداشتن در معرض تغییرات دما و شرایط جوی در فصول مختلف، نیازمند مصرف انرژی بیشتری می‌باشند. توانایی ذخیره‌سازی حرارتی فصلی خاک که دارای تاخیر دما نسبت به درجه حرارت در فضای باز است، خاک را قادر می‌سازد، اثر خنک‌کننده‌ای در هوای گرم تابستان داشته باشد و در زمستان بالعکس. مستقل بودن از شرایط جوی از محاسن این سامانه بوده و در مناطقی کاربرد دارد که دارای اختلاف دمای تابستانی و زمستانی زیادی باشند. با پایین رفتن در عمق زمین (بیش از ۶ متر)، دمای خاک به دمای سالانه منطقه نزدیک شده و همین امر موجب آن می‌شود که این دمای ثابت، در تابستان خنک‌تر و در زمستان گرم‌تر از متوسط دمای هوا باشد (*Ghiabakloo, 1393*).

شکل ۲-گودال باغچه خانه پیرنیا، نائین



شکل ۳- خانه‌های غاری، روستای کندوان



شکل ۴- خانه‌های زیرزمینی، کشور چین

جدول ۱- مزایا و معایب فضاهای زیرزمینی

(Ming, et al., 2014; Carmody & Sterling, 1993; Molaii, 1391; Van Dronkelaar, 2014)

موضوع	دسته‌بندی	امتیازات بالقوه	اشکالات بالقوه
بعد روان‌شناختی و فیزیولوژیک	روان‌شناسی	احساس آسایش حرارتی در شرایط آب و هوایی نامساعد (حس خنکی در اقلیم گرم و خشک)، احساس امنیت	کمبود امکان جهت‌یابی فضایی، القاء واکنش‌های مربوط به مرگ و تدفین، حس گیرافتادن و یا سقوط، کاهش پذیرش عمومی، القاء حس ترس از اقامت در فضاهای بسته و بدون روزن، انزوای اقلیمی
	فیزیولوژیک	جدا بودن از لرزش و صداهای مزاحم موجود در سطح زمین، ثبات دمای داخلی	کمبود نور طبیعی و چشم‌انداز، دشواری استفاده برای معلولان، کودکان و سالخوردگان، کمبود هوای تازه و آلودگی هوای داخل، وجود رطوبت بالا و ایجاد میعان، تجمع بیش از اندازه گاز رادون
انرژی	مصرف انرژی	کاهش انتقال حرارت (از محیط بیرون) ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی ثبات دمای زمین کنترل ورود و خروج هوا کاهش گرمای دریافتی	کمبود اطلاعات در دسترس پیرامون نقش و عملکرد انرژی، نیاز به تهویه بیشتر، کمبود دمای مفید زمین در رابطه با محاسبات انتقال حرارت، تاخیر حرارتی بالا در برخی موارد، مشکلات گرمایشی- سرمایشی
بهره‌وری از زمین	موقعیت محلی	حداقل تاثیر بصری و هماهنگی بهتر با محوطه اطراف، محافظت از سطح زمین، استفاده مناسب از زمین، حفظ مناظر طبیعی، اکولوژی طبیعی و زیستگاه‌های گیاهی و جانوری	شرایط نامناسب زمین‌شناختی، کاهش توجه به مساله زیبایی‌شناختی (عدم وجود نمای خارجی)، مشکلات خدمات رسانی و تغییر کاربری.
	حفاظت	ایجاد امنیت، دسترسی محدود، مراقبت در برابر آتش، حفاظت از شرایط آب و هوایی نامساعد، مراقبت در برابر بلایای طبیعی	تخریب محیط طبیعی زیرزمینی، تاثیر منفی بر باروری خاک، آلودگی آب‌های زیرزمینی
	طرح کلی	عدم تابعیت از توپوگرافی سطح زمین	محدودیت‌های دسترسی، مسایل مربوط به دفع آب‌های سطحی، انطباق‌پذیری، مشکلات تخلیه فاضلاب
چرخه عمر و هزینه‌ها	هزینه‌های مقدماتی	عدم نیاز به نماسازی بیرونی، فروش مواد حفاری شده، کاهش هزینه‌های تامین زمین، عدم نیاز به مهاربندی در پاره‌ای از موارد، عدم وابستگی به شرایط جوی	افزایش هزینه احداث سازه، هزینه گودبرداری و هزینه مسایل غیرمترقبه، محدودیت شرایط کاری، تاخیر در ساخت و ساز در اثر برخورد با مسائل غیرمترقبه
	هزینه‌های عملیاتی	کاهش هزینه‌های نگهداری بنا، دوام مواد و مصالح بنا و کاهش هزینه های بیمه	هزینه‌بری نوررسانی و تهویه، دسترسی سخت‌تر به تاسیسات برای تعمیر و تعویض، دسترسی دشوارتر برای کارکنان

صرفه‌جویی در مصرف انرژی در بناهای زمین‌پناه، تحت تاثیر فاکتورهای متعددی است که شامل مواردی چون، عملکرد ساختمان (میزان گرمای تولید شده داخلی و تعداد کاربران)، مواد و مصالح ساختمانی سازنده بنا، ابعاد

ساختمان، تیپولوژی، اقلیم، عمق فرو روندگی نسبت به سطح زمین، عایق‌بندی و میزان نفوذ هوا به داخل، میزان شفافیت بخش بیرون از خاک، ویژگی‌های حرارتی خاک، آب‌های سطحی، سیستم تهویه، ارتفاع از سطح دریا و سطح آب‌های زیرزمینی است (*Stanic & Nowak, 2011; Saqaff, et al., 2016*). به‌صورت کلی زندگی در بنای زمین‌پناه در مقایسه با روی زمین، دارای آسایش دمایی بیش‌تر و در نتیجه مصرف میزان کمتر انرژی است که این برتری در واقع به‌دلیل پایداری دمای خاک و ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی، کنترل نفوذ هوا، کاهش دریافت گرما و کاهش انتقال حرارت است (*Jafari, 1391*). این پژوهش در پی یافتن پاسخ به این سوال است که استفاده از الگوی مسکن زمین‌پناه در شهر شیراز تا چه اندازه می‌تواند در کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان نسبت به مدل مشابه خود بر سطح زمین تاثیرگذار باشد. در این پژوهش میزان صرفه‌جویی در مصرف بارهای گرمایشی و سرمایشی به‌عنوان متغیر وابسته و فاکتورهایی نظیر، ابعاد ساختمان، تیپولوژی، اقلیم، عمق فرو روندگی نسبت به سطح زمین، میزان نفوذ هوا به داخل، میزان شفافیت بنا و ویژگی‌های حرارتی خاک به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند.

۲- ادبیات موضوع

لزوم انجام تحقیقاتی جدی در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی در بناهای زمین‌پناه، محققان بی‌شماری را از گذشته تا حال، به خود جلب نموده و آن‌ها را بر آن داشته که با شناسایی فاکتورهای تاثیرگذار بر این مهم و اثبات مزیت‌های حرارتی این تکنیک ساختمان‌سازی به انجام آزمایش‌های تجربی، روش شبیه‌سازی و یا استفاده از معادلات انتقال حرارت بپردازند. در سال ۱۹۸۳، جان هایت *(John Hait)* در پژوهشی با طرح ایده ذخیره گرمای سالیانه غیرفعال خاک و اندازه‌گیری‌های متناوب دریافت که دمای خاک در عمق شش متری زمین تقریبا ثابت بوده و دمای آن به اندازه معدل دمای سالانه هوای بالای سطح زمین یعنی حدود ۲۱ درجه است (*Saqaff, et al., 2016*). از اولین پژوهش‌های شبیه‌سازی، بررسی پنج مدل مختلف ساختمان زمین‌پناه در شهر دهلی نو بود که نشان داد، عملکرد حرارتی بنا با ارتفاع فرورفتن در زمین رابطه‌ای مستقیم دارد و بیشترین مسیر اتلاف حرارت در این‌گونه ساختمان‌ها، گوشه‌های آن است که بهتر است عایق گردد (*Kumara, et al., 2007*). محققی دیگر به نام آنسلم، با استفاده از محاسبات تعیین میزان انتقال حرارت از خاک به بنای زمین‌پناه آتریوم‌دار، در دو حالت مختلف میزان پوشانندگی با خاک به میزان ۵۰ درصد و ۸۰ درصد، پرداخت و نتایج حاکی از آن بود که در حالت ۸۰ درصد پوشانندگی با خاک، فضای داخلی از آسایش حرارتی بهتری برخوردار است (*Anselm, 2008*). به‌منظور بررسی تهویه در فضاهای زیرزمینی، آمروس و همکارانش در پژوهشی خاص، به اندازه‌گیری دمای درونی یک انبار زیرزمینی نسبت به دمای بیرون و تاثیر تهویه طبیعی در روزهای گرم بر آن با تاکید بر ورودی و کانال تهویه پرداختند (*Amores, et al., 2011*). گرم در زمستان و خنک در تابستان، عنوان پژوهشی بود که لیو و همکارانش بر خانه‌های غاری چینی انجام دادند و در آن با استفاده از تئوری آسایش حرارتی و مکانیزم انتقال حرارت دوره‌ای از طریق دیوار به اندازه‌گیری دمای درونی، بیرونی و دمای سطوح داخلی خانه در فصول تابستان و زمستان پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که ضخامت دیواره‌های این خانه‌ها، به‌طور قابل ملاحظه‌ای موجب حفظ دمای سطوح داخلی می‌شود که علت اصلی گرم بودن آن‌ها در زمستان و سردی در تابستان است (*Liu, et al., 2011*). استانیک و نواک پژوهش‌گرانی هستند که به مطالعه تاثیر جنس خاک و ضخامت‌های متفاوت عایق‌های بدنه بر میزان انتقال حرارت بین خاک و بنای زمین‌پناه پرداختند. آن‌ها با تحقیقات خود دریافتند که عایق‌های با ضخامت کمتر، تاثیر بیشتری در خنکی هوای داخلی دارند (*Stanic & Nowak, 2011*). درونکلار نیز پژوهش‌گر دیگری است که در تحقیقی متفاوت، به میزان مصرف انرژی بین دوگونه ساختمانی زمین‌پناه و مستقر بر سطح زمین با کاربری‌های مختلف و در اقلیم‌های متنوع پرداخت (*Benardos, et al., 2014*). در زمینه تاثیر نور طبیعی بر ساختمان‌های زیرزمینی، شین و همکارانش طی پژوهشی که در سال ۲۰۱۱ انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که استفاده از لوله‌های نوری در فضاهای زیرزمینی، جایی که اغلب پنجره‌ها و نورگیرهای سقفی غیرکاربردی می‌شوند، می‌تواند روشنایی را بدون استفاده از نور مصنوعی

