بهره‌گیری از ثبات حرارتی زمین در ایجاد آسایش حرارتی[1]

سیده‌زینب عمادیان رضوی[2]

استادیار دانشکدهٔ هنر و معماری دانشگاه یزد

سیدمحمدحسین آیت‌الهی[3]

استادیار دانشکدهٔ هنر و معماری دانشگاه یزد

چکیده

معماری گذشتهٔ ایران همواره بر تعامل اندیشمندانه با طبیعت پیرامون خود استوار بوده است. استفاده از زمین به منزلهٔ یک منبع انرژی تقریباً نامحدود که در اعماق مشخص ثبات حرارتی دارد، از جلوه‌های این تعامل در ایجاد آسایش انسان و فرار از تنگنای شدید اقلیمی محسوب می‌گردد. ایدهٔ «معماری در پناه زمین» که ریشه در معماری سنتی ما هم دارد، امروزه در بعضی کشورها، یکی از ایده‌های پاسخ‌گو به بسیاری از معضلات است، در حالی که در ایران کمتر توجه و بررسی شده است. مقالهٔ حاضر با هدف فراهم کردن اطلاعات و اشاعهٔ «معماری در پناه زمین» به بررسی انواع روش‌های استفاده از ثبات حرارتی زمین می‌پردازد. به این منظور، پس از نگاهی کوتاه به پیشینهٔ استفاده از این نوع معماری و معایب و مزایای آن، با نگاهی تخصصی‌تر به جنبه‌های ثبات حرارتی زمین، از جمله عوامل تأثیرگذار بر دمای سطح زمین و اعماق چندمتری آن پرداخته می‌شود. درنهایت با استناد به نمونه‌های موردی مرتبط داخل کشور، راهکارهای پیشنهادی استفاده از ثبات حرارتی زمین در ایجاد آسایش حرارتی بیان می‌گردد.

کلیدواژگان: معماری در پناه زمین، ثبات حرارتی زمین، دمای زمین، آسایش حرارتی.

مقدمه

امروزه به موضوع بحران انرژی بسیار پرداخته شده و تحقیقات فراوانی پیرامون آن در کشور صورت گرفته که بیشتر در زمینه‌های باد و خورشید بوده، ولی در تحقیقات اندکی به زمین به منزلهٔ یکی از عناصر مهم طبیعت پرداخته شده و به معضلات دیگر معماری امروز، که تأثیر ساخت‌وساز در تخریب محیط است، توجه چندانی نشده است. حال آنکه در معماری سنتی ایران از زمین بهره‌های فراوان برده شده است. همچنین امروزه به این ایده در مجامع علمی دنیا به طور جدی توجه و مطالعات فراوانی در این زمینه شده است.[4] با توجه به نقش این گونهٔ معماری در رها کردن قسمتی از زمین، ثبات حرارتی بنا، و فواید بسیار دیگر جا دارد که روش‌های بهره‌گیری از زمین و معایب و مزایای آن بررسی شود تا معماران هم‌زمان با طراحی بنای معماری، این مهم را نیز مد نظر داشته باشند. به این منظور ابتدا با نگاهی به پیشینهٔ استفاده از «معماری در پناه زمین»[5]، مزایا و معایب این نوع معماری بررسی می‌گردد و سپس با نگاهی تخصصی‌تر به جنبه‌های ثبات حرارتی

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامهٔ دکتری نویسنده مسئول است با عنوان *ثبات حرارتی زمین و رفتار حرارتی بنا* که به راهنمایی دکتر شهرام پوردیهیمی و مشاورهٔ دکتر محمدرضا حافظی در دی‌ماه سال ۱۳۹۰ در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی دفاع شده است، این بخش از پایان‌نامهٔ مذکور محصول درس ویژهٔ ۲ی دورهٔ دکتری نویسنده مسئول است که با راهنمایی دکتر سیدمحمدحسین آیت‌الهی انجام شده است.

۲. نویسندهٔ مسئول؛
z_emadian@yazd.ac.ir
3. hayatollahi@yazd.ac.ir

۴. مقالات متعدد موجود در این زمینه، حاکی از مطالعات روزافزون کشورهای عربی (با آب‌وهوای گرم و خشک) برای احیای معماری سنتی زیرزمینی است.

5. Earth-sheltered Architecture

دیگر اصطلاحاتی که برای بناهای در پناه زمین یا این نوع رویکرد معمارانه استفاده می‌شود:
Underground buildings, earth-integrated buildings, earth-protected construction, earth-coupled buildings, subterranean, semi-subterranean, earth-covered buildings.

پرسش‌های تحقیق

۱. معماری در پناه زمین چه مزایا و معایبی دارد؟

۲. با چه روش‌هایی می‌توان از ثبات حرارتی زمین برای ایجاد آسایش حرارتی استفاده کرد؟

زمین پرداخته می‌شود و درنهایت روش‌ها و راهکارهای پیشنهادی استفاده از ثبات حرارتی زمین بیان می‌گردد.