تامین کند و کاهش مصرف انرژی را به همراه داشته باشد (*Shin, et al., 2011*). با آن که تحقیقات مفصلی در اغلب کشورها در زمینه ساختمان‌سازی زمین‌پناه صورت گرفته، اما در کشور ایران با داشتن نمونه‌های غنی تاریخی و پتانسیلی بالا برای احداث انرژی، تنها تحقیقات اندکی وجود دارد که در ادامه برخی از آن‌ها در راستای صرفه‌جویی در مصرف انرژی شرح داده می‌شوند. قیابکلو، پژوهش‌گری است که بخشی از کتاب خود را تحت عنوان سرمایش غیرفعال، به موضوع زمین سرمایی اختصاص داده است (*Ghiabakloo, 1393*). آئین و همکارانش با هدف شناسایی آیتم‌های تاثیرگذار بر بهبود شرایط حرارتی و کاهش مصرف انرژی، در پژوهش خود به بررسی عملکرد حرارتی معماری صخره‌ای روستای کندوان پرداختند و در روند کار خود بر اساس مقایسه نتایج حاصل از ثبت وضعیت اقلیمی درونی با شرایط لازم برای ایجاد آسایش حرارتی و میزان انرژی مصرفی برای تعدیل شرایط حرارتی درونی، از دیتالاگر (*Data Logger*) و تکنیک شبیه‌سازی (*Simulation*) با نرم‌افزار انرژی‌پلاس (*Energy Plus*) استفاده کردند (*Ayien, et al., 1393*). نصراللهی و اکرمی محققانی هستند که در تحقیق خود، ساختمان خاک پناه را از نقطه نظر بهره‌وری انرژی با تاثیر متقابل کاربری‌های مختلف در شهر یزد با استفاده از شبیه‌سازی حرارتی به کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز حرارتی انرژی‌پلاس بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود، با افزایش عمق فرورفتن ساختمان در خاک، کاربری مسکونی بیشترین و کاربری آموزشی کمترین میزان همبستگی را با کاهش مصرف انرژی دارد و 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 (*Nasrollahi & Akrami, 1395*). عمادیان رضوی، محقق دیگری در زمینه زمین‌پناهی است که با هدف ارزیابی میزان اتلاف حرارت بناهای زمین‌پناه در مواقع سرد سال و مقایسه آن با بناهای رایج روی زمین با استفاده از روش محاسباتی، حالت‌های مختلف ارتباط با خاک در یک بنای زمین‌پناه در شهر یزد را مدل‌سازی نمود و از نظر اتلاف حرارت با بنای روی زمین در مواقع سرد سال مقایسه کرد. یافته‌های تحقیق او نشان داد که اتلاف حرارت مدل در پناه زمین با افزایش سطح تماس با خاک کاهش می‌یابد تا جایی که اتلاف حرارت در مدلی که از سه جبهه شمال، شرق و غرب در مجاورت با خاک است، حدود ۴۴ درصد مدل رایج روی زمین ارزیابی شد (*Emadian Razavi, 1397*). در پژوهشی دیگر مسعودی‌نژاد و همکارانش با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی، رفتار حرارتی و شرایط آسایش حرارتی سکونت‌گاه زیرزمینی (شوادان) را که به‌صورت گسترده در معماری بومی دزفول و شوشتر خوزستان استفاده شده را مورد آنالیز قرار دادند.

تحلیل *CFD (Computational FluidDynamics)* شوادان مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، براساس داده‌های شرایط مرزی به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شد و نتایج بیانگر وجود شرایط آسایش حرارتی در فصول مختلف در این فضا و ثبات میانگین دمای تابشی تحت تأثیر ظرفیت حرارتی جداره‌ها به‌خصوص در فصل گرم تابستان بود (*Masoodi Nejad, et al., 1397*). در نهایت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده، می‌توان به تحقیق ایمانی و حیدری اشاره کرد که در آن به شناسایی اصولی که باعث می‌شود، یک ساختمان زیرزمینی به‌عنوان یک سیستم ذخیره انرژی عمل کند، پرداخته و با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار انرژی‌پلاس، رفتار حرارتی یک مدل ساختمانی را در اعماق متفاوت زمین در سه اقلیم تهران، یزد و تبریز مقایسه نمودند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با توجه به پارامترهای خاک در نظر گرفته شده برای هر سه اقلیم، میزان صرفه جویی در مصرف انرژی در شهر یزد، بیشتر از تهران و تبریز بوده است و به‌طور کلی ساختمان‌های زیرزمینی در اقلیم گرم و خشک و در فصول گرم سال عملکرد بهتری دارند، تا جایی که بار سرمایشی را در بعضی از اعماق به صفر می‌رسانند (*Imani & Heydari, 1397*). بررسی‌ها نشان داد که کاستی‌های فراوانی در زمینه تحقیقات انجام شده بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های زمین‌پناه وجود دارد و انجام پژوهش‌هایی مرتبط با بهینه‌سازی مصرف انرژی چون، میزان عمق فرورفتن ساختمان در خاک، کاربری بنا، نور، تهویه، جنس مصالح مصرفی، جهت‌گیری اقلیمی، تیپولوژی و ترکیب بناهای زمین‌پناه با سیستم‌های فعال با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های منطقی، نیازمند توجهی جدی است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش با هدف بررسی عملکرد حرارتی بنای زمین‌پناه، میزان مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی در یک مدل ساختمانی در اعماق متفاوتی از خاک در مقایسه با ساختمانی مستقر بر سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت.

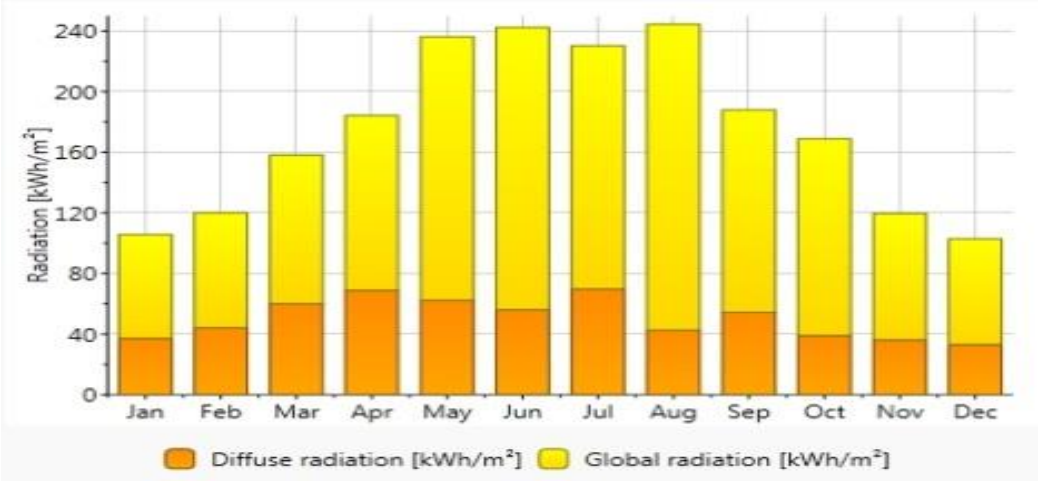
بدین منظور در گام اول پس از مراجعه به منابع مکتوب، مقالات علمی و پژوهش‌های انجام شده برای دستیابی به نگرشی کافی به ماهیت این نوع معماری و اطمینان از بدعت موضوع انتخابی، مراحل کلی کار پژوهش آغاز گردید. در گام دوم، اطلاعات اقلیمی منطقه با استفاده از داده‌های علمی نرم‌افزار متئونورم *(Meteonorm)* برای استفاده در انرژی‌پلاس برداشت شد. درگام سوم پژوهش، استخراج دمای خاک در شهر شیراز در اعماق متفاوت با استفاده از فرمول‌های مربوطه برای ورود به نرم‌افزار انرژی‌پلاس صورت پذیرفت. در گام‌های بعدی مدل‌سازی نمونه ساختمانی مورد مطالعه با نرم‌افزار اسکچاپ *(Sketchup)* نسخه ۲۰۱۷ انجام شد و در نهایت شبیه‌سازی حرارتی آن با نرم‌افزار انرژی‌پلاس نسخه ۲۰۱۱ صورت گرفت. در ساختمان‌های زیرزمینی عوامل متعددی، عملکرد حرارتی، نیازهای گرمایشی و سرمایشی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند که می‌توان به شرایط محیطی خارج ساختمان مانند اقلیم و نوع خاک اطراف ساختمان، عمق فروروی در زمین، نوع تعامل ساختمان با زمین، شکل ساختمان، جنس جداره‌های ساختمان یا مصالح ساختمانی به‌کار رفته و نوع کاربری ساختمان اشاره نمود که خود بر انرژی‌های دریافت شده داخل ساختمان اثر می‌گذارد (*Van Dronkelaar, et al., 2014*). از آن جا که میزان فروروی و نحوه تعامل ساختمان با زمین از مهم‌ترین و موثرترین متغیرهای تعیین عملکرد حرارتی در بناهای زمین‌پناه است، لذا در این پژوهش، مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی در گونه تپه- خاکریز به‌عنوان یکی از پر مخاطب‌ترین گونه‌های این تکنیک ساخت و ساز سبز، در شهر شیراز با اقلیم گرم و خشک و مستعد در توسعه معماری زمین‌پناه، مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور پی بردن به عملکرد حرارتی این ساختمان، همه شرایط به جز میزان عمق برای تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده تا صرفا به بررسی این عامل در میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های زمین‌پناه پرداخته شود. پژوهش به‌منظور آزمودن این فرضیه انجام شده است که مسکن زمین‌پناه در شهر شیراز در کاهش مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی ساختمان موفق عمل می‌کند. در روند انجام این پژوهش، از یک معادله ریاضی برای تخمین الگوی سالانه طولانی مدت تغییرات دمای خاک در اعماق مختلف زمین استفاده شده و سپس داده‌های به‌دست آمده از معادله، به همراه هندسه مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اسکچاپ نسخه ۲۰۱۷ به نرم‌افزار انرژی‌پلاس نسخه ۲۰۱۱ منتقل گردید و در نهایت اطلاعات آب و هوایی مستخرج از نرم‌افزار متئونرم ۷ و اطلاعات مرتبط با ساختار کالبدی مدل، به نرم‌افزار انرژی‌پلاس وارد شده و محاسبات شبیه‌سازی حرارتی صورت پذیرفته است.

۴- بحث و تحلیل یافته‌ها

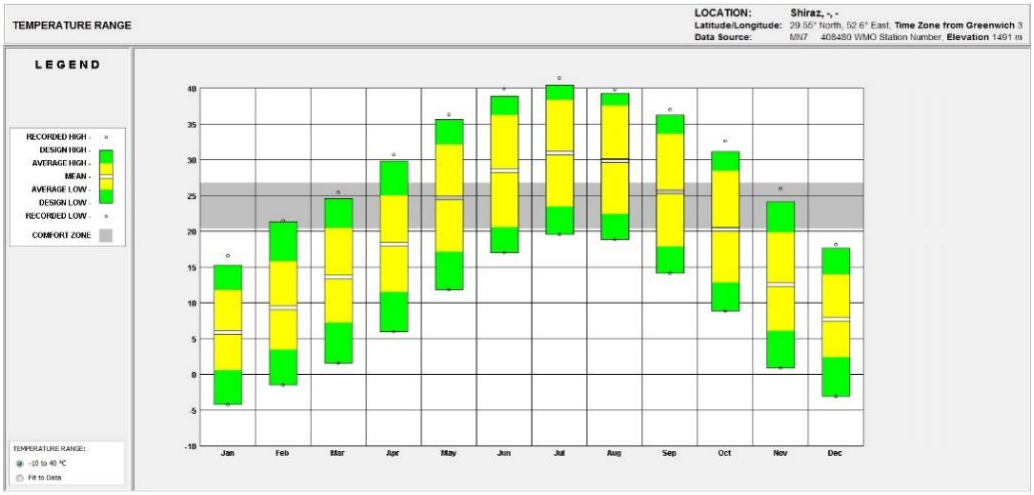
۴-۱- شناخت بستر انجام پژوهش و نحوه استخراج اطلاعات آب‌وهوایی

شهرستان شیراز مرکز استان فارس، بزرگ‌ترین نقطه جمعیتی در نیمه جنوبی کشور است. این شهر در ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقه عرض جغرافیایی و ۳۷ درجه و ۲۹ دقیقه طول جغرافیایی قرار گرفته است و حدود ۱۵ درصد از کل مساحت استان فارس را شامل می‌شود. شیراز با میانگین ارتفاع ۱۵۴۰ متر از سطح دریا، بر اساس طول دوره آماری ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰ با میانگین سالانه بارش ۳۳۷ میلی‌متر و میانگین سالانه دمایی حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد، در جنوب باختری ایران واقع است. بستر طبیعی که شهر بر آن قرار گرفته است، از لحاظ جغرافیایی دارای عوارضی است که هر کدام از جنبه‌هایی بر بافت، شکل و در مجموع سیمای شهر تاثیر می‌گذارند *(Nazarian, et al., 1388)*. بر اساس آخرین داده‌های ارایه شده از سوی مرکز آمار، جمعیت شیراز ۱۸۶۹۰۰۱ نفر بوده است و به‌عنوان پنجمین شهر پر جمعیت کشور شناخته می‌شود (*Nasr,1398*). بستر پژوهش شهر شیراز و استخراج اطلاعات آب و هوایی شهر از ضرورت‌های محاسبات انرژی گرمایشی و سرمایشی مدل است. متئونرم نرم‌افزاری کم نظیر برای تولید داده‌های هواشناسی برای نقاط جغرافیایی مختلف دنیا است. با استفاده از این برنامه می‌توان اطلاعات هواشناسی هر نقطه‌ای از زمین را دریافت کرد و در برنامه‌های مرتبط

استفاده کرد. به‌عنوان مثال اطلاعاتی همچون، دمای هوا در ساعات معین روز و شب، شدت تابش نور خورشید، میزان رطوبت و خشکی هوا، نوع آب و هوا و دمای‌خشک، دمای خیس، میزان رطوبت، سرعت باد، میزان تابش تشعشعی خورشید و بسیاری از پارامترهای دیگر، از این نرم‌افزار قابل برداشت است. این برنامه اطلاعات خود را از ۸۳۲۵ ایستگاه هواشناسی معتبر، ۵ ماهواره هواشناسی و ۳۰ سال تجربه دریافت می‌کند *(www.meteonorm.com)*. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار متئونرم، اطلاعات آب‌وهوایی شهر شیراز مورد بررسی قرار گرفته و در نرم‌افزار انرژی‌پلاس به‌منظور محاسبه نیاز انرژی برای سرمایش و گرمایش استفاده شده است. مقدار شدت تابش مستقیم و پخشی خورشید برای منطقه مذکور، مطابق نمودار **شکل ۵** است. نمودار **شکل ۶**، متوسط دمای ماهانه شهر شیراز، متوسط حداکثر دمای ماهانه و متوسط حداقل دمای ماهانه را نسبت به محدوده دمای آسایش نشان می‌دهد.



شکل ۵- شدت تابش مستقیم و پخشی خورشید شهر شیراز (داده‌های هواشناسی، ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ میلادی)



شکل ۶- دمای متوسط ماهانه و مقدار متوسط کمینه و بیشینه دمای شهر شیراز در ماه‌های مختلف (داده‌های هواشناسی، ۲۰۰۰۹ تا ۲۰۱۸ میلادی)

۴-۲- محاسبه دمای خاک در اعماق مختلف

برای مطالعه عملکرد حرارتی ساختمان زمین‌پناه، دمای خاک در عمق‌های متفاوت و اطراف ساختمان مورد نیاز است. به‌دلیل تفاوت در پارامترهای فیزیکی خاک در نواحی مختلف یک شهر، دمای خاک در قسمت‌های مختلف متفاوت است. قابل ذکر است که ویژگی‌های مختلف خاک از جمله، ضریب نفوذ گرمایی، درصد رطوبت، جرم حجمی خشک و ضریب هدایت حرارتی خاک تاثیر به‌سزایی در دمای خاک در طول سال دارند. برای تخمین دمای خاک در اعماق مختلف در طول سال روش‌های متعددی ارایه شده‌اند. رابطه (۱)، براساس تئوری اشری *(Ashrae, 2008)* و هیلل *(Hillel, 1982)* خلاصه شده است (*Ghiabakloo, 1393*).

$$t_{s.z} = t_m + A_0 exp\left(-z\sqrt{\frac{\pi}{۳۶۵\alpha}}\right) sin\left[\frac{۲\pi(n-n_0)}{۳۶۵} - z\sqrt{\frac{\pi}{۳۶۵\alpha}} - \frac{\pi}{۲}\right] \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، $t_{s.z}$= دمای خاک در عمق و زمان موردنظر بر حسب درجه سانتی‌گراد، z= عمق خاک از سطح زمین بر حسب متر، t_m= دمای میانگین سالانه هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد، n= شماره روز موردنظر از اول ژانویه، n_0= شماره روز وقوع سردترین روز سال از اول ژانویه، π= عدد پی، A_0= دامنه موج دمای هوا ($℃$) و α= ضریب نفوذ گرمایی خاک بر حسب m^2/day است که از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$\alpha = \frac{۴/۸۶\lambda_s}{\rho_s\left[۷۳/۰ + ۱۸/۴\left(w \div ۱۰۰\right)\right]} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، λ_s= ضریب هدایت حرارتی خاک بر حسب $W/m.℃$، ρ_s= جرم حجمی خاک بر حسب kg/m^3، w= درصد رطوبت که برابر است با نسبت جرم آب به جرم بخش جامد (دو وزن خشک و مرطوب خاک به‌راحتی با وزن‌کردن نمونه خاک قبل و بعد از قرار دادن آن در کوره به دست می‌آید).