۱. نگاهی کوتاه به پیشینهٔ استفاده از معماری در پناه زمین

گرایش‌های معاصر به استفاده از زمین به صورت عاملی تأثیرگذار درکنترل حرارتی ساختمان به سال ۱۹۷۳، که مسئلهٔ انرژی به بحران بین‌المللی مهمی تبدیل شد، بازمی‌گردد. در حالی که در بسیاری از فرهنگ‌ها، از چندین هزار سال قبل، ساختارهای زیرزمینی راهکاری طبیعی در کنترل شرایط حرارتی محیط در مناطق گرم و خشک بوده‌اند.

مهم‌ترین و قابل‌توجه‌ترین نمونه‌های استفاده از زمین در شکل‌گیری گروه‌های اجتماعی، در سه منطقهٔ جهان یافت می‌شود: شمال چین، درهٔ گورمه در ترکیهٔ مرکزی، و همچنین تونس. هر سه منطقهٔ فوق در اقلیم گرم و خشک که نوسان دمای روزانه و فصلی بالایی دارد، مشترک هستند.

در معماری سنتی ایران، بهترین نمونهٔ ابنیه زیرزمینی را می‌توان مشاهده کرد. در واقع استفاده از زیرزمین‌ها یکی از روش‌های سنتی مقابله با گرمای شدید در مناطق گرم و خشک (نظیر یزد، نائین، زواره، و...) و حتی مناطق گرم و نیمه‌مرطوب ایران (دزفول، شوشتر، و...) بوده است.

در خانه‌های درون‌گرای فلات مرکزی ایران که به خانه‌های چهار فصل موسوم است، اتاق‌های اطراف حیاط بنا بر فصل معین سال استفاده می‌شوند. در تابستان، تالار و اتاق‌های اطراف آن که در سایه و خنک‌تر هستند، محل سکونت افراد خانواده بودند. غالباً سرداب (زیرزمین) در زیر این قسمت بود. در فصول گرم دمای سرداب، به علت بودن در زیرزمین، از دمای سایر قسمت‌ها کمتر است. در مواقعی که دمای هوا بسیار زیاد بوده، اهل خانه به سرداب می‌رفتند و از هوای خنک‌تر آن استفاده می‌کردند. همچنین بسیاری از خانه‌های مناطق کویری در دوطبقه ساخته می‌شدند که یک سطح آن از کف حیاط پایین‌تر و به صورت گودال باغچه طراحی می‌شده است. در این خانه‌ها برعکس دیگر خانه‌ها زیرزمین محصور و تاریک نبود و در سطح پایینی نیز حیاطی تعبیه می‌کردند که به صورت گودال در مرکز حیاط بالایی بوده است. معمولاً در حیاط پایینی درختان نارنج کاشته می‌شده که از درختان همیشه‌سبز

ت ۱ (صفحهٔ روبه‌رو). ساختمان‌های یونسکو در پاریس؛ مأخذ: www.pushpullbar.com

است، و این امر به خنک کردن حیاط پایین و زیبایی بصری حیاط بالا می‌افزوده است. حیاط پایین به دلیل محصور بودن از وزش بادهای خشک منطقه در امان بوده و همچنین باعث کاهش تابش اشعه‌های خورشید به جدارهٔ ساختمان در طول روز بوده است. محصور بودن اتاق‌های این فضا در زیرزمین نیز باعث حبس هوای گرم در زمستان بوده و اتلاف حرارتی به حداقل می‌رسیده است.

نمونهٔ بسیار جالبی از زیرزمین‌ها در منطقهٔ گرم و نیمه‌مرطوب دزفول، شوشتر، و روستاهای اطراف این دو شهر هست. در سابق تنها گریز مردم این منطقه پناه بردن به محیط خنک‌تر «شبستان»[۶] و «شوادون»[۷] بوده است. اتاق‌های زیرزمینی شبستان در ایام تابستان یا در مواقعی که هوا گرم بوده استفاده می‌شده، ولی در ایامی که حرارت بسیار زیاد و دمای شبستان نیز برای زندگی و فعالیت طاقت‌فرسا بوده، اهل خانه به شوادون می‌رفتند.[۸]

از سال ۱۹۴۰ ایدهٔ ساختمان‌های زیرزمینی در طراحی ساختمان‌ها در بعضی کشورها به منظورهای مختلف به کار گرفته شده است. به این ایده پس از بحران انرژی در سال ۱۹۷۳ به دلیل تأثیر آن بر صرفه‌جویی مصرف انرژی و کنترل اقلیم، توجه بیشتری شد. نمونه‌هایی از گودال باغچه‌های معاصر در مقیاس بزرگ را می‌توان در ساختمان‌های یونسکو در پاریس