با استفاده از فرمول محاسبه دمای خاک و پارامترهای مستخرج از **جدول ۲**، دمای خاک برای خاک ماسه‌ای سبک با رطوبت ۵ درصد در شهر شیراز برای عمق‌های ۰/۵- تا ۹- محاسبه شده است. این محاسبات برای روز مشخصی از هر ماه سال مطابق **جدول ۳** انجام شده و نتایج در نمودار **شکل ۷**، نشان داده شده است. سردترین روز سال در شهر شیراز به‌صورت تقریبی پانزدهم دی ماه و معادل پنجم ماه ژانویه است که در معادله (۱) وارد شده و سپس پانزدهم هر ماه بعد از آن در یک دوره یک ساله به‌صورت شماره روز موردنظر برای محاسبه دمای خاک در آن روز در نظر گرفته شده است.

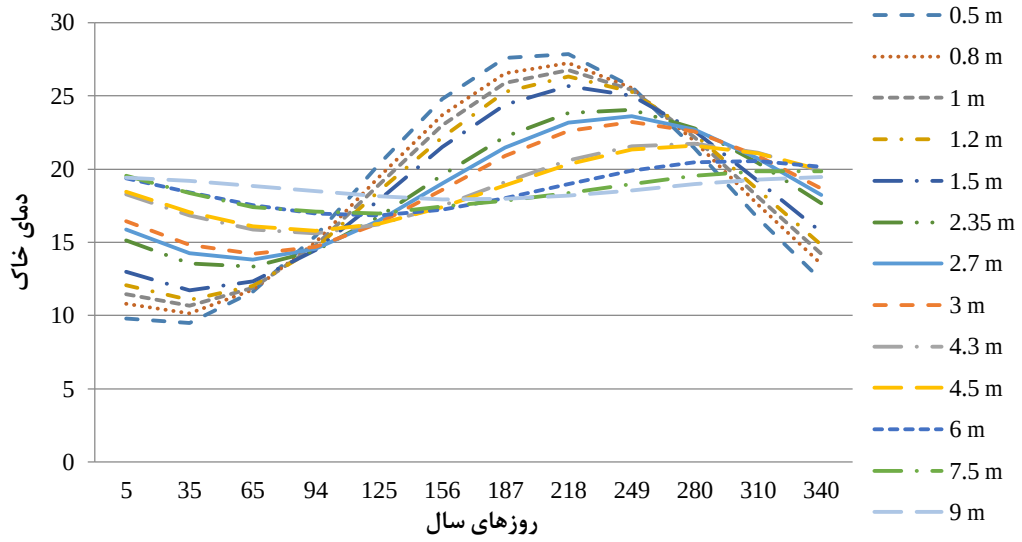
جدول ۲- پارامترهای مورد نیاز برای یافتن دمای خاک در شهر شیراز (داده‌های آماری بلندمدت هواشناسی شهر شیراز)

پارامترهای مورد نیاز خاک	درصد رطوبت	جرم حجمی خشک	ضریب هدایت حرارتی	ضریب نفوذ گرمایی	دامنه موج دمای هوا	شماره روز وقوع سردترین روز از سال از اول ژانویه	دمای میانگین سالانه هوا
	w	ρs (kg/m^3)	λs $(W/m.℃)$	α (m^2/day)	A_0	n_0	$(℃)\ t_m$
شیراز	۵	۱۲۸۵	۱/۴	۰/۱	۱۰/۸۵	۵	۱۸/۷

جدول ۳- تعیین شماره روزهای سال در هر ماه جهت تخمین دمای خاک در روز موردنظر

ماه	ژانویه	فوریه	مارچ	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
شماره روز وقوع سردترین روز سال از اول ژانویه در یک بازه زمانی یکساله	۵	۳۵	۶۵	۹۴	۱۲۵	۱۵۶	۱۸۷	۲۱۸	۲۴۹	۲۸۰	۳۱۰	۳۴۰

الگوی سالانه دمای پوسته زمین به‌صورت یک موج سینوسی بوده و منحنی تغییرات آن در اعماق مختلف نشان می‌دهد که هر چه عمق بیشتر شود، میزان تغییرات دمای خاک در طول سال دارای نوسانات کمتری بوده و تقریبا از دمای میانگین هوای سالانه منطقه موردنظر تبعیت می‌کند (*Ghiabakloo, 1393*). بررسی دمای خاک در فصول مختلف شهر شیراز نشان می‌دهد که هر چه عمق فرو رفتن در خاک بیشتر شود، دمای خاک ثبات حرارتی بیشتری پیدا می‌کند و اختلاف دمای خاک در فصول گرم و سرد سال کاهش می‌یابد. این اتفاق تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در عمق سه متری زمین حدود ۹ درجه، عمق شش متری حدود ۴ درجه و در عمق ۹ متری زمین، اختلافی حدود ۱/۵ درجه سانتی‌گراد بین دمای خاک در فصول گرم و سرد سال مشاهده شود. محاسبات در این روش نشان می‌دهد که دمای خاک به‌صورت تقریبی در عمق ۶ متری زمین برابر متوسط دمای سالیانه در شهر شیراز است و در عمق نزدیک به ۱۰ متر ثبات حرارتی سالیانه برقرار می‌شود که در نمودار **شکل ۷**، نشان داده شده است.



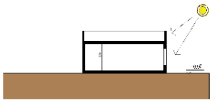
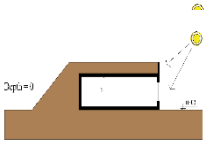
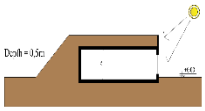
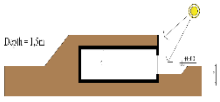
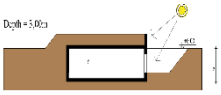
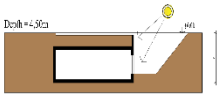
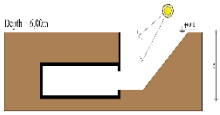
شکل ۷- دمای خاک از نوع ماسه ای سبک در طول سال برای اعماق مختلف زمین در شهر شیراز

۴-۳- مدل‌سازی نمونه توسط نرم‌افزار اسکچاپ

در زمینه طراحی مسکن زمین‌پناه در حالت تپه خاکریز یا درون تپه‌ای اولویت بر آن است که تمامی فضاهای زیستی رو به جبهه نما (جنوب) قرار گیرند و فضاهای خدماتی چون حمام، انبار و سایر که نیازمند نورطبیعی و تابش خورشید نیستند، در جبهه دیگر بنا یعنی درون تپه جانمایی شوند (*Hassan, et al., 2011*).

مدل پیشنهادی با ابعاد ۹ در ۱۲ متر و با مساحت ۱۰۸ متر متناسب با میانگین تقریبی مساحت واحدهای دوخوابه طراحی شده رایج در شهر شیراز در نظر گرفته شده است. تنها یکی از جبهه‌های ساختمان دارای چهار بازشو شفاف شامل، سه پنجره و یک درب است. بازشوها رو به جنوب جهت‌گیری شده‌اند تا علاوه بر تامین روشنایی طبیعی، از گرمایش تابش خورشید در زمستان نیز برای کاهش بارهای حرارتی بهره گرفته شود. بدین ترتیب، به جز جبهه نورگذر که همجوار با محیط بیرون است، سایر جبهه‌های مدل در تماس با خاک قرار می‌گیرند که در **جدول ۴**، بیان شده است. به‌منظور ایجاد چشم‌انداز وسیع‌تر و نوررسانی بهتر برای حالت‌های فرو رفته در عمق خاک، گودال باغچه‌ای با زاویه شیب ۴۵ درجه نسبت به سطح افق در جبهه جنوبی در نظر گرفته شده است که نقش موثری در ورود اشعه خورشید به بنا و کاهش نیاز گرمایشی آن در ساعات آفتابی فصل زمستان و هم چنین کاهش بار مربوط به روشنایی ساختمان دارد.

جدول ۴- نمایش حالت متفاوت فروروی مدل زمین‌پناه در خاک به همراه جزییات کالبدی

	میزان پوشانندگی با خاک	نمایش تصویری
حالت اول	بدون پوشش خاک و بر سطح زمین	
حالت دوم	با پوشش خاک و بر سطح زمین	
حالت سوم	فروروی در عمق ۰/۵ متری خاک	
حالت چهارم	فروروی در عمق ۱/۵ متری خاک	
حالت پنجم	فروروی در عمق ۳ متری خاک	
حالت ششم	فروروی در عمق ۴/۵ متری خاک	
حالت هفتم	فروروی در عمق ۶ متری خاک	
مدل انتخاب شده	مدل انتخاب شده	مدل انتخاب شده
الگوی پیشنهادی برای طراحی یک واحد دو خوابه در مدل انتخاب شده		
جزییات کف	جزییات دیوار و سقف	

۴-۴- استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای آنالیز انرژی مدل ساختمانی زمین‌پناه

ساختمان یک محیط بسیار پیچیده است. جایی که پوسته و جداره‌های بیرونی ساختمان، سیستم‌ها و تجهیزات تاسیساتی و سیستم نورپردازی و روشنایی، مهم‌ترین مولفه‌های مصرف انرژی را شکل می‌دهند و به‌صورت سیستمی یکپارچه رفتار انرژی را مشخص می‌نمایند؛ لذا درک و فهم عملکرد انرژی به مثابه نتیجه و حاصل همه جنبه‌های فرآیند طراحی ساختمان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و خود پیچیدگی زیادی را در بر دارد که ابزارهای مدل‌سازی و تحلیلی تا حد زیادی می‌تواند به فهم مطلب کمک کنند.

از میان ابزارهایی که در اختیار معماران و سایر مهندسان قرار دارد، پرکاربردترین آن‌ها در زمینه ارزیابی رفتار حرارتی، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی هستند. این نرم‌افزارها باخلق محیط مجازی ساختمان این امکان را فراهم می‌نمایند تا پیش‌بینی انرژی مصرفی ساختمان تا حد ممکن نزدیک به واقعیت باشد و همچنین طراح با بهینه‌سازی و بهبود طرح خود، فناوری‌های جدید صرفه‌جویی و انرژی-کارآیی را معرفی نماید.

صرفه‌جویی در زمان، صرفه‌جویی در هزینه‌ها در قیاس با روش‌های دیگر، انعطاف‌پذیری در انتخاب زمان مشخص یا دوره سالانه به‌منظور ورود اطلاعات لازم در نرم‌افزار، قابلیت شبیه‌سازی نمونه‌ها در مقیاس متفاوت و امکان شبیه‌سازی پارامترهای مختلف از محاسن روش شبیه‌سازی رایانه‌ای به شمار می‌آیند (*Al-Neama, 2011*). انرژی‌پلاس یکی از شاخص‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آمریکا توسعه یافته و از دقیق‌ترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی انرژی موجود در دنیا است.

این نرم‌افزار بدون هیچ واسط گرافیکی بر پایه مشخصات ساختمان شامل، ساختار فیزیکی، ساکنین، سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی آن و همچنین داده‌های هوایی سالانه مکان ساختمان، می‌تواند بارهای گرمایش و سرمایش را به‌منظور حفظ دما یا محدوده آسایش حرارتی خاص در بنا تنظیم کند (*EnergyPlus (Meteonorm)* *Engineering Document,2013*). مهم‌ترین پرسشی که پیرامون به‌کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مصرف انرژی در ساختمان ممکن است به ذهن خطور نماید، اعتبارسنجی و دقت این نرم‌افزارها در محاسبات مصرف انرژی در مقایسه با میزان واقعی آن است.

پژوهش‌هایی که در این حوزه انجام شده، نشان‌دهنده آن است که این نرم‌افزارها با دقتی قابل قبول مصرف انرژی ساختمان را محاسبه می‌نماید (*Yu et al., 2008*). از جمله پژوهش‌های انجام شده می‌توان به دو پژوهش در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ اشاره کرد. در پژوهش نخست که توسط اسکین و ترکمن در رابطه با مقایسه میزان بارهای حرارتی و سرمایشی توسط نرم‌افزار انرژی‌پلاس و میزان واقعی آن در یک بازه ۲۴ ساعته صورت پذیرفته، نتیجه این‌گونه است که میزان این اختلاف بسیار ناچیز بوده و به‌ترتیب برای بارهای حرارتی ۳ درصد و برای بارهای سرمایشی ۵ درصد است *(Eskin and Turkmen,2008)*. در پژوهش بعدی که به سال ۲۰۰۸ توسط نتو و فیورلی در برزیل انجام شده است، نتیجه حاکی از آن است که نرم‌افزار انرژی‌پلاس با دقتی در حدود ۱۳±، مقادیر انرژی مصرفی ساختمان را شبیه‌سازی می‌نماید که مقدار قابل قبولی است *(Neto & Fiorelli, 2008)*. در شروع این مرحله، فضایی که آنالیز انرژی آن‌ها مد نظر است مطابق طول و عرض مربوط به خود به‌صورت یک محدوده حرارتی *(Thermal Zone)* تعریف شده است؛ همچنین فضاهایی که به‌عنوان خاک مطرح شده‌اند با توجه به عمقشان، از دمای آن‌ها که در هر ماه اطلاعات آن برای شهر شیراز موجود است، متوسط‌گیری و برای نرم‌افزار تعریف شده است. برای انجام شبیه‌سازی حرارتی، ساختمان مدل‌سازی‌شده به همراه اطلاعات آب و هوایی شهر شیراز در نرم‌افزار انرژی‌پلاس وارد شده است. در مرحله بعد، گزینه مربوط به محاسبه سایه (*Shadow Calculation*) به‌منظور بررسی بحث سایه‌اندازی و گزینه اعمال انتقال حرارت جابه‌جایی برای داخل و خارج به‌منظور بررسی انتقال حرارت روی دیواره‌ها فعال گردید. تعریف مصالح ساختمانی برای جداره‌ها و پنجره‌ها مطابق با جدول شماره ۵ بخش بعدی کار بود که در آن، مصالح بر اساس اطلاعات داده شده به نرم‌افزار و در قالب لایه‌بندی برای کف، سقف و دیواره‌ها و همچنین پنجره به همراه ضریب نهایی انتقال حرارت آنها

نمایش داده شده است. در **جدول ۴**، نیز به جزییات لایه بندی دیوارها، کف و سقف اشاره شده است.

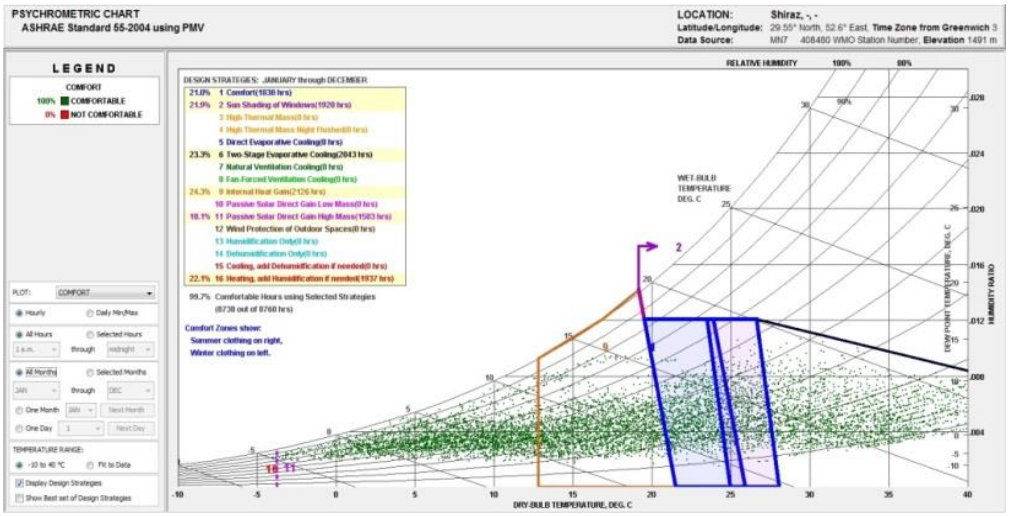
تعیین *SET POINT*: دمای آسایش استاندارد بر اساس استاندارد *Ashrae 55* و مطابق نمودار **شکل ۸**، بر اساس دمای هوای متوسط ماهانه محیط آزاد تعریف می‌شود. معمولاً این مقدار ۲۱ درجه سانتی‌گراد به‌منظور گرمایش و ۲۶ درجه سانتی‌گراد به‌منظور سرمایش انتخاب می‌شود که محدوده آسایش بین دو دمای ذکر شده است.

سیستم روشنایی: سیستم روشنایی در ساختمان مورد نظر بر اساس استاندارد *Ashrae 95*، ۵۰۰ لوکس و روشنایی ساعتی آن با توجه به کاربری مسکونی بودن در نظر گرفته شده و حرارت حاصل از نورپردازی مصنوعی داخل بنا در بخش ورود اطلاعات اولیه و محاسبات نرم‌افزار لحاظ شده است.

نرخ دفعات تعویض هوا: براساس استاندارد *Ashrae 62-2* و با توجه به نوع کاربری فضا، عایق‌بندی مناسب ساختمان و تعبیه درب پنجره در تنها یک جبهه ساختمان، دفعات تعویض هوا ۰/۷ در ساعت در محاسبات انرژی گرمایشی و سرمایشی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی حرارتی انجام شده سیستم تهویه خاصی معرفی نشده و تنها نیاز گرمایشی و سرمایشی مدل مورد بررسی قرارگرفته است.

جدول ۵-مشخصات مدل ساختمانی

عناصر	مصالح (با ذکر ضخامت لایه‌ها)	ضخامت نهایی *(m)*	ضریب نهایی انتقال حرارت *(u value) ($W/m^2.K$)*
بدنه *(A)*	پلاستر گچی ۲ سانتی‌متر+ بتن مسلح ۳۰ سانتی‌متر+ عایق پلی استایرن ۶ سانتی‌متر + عایق رطوبتی ۰/۵ سانتی‌متر	۰/۳۸۵	۰/۹۸
کف *(B)*	سرامیک ۲ سانتی‌متر+ ملات ماسه سیمان ۳ سانتی‌متر + شن‌ریزی ۷ سانتی‌متر+ بتن مسلح ۲۰ سانتی‌متر+ عایق پلی استایرن ۶ سانتی‌متر + عایق رطوبتی ۰/۵ سانتی‌متر	۰/۳۸۵	۱/۸۹
سقف *(Detail A)*	پلاستر گچی ۲ سانتی‌متر + بتن مسلح ۳۰ سانتی‌متر + عایق پلی استایرن ۶ سانتی‌متر + عایق رطوبتی ۰/۵ سانتی‌متر	۰/۳۸۵	۰/۹۸
پنجره دو جداره	شیشه به ضخامت ۳ میلی‌متر در دو لایه پر شده با گاز عایق آرگون	۰/۰۱۳	۴/۳



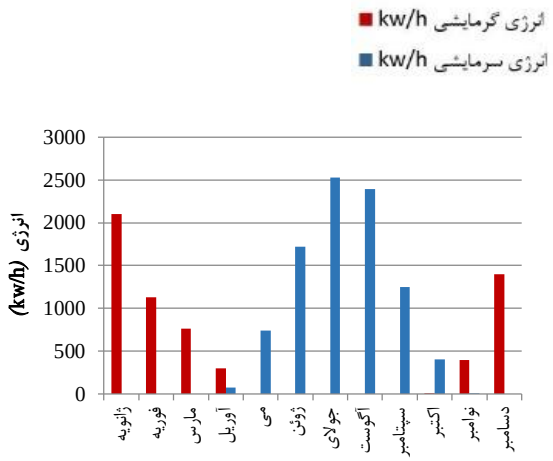
شکل ۸- تعیین دمای آسایش استاندارد در نمودار زیست اقلیمی شهر شیراز

تجهیزات: بر اساس استانداردهای موجود در آرشیو نرم‌افزار انرژی پلاس میزان حرارت تولید شده از تجهیزاتی مانند گاز، یخچال و غیره در محاسبات نیاز انرژی و تاثیر کلی آن بر فضای داخلی دیده شده است.

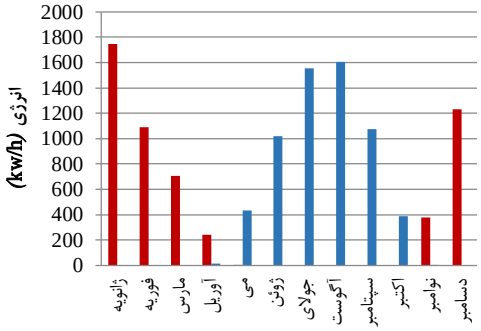
۴-۵- یافته‌های پژوهش پیرامون تحلیل رفتار حرارتی مدل‌ها در حالات مختلف

در این بخش، مدل مورد مطالعه در حالات مختلف، ابتدا بر روی سطح زمین، سپس خاک پوش بر سطح زمین و در ادامه با فرورفتگی تدریجی در عمق‌های نیم متری تا شش متری زمین مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت تا میزان بارهای گرمایشی و سرمایشی آن برای رسیدن به آسایش حرارتی در هر فصل و نسبت به مدل مستقر بر سطح زمین مشخص شود. برای تعیین شرایط مرزی جداره‌هایی که با خاک در تماس بودند، از میانگین دمای ماهانه خاک در شهر شیراز استفاده شده است. شماره روزهایی از سال که از اول ژانویه محاسبه شده و در محاسبه دمای خاک در رابطه (۱) وارد شده و در **جدول ۳**، آورده شده است. بر همین اساس در هر یک از این روزها بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان محاسبه و بار ماهانه مشخص گردیده است. با توجه به بررسی نمودارهای مدل ساختمانی در حالت‌های مختلف این گونه استنباط می‌شود که در حالت اول، یعنی در بنای بدون پوشش خاک و مستقر بر سطح زمین، میزان بارهای گرمایشی و سرمایشی در هر ماه از کلیه حالات فرورفته در کمترین مقدار خاک هم بالاتر است و دلیل اصلی آن، مجاورت مستقیم و بلامانع با تغییرات حرارتی هوای پیرامون مدل ساختمانی است (**نمودار شکل ۹**). در این حالت، در برخی ماه‌ها متناسب با گرمی یا سردی هوا بارهای سرمایشی و گرمایشی به صفر می‌رسد و گاهی به‌عنوان مثال در زمان‌هایی از فصل پاییز با توجه به تداوم گرما در شهر شیراز، برای آسایش حرارتی به مقداری سرمایش در برخی ساعات روز نیاز است. نمودارهای حالت دوم بیان‌گر آن هستند که با پوشیده شدن بام و بدنه ساختمان توسط خاک، نسبت به حالت اول، در ماه‌های گرم سال بارهای سرمایشی کاهش یافته، اما در برخی ماه‌های سرد سال با توجه به تاثیرپذیری مستقیم از دمای پایین محیط و در نتیجه انتقال حرارت از بنا به خاک سرد، بارهای گرمایشی کاهش چندانی ندارند (**نمودار شکل ۱۰**).

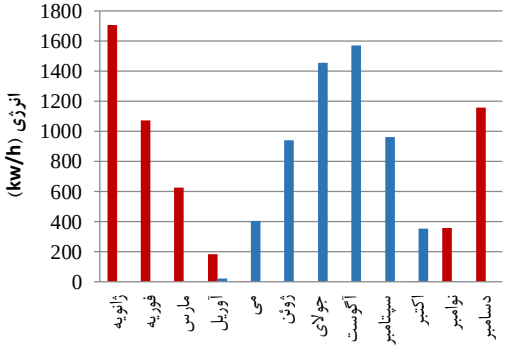
نمودار مصرف انرژی در حالت سوم نشان می‌دهد که با فرو رفتن در عمق نیم متری زمین، بارهای سرمایشی بنا در ماه‌های گرم سال نسبت به حالات قبل در حال کاهش است، اما بارهای گرمایشی مربوط به ماه‌های بسیار سرد سال کاهش نیافته‌اند و بردن ساختمان به زیرزمین در این اعماق از نظر مصرف انرژی گرمایشی در زمستان چندان به صرفه نیست (**نمودار شکل ۱۱**). از مطالعه نمودار **شکل ۱۲**، مشخص می‌شود که میزان مصرف انرژی سرمایشی در این حالت یعنی فروبردن ساختمان در عمق یک و نیم متری زمین، نسبت به مدل مشابه روی سطح زمین بیشتر است و بردن ساختمان به درون زمین، کاهش مصرف انرژی سرمایشی را به همراه دارد. در نهایت نمودارهای **شکل ۱۳** تا **شکل ۱۵**، نشان می‌دهند که با فرو رفتن در عمق زمین، مصرف انرژی سرمایشی به‌دلیل ضخامت بیشتر خاک اطراف بنا و دور ماندن بنا از شرایط آب و هوایی بیرون کمتر می‌شود. در رابطه با کاهش انرژی گرمایشی مرتبط با ماه‌های سرد سال نیز در عمق‌های ۳- متری تا ۶- متری، بنا از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار است؛ زیرا هرچه فروروی در عمق زمین بیشتر می‌شود، تاثیر تابش خورشیدی نفوذیافته در عمق خاک که با تاخیر زمانی همراه بوده بیشتر شده و مدل تعریف شده بخش زیادی از گرمایش مورد نیاز خود را از خاک گرم دریافت می‌نماید. لازم به ذکر است که منبع تمامی نمودارهای **شکل ۹** تا **شکل ۱۸** نویسندگان مقاله و بر اساس پژوهش انجام شده توسط آن‌ها است.



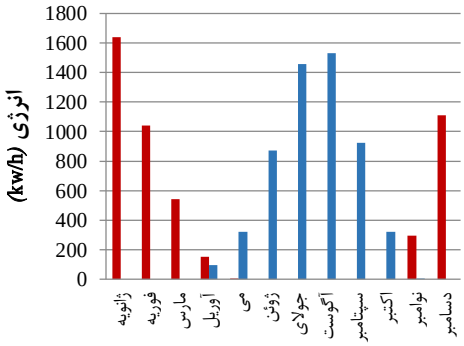
شکل ۹- مصرف ماهانه انرژی سرمایشی و گرمایشی مدل غیر زمین‌پناه مستقر برسطح زمین



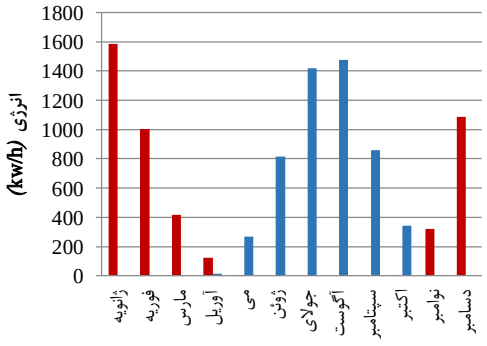
شکل ۱۰-مصرف ماهانه انرژی سرمایشی و گرمایشی مدل زمین‌پناه مستقر برسطح زمین



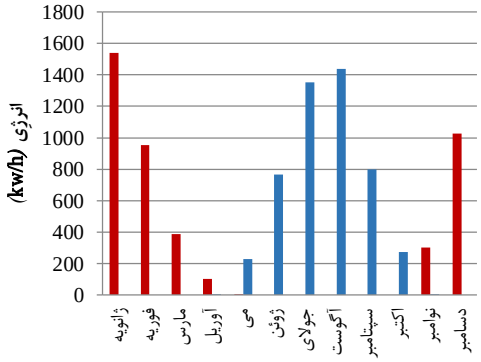
شکل ۱۱-مصرف ماهانه انرژی سرمایشی و گرمایشی در عمق ۰/۵ متری زمین



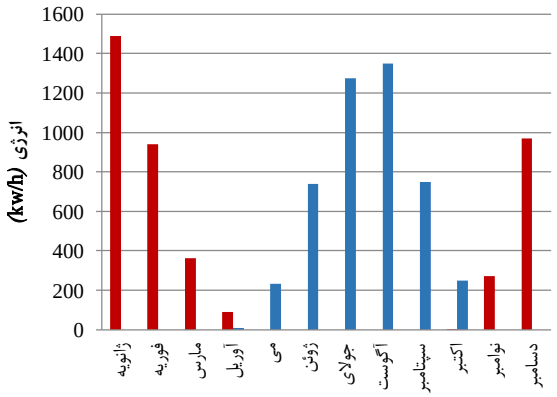
شکل ۱۲- مصرف ماهانه انرژی سرمایشی و گرمایشی در عمق ۱/۵ متری زمین



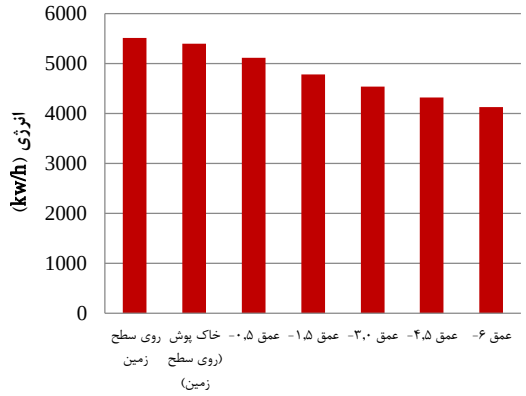
شکل ۱۳- مصرف ماهانه انرژی سرمایشی و گرمایشی در عمق ۳ متری زمین



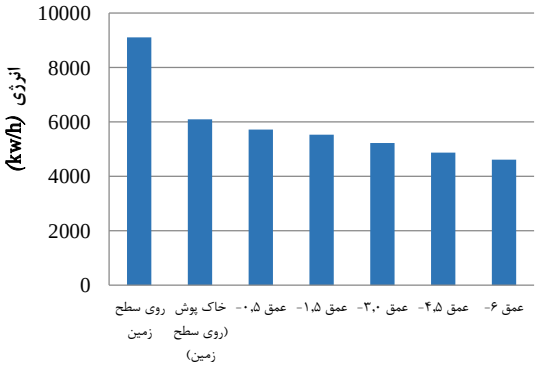
شکل ۱۴- مصرف ماهانه انرژی سرمایشی و گرمایشی در عمق ۴/۵ متری زمین



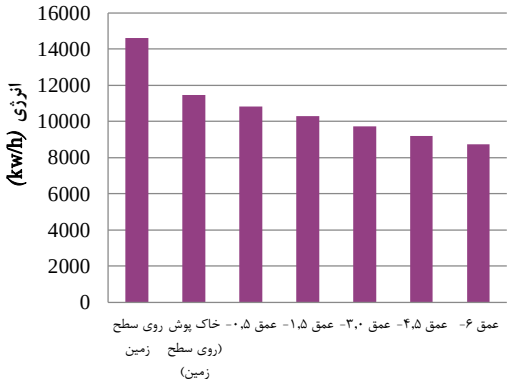
شکل ۱۵- مصرف ماهانه انرژی سرمایشی و گرمایشی در عمق ۶ متری زمین



شکل ۱۶- مصرف سالانه مجموع انرژی گرمایشی در اعماق ۰ تا ۶ متری عمق زمین در مقایسه با مدل مشابه روی زمین در شیراز



شکل ۱۷- مصرف سالانه مجموع انرژی سرمایشی در اعماق ۰ تا ۶ متری عمق زمین در مقایسه با مدل مشابه روی زمین در شیراز



شکل ۱۸- مصرف سالانه مجموع انرژی گرمایشی و سرمایشی در اعماق ۰ تا ۶ متری زمین در مقایسه با مدل روی زمین در شیراز

۵- نتیجه‌گیری

موضوع انرژی و دستیابی هر چه بیشتر کشورهای پیشرفته صنعتی دنیا به منابع انرژی ارزان قیمت، چالش‌های متعددی را ایجاد نموده است. از طرفی روند رو به رشد ساختمان‌سازی، بدون توجه به کاهش منابع انرژی، یکی از چالش‌های اصلی محیط زیست و زندگی بشر است؛ بنابراین ضروری است تا راهبردهای طراحی در ساختمان‌های جدید، با هدف کاهش انرژی مصرفی و آلودگی‌های زیست محیطی عملی شود. ساختمان‌های زمین‌پناه از جمله ایده‌هایی است که به‌صورت غیرفعال، کاهش مصرف انرژی ساختمان و تامین آسایش حرارتی را تا حد زیادی تضمین می‌کنند. این پژوهش با هدف بررسی مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی در مسکن زمین‌پناه صورت گرفته و این که مسکن زمین‌پناه می‌تواند در کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی موفق عمل کند، به‌عنوان فرضیه مطرح شده است. بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی بنای مسکونی زمین‌پناه در شهر شیراز در حالات مختلف فرو روی در زمین، نشان داده است که با فرو رفتن در زمین، صرفه‌جویی در مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی ایجاد می‌شود و فرضیه پژوهش در آزمون موفق است. نمودار مربوط به انرژی گرمایشی در عمق ۶ متری خاک صرفه‌جویی به میزان ۲۵/۸ درصد را نسبت به مدل غیر زمین‌پناه (حالت اول) نشان می‌دهد و نمودار مرتبط با

انرژی سرمایشی بنا، بیان‌گر کاهشی به‌میزان ۵۰ درصد نسبت به حالت اول یعنی مدل مستقر بر سطح زمین است (نمودار در **شکل ۱۶** و **شکل ۱۷**)؛ لذا مشخص است که بناهای زمین‌پناه در کاهش بارهای سرمایشی نسبت به بارهای گرمایشی، از امتیاز بسیار بالاتری برخوردار می‌باشند. مطالعه نمودار مربوط به مجموع بارهای گرمایشی و سرمایشی سالانه که در **شکل ۱۸**، آورده شده است، نشان می‌دهد، مدل ساختمانی شبیه‌سازی شده در حالات دوم تا هفتم نسبت به مدل مشابه غیر خاک پناه (حالت اول) به‌ترتیب ۲۱/۴ درصد، ۲۶ درصد، ۲۹ درصد، ۳۳/۳ درصد، ۳۷ درصد و ۴۰/۴ درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارند. بالاترین مقدار صرفه‌جویی، مربوط به استقرار مدل در عمق ۶ متری خاک است. ایده رفتن به عمق زمین برای کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان و به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک، راه‌حلی است که امروزه با وجود پدیده گرمایش جهانی بسیار اقتصادی و خودکفا به نظر می‌رسد و لذا ضرورت دارد تا ضمن آشنا نمودن مردم با این تکنیک با ارزش ساختمانی، یک برنامه‌ریزی جامع و کاربردی برای توسعه ساخت آن‌ها در بخش‌هایی از ایران که پتانسیل انجام آن وجود دارد، مورد استفاده قرار گیرد. بررسی مصرف انرژی در گونه‌های متفاوت مسکن زمین‌پناه، تکنیک‌های نوررسانی و مصرف برق در مسکن زمین‌پناه و همچنین بررسی ساخت آن‌ها از جنبه‌های اقتصادی، موضوعاتی هستند که می‌توانند به‌صورت تخصصی در مطالعات آتی توسط پژوهش‌گران علاقمند در این زمینه مد نظر قرار گیرند.

توضیح:

این مقاله برگرفته از رساله دکتری علی اقتداری با عنوان «تبیین الگوی میزان فرورفتگی بهینه بناهای مسکونی زمین پناه در عمق خاک جهت صرفه جویی در مصرف انرژی با استفاده از الگوریتم در اقلیم گرم و خشک» است که به راهنمایی دکتر طاهره نصر و مشاوره‌ی دکتر خسرو موحد و دکتر زهرا برزگر مروستی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز در حال انجام است.

۶- منابع

Akrami, F., & Nasrollahi, N. (1395). Investigating the Effect of Energy Efficiency for the Earth-Sheltered Buildings in Different Uses (Case Study: Hot-arid Climate of Yazd). Scientific Journal of Maremat & Me'mari-e Iran, 6(11). 41-50.

Al-Temeemi, A., & Harris, D. J. (2004, March). A guideline for assessing the suitability of earth sheltered mass-housing in hot-arid climates, Energy and Buildings. Volume 36, 251–260. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.005

Amores, C. P., Mazarron, F. R. & Cid- Falceto J. & Canas, I. (2011). Energy efficient underground construction: natural ventilation during hot periods.Volume 26. Singapore: International Conference on Petroleum and Sustainable Development.

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), 1214-1221. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.11.002

Ayien, S., & Kurd Jamshidi, M., & Pour Fallah, H. (1394), Investigating the thermal performance of cliff architecture in Kandovan village. Vernacular arts studies, 97-112

Benardos, I., Athanasiadis, N., & Katsoulakos F. (2014). Modern earth sheltered constructions: A paradigm of green engineering, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 41, 46–52. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.008

Carmody, J., & Sterling, R. (1993). Underground Space Design. (PP. 56-60). NewYork: Van Nostrand Reinhold.

Delangizaan, S., Soheyli, K., & Baharipour, S. (1394). Assessing the impact of traditional population structure on household energy consumption in Iran. Eghtesad,12(2),105-135.

El-Hamid, A., Khair-El-Din, M., 1991, Earth Sheltered Housing: An Approach to Energy Conservation in Hot Arid Areas, Architecture and Planning, Vol. 3, 3-18.

Emadian Razavi, Z. (1397). Evaluation of thermal performance of sheltered buildings in cold weather times of the year (Case study: Yazd hot and dry climate).Memari e Eghlim e Garm o Khoshk, 6(7), 85-99.

EnergyPlus Engineering Document. (2013). the Reference to EnergyPlus Calculations. Developed in collaboration by NREL, LBNL, ORNL, and PNNL.

Eskin, N., & Turkmen, H. (2008). Analysis of Annual Heating and Cooling Energy Requirements for Office Buildings in Different Climates in Turkey, Journal of Energy and Building,(40), 763-773.

Ghiabakloo, Z. (1393). Passive cooling, Tehran, Jahad Daneshgahi Publications.

Ghiaii,M., Mahdavinia,M., Taahbaaz, M., & Mofidi Shemirani,. M. (1392). Methodology of selecting energy simulator application software in the field of architecture. Hoviateshahr, 13(7), 5-15

Gholizadeh, A., & Barati, j. (1392). Analysis of factors affecting household energy consumption and household electricity consumption in Iran with emphasis on energy efficiency. Eghtesaad & tejarat e novin Trade, 26(7), 145-167

Hassan, H., Arima, T., Ahmed, A, & Sumiyoshi, D., & Akashi, A. (2014). Testing the Basements Thermal Performance as an Approach to the Earth-Sheltered Buildings Application at Hot Climates, Case Study (Egypt). Conference. Japan: The 2nd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association.

Imani, F., & Heydari, Sh. (1397, Springe and summer). Investigating the energy consumption of an underground building compared to a similar model on the ground in climates Tehran,Yazd and Tabriz. Motaleat e memari e irani, 13(7).

Jafari, s. (1391). Land-based architecture is a successful example of green architecture. Technical - Proffessional journal of Danesh-Nama, 21(3), 29-35

Khodabakhshian, M., & Mofidi, m., (1393, Springe). Underground spaces in arid climate architecture of Iran. Hoviateshahr. 8(17), 35-44

Kumara, R., Sachdevab, S. & Kaushik, S. C. (2007, June). Dynamic Earth-Contact Building: A Sustainable Low-Energy Technology. Building and Environment, 42(6), 2450–2460. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.05.002

Liu, j., Wang, L., Yoshino, Y., & Lio,Y. (2011,August). The thermal mechanism of warm in winter and cool in summer in china traditional vernacular dwellings, Building and Environment, Volume 46, 1709-1715. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.012

Masoudinejaad, M., Tahbaaz, M., & Mofidi Shemirani, M. (1397). Evaluation of Shavadan thermal behavior, Case Study: Dezful, Soozangara house. Motaleat e memari e irani. 7(13), 49-70

Molaii, a. (1391). Sustainable development utilizing underground spaces, case study: Tehran, Tajrish squre. Tunneling & underground space engineering. 1(1), 69-78

Nasr, T., (1398). The significance of future studies in sustainable development Scenarios (case study: Shiraz city). Modiriat e Shahri. Volome 55, 189-208

Nazarin, a., Karimi, B., & Roshani, A. (1388). Evaluation of physical development of Shiraz city with emphasis on natural factors, Goghrafia e Cheshmandaz e Zagros. 1(1), 5-18.

Neto, A., & Fiorelli, F. (2008). Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption, Journal of Energy and Building, 40(12), 2169-2176.

Saqaff, A., Alkaff, S.A., Sim, S.C., (2016, July). A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. Renewable and sustainable energy reviews. Volume 60, 692-713. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085

Shan, M., Hwanga, B., Kristie, & NiWong, S. (2017, November). A preliminary investigation of underground residential buildings: Advantages, disadvantages, and critical risks, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume70, 19-29. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.004

Shin, J. Y., Yun, G.Y., & Kim, J.T., (2011). Day lighting and energy performance prediction of a light pipe used in underground parking lots. Korea: 5TH international symposium on sustainable healthy buildings.

Soh, c., Christopoulos, G., Roberts, A., &Lee, E. (2016). Human-centered Development of Underground work Spaces. Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development, (PP. 12-15). Russia: 5th International scientific conference.

Stanic, M., & Nowak, H., (2011), Analysis of the Earth sheltered buildings heating and cooling energy demand depending on type of soil, Archives of Civil and Mechanical Engineering. Volume 11, 221-235, retrieved from https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60185-X

Thesis: Al-Neama, B. (2011), Energy Performance of Earth Sheltered Spaces in Hot Arid Regions. Msc Dissertation. The British University in Dubai, Faculty of Engineering&It.

Thesis: van Dronkelaar, C., (2013). Underground buildings - Potential in terms of energy reduction, MSc Thesis, Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology.

Van Dronkelaar, C., Costola, D., Mangkuto, R., & Hensen J. (2014). Heating and cooling energy demand in underground buildings; potential for saving compared to aboveground buildings for various cilmates and buildings functions, Energy and Buildings, volume71, 129-136. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.004

Yu, J., Yang, Ch., & Tian. L, (2008). Low-Energy Envelope Design of Residential Building in Hot Summer and Cold Winter in China. Journal of Energy and Building, (40), 1536-1546.

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

Volume 9-Issue 2\Summer 2020

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Investigating Energy Consumption of an Earthshelterd Building Compared to a Land-Based Model (A Case Study: Shiraz City)

A. Eghtedari[1]; T. Nasr[2*]; Kh. Movahed[3]; Z. Barzegar Marvasti[4]

1. PhD Student; Department of Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, Alieghtedari57@yahoo.com

2. Assistant Professor; Department of Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, Nasr@iaushiraz.ac.ir

3. Associate Professor; Department of Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, khm@iaushiraz.ac.ir3.

4. Assistant Professor; Department of Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, Zahrabarzegar86@yahoo.com

Received: 22 Feb 2020; Accepted: 27 Jul 2020
DOI: 10.22044/tuse.2020.5547.1308

Keywords

Reducing Energy Consumption
Thermal Comfort
Sustainable Development
Earthshelterd Building
Soil Temperature
Thermal Simulation

Extended Abstract

Summary

In this study, with the aim of investigating the thermal performance of an eartshelterd building, the amount of energy consumption in an earthshelterd construction model at different depths of the soil was compared with a building located on the ground surface. To this end, first, modelling was carried out with Sketchup software, then, soil temperature in the city of Shiraz at different depths was extracted utilizing the relevant formula and weather information obtained from Meteonerm software to enter in EnergyPlus software for performing thermal simulation. Consequently, considering the parameters considered for the city of Shiraz, the annual energy consumption saving measured, respectively for cooling and heating loads for a building located at a depth of 6 meters as optimal depth that was about 50 % and 20 % more than the non-earthshelterd building located on the ground surface. Therefore, replacing underground spaces instead of an on-the-ground building is a solution that is suggested for reducing annual energy consumption in buildings. Hence, in this research, the cooling and heating energy consumption as one of the most popular species of the green construction method in Shiraz with a hot-arid climate and prone to the development of earthsheltering architecture is investigated.

Introduction

Welcomed by many builders for numerous benefits, the earthsheltered spaces offer new opportunities for the designers. With general viewpoints of low energy consumption, this type of architecture has a good potential to take places in the direction of green architecture. The current research is to give the answer to the question of how much the use of earthsheltering pattern in Shiraz could be effective in reducing the heating and cooling loads of the building compared to its similar counterpart on the ground. The study also takes into account the amount of savings in heating and cooling loads as dependent variables, as well as independent variables such as the building dimensions, typology, climate, depth of penetration with respect to the ground surface, air infiltration into the building, transparency degree of the building, and thermal properties of soil.

Methodology and Approaches

This study, which aims to investigate the thermal performance of the earthsheltered structures, scrutinizes the amount

* *Corresponding Auther*

of heating and cooling energy consumption in a building model at different soil depths compared to a corresponding one located on the ground. At the outset, by referring to the research literature to get a sufficient attitude to this type of architecture and ensure the novelty of the subject matter, the general stages of the research began. Secondly, the required climatic meteonorm information was collected via the scientific data of Meteonorm software to be used in EnergyPlus software. At the third stage, the soil temperature at different depths in Shiraz was extracted by using the concerned formulae as the input to EnergyPlus. In the next steps, the building prototype modeling was rendered in Sketchup software version 2017. Lastly, the thermal simulation was examined through EnergyPlus software version 2011.

Results and Conclusions

The results obtained from the simulation of earthsheltered buildings in Shiraz in different depths of soil indicate that the penetration gives rise to save on heating and cooling energy and that the research hypothesis has been successful in the test. The diagram related to the heating energy at the depth of 6 m of soil shows a 25.8% rate of saving compared to the on-the-ground model, and the graph pertaining to the cooling energy designates a 50% reduction relative to the model on the ground. Thus, it is inferred that the earthshelter buildings enjoy a much higher precedence in reducing cooling loads than heating loads. Studying the diagram concerning the total annual heating and cooling loads reveals that the simulated models in the second to seventh cases enjoy energy savings, respectively, as 21.4%, 26%, 29%, 33.3%, 37%, and 40.4% compared to the non-sheltered situation. The highest saving corresponds to the deployment of the model at the depth of 6 m.

This article is adapted from the Ph.D thesis of Ali Eghtedari titled "Determination of Pattern of Optimal Indentation for Earth Sheltered Residential Buildings Inside Soil Depth to Save Energy by Using Genetic Algorithm in Hot Arid Climate" is being researched in Department of Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran under supervisory of Dr. Tahereh Nasr and co-supervisory of Dr. Khosrow Movahed and Dr. Zahra Barzegar Marvasti.