(ت ۱)، کتابخانهٔ زیرزمینی در دانشگاه ایلینویز و توسعهٔ موزه لوور در پاریس مشاهده کرد. همچنین نمونه‌های دیگری در مقیاس مسکونی در نقاط مختلف جهان یافت می‌شود.[۹]

۲. مزایا و معایب معماری در پناه زمین

بررسی تاریخی معماری در پناه زمین و نمونه‌های معاصر نشان می‌دهد که این ایده جایگزینی کارآمد در طراحی واحدهای مسکونی (به جای نمونه‌های رایج) برای کاهش مصرف انرژی بخصوص در مناطق با اقلیم بسیار گرم است. به دلیل خنک‌تر بودن خاک پیرامون، نسبت به هوای محیط در مواقع گرم سال، ساختمان زیرزمینی توان کاهش انرژی سرمایشی مورد نیاز را، به دلیل کاهش انتقال حرارت از جداره‌های خارجی، دارد. بنا بر گفتهٔ کارمودی و استرلینگ، حتی در اعماق کمی از زمین، در گرم‌ترین لحظات یک روز تابستانی، دمای زمین به‌ندرت به حدی برابر با دمای محیط بیرون می‌رسد. درنتیجه گرمای کمتری به داخل ساختمان انتقال می‌یابد.[۱۰] در واقع بسیاری از محققین به این نتیجه رسیده‌اند که ساختمان‌های زیرزمینی در مقایسه با انواع ساختارهای رایج با کاهش بار گرمایشی و سرمایشی، صرفه‌جویی بیشتری در انرژی خواهند داشت.[۱۱] کارپنتر ادعا می‌کند که ساختمان‌های در پناه زمین نسبت به هر طرح دیگری بیشترین ظرفیت را در صرفه‌جویی انرژی دارند. در این نوع ساختمان‌ها نه‌تنها اختلاف دمای بین داخل و خارج کاهش می‌یابد، بلکه جداره‌های در تماس با زمین آن از تابش مستقیم خورشید نیز محافظت می‌شوند.[۱۲]

کارایی حرارتی این نوع ساختمان‌ها به دلیل حذف تابش خورشیدی از دیوارها و بام، کاهش نفوذ ناخواستهٔ هوا، و همچنین جذب نشدن گرما از طریق دیوارها و بام به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.[۱۳] وجود خاک بر روی بام این نوع ساختارها ظرفیت ایجاد فضای باز (سبز) بیشتری را فراهم می‌کند که نکتهٔ مهمی در طراحی خارجی ساختمان‌های زیرزمینی است.

۶. شبستان همان زیرزمین یا سرداب است که در سایر نواحی گرم و خشک بسیار متداول است.

۷. شوادون یک فضای خنک زیرزمینی در بناهای سنتی این منطقه است که با حفاری در دل زمین با عمق بیش از ۱۰ متر از سطح زمین ایجاد می‌گردد که از آن در تابستان برای استراحت روزانه و همچنین نگه‌داری مواد خوراکی و در کل نیازهای برودتی استفاده می‌شود (بینا، ۱۳۸۷).

۸. وحید قبادیان، *بررسی اقلیمی ابنیه سنتی ایران*، ص ۳۱.

9. Adil A. Al-Mumin,"Suitability of sunken courtyards in the desert climate of Kuwait", p. 104

10. J. Carmody & R. Sterling, "Design Considerations for Underground Buildings", pp. 352-362

۱۱. منابع زیر نتایج تحقیقات در زمینهٔ میزان صرفه‌جویی در انرژی ساختارهای زیرزمینی را نشان می‌دهند:

- J.Q. McMillian, *The Earth Sheltered Home*;
- L.L. Boyer & W.T.Grondzik, "Habitability and Energy Performance of Earth Sheltered Dwellings", pp. 39-64;
- A.M. Khair-el-Din, "Earth Sheltered Housing: an Approach to Energy Conservation in Hot Arid Areas", pp. 365-369.

ساختمان‌های زیرزمینی به دلیل قرارگیری در زمین، محیط آرام‌تری را نسبت به ساختمان‌های متداول برای ساکنین فراهم می‌کنند و تأثیر کمتری از منابع آلودگی صوتی روی زمین می‌پذیرند.

به دلیل مجاورت قسمت عمدهٔ سطوح خارجی ساختمان با زمین، پوستهٔ ساختمان کمتر تحت تأثیر عوامل طبیعی نظیر باد، باران، تابش شدید، تگرگ، یخ‌زدگی، و... قرار می‌گیرد و درنتیجه به تعمیر و نگه‌داری کمتری نیاز دارند.

لازم به ذکر است، از دیگر خصوصیات قابل توجه ساختمان‌های زیرزمینی مقاومت بهتری است که در مقابل حوادث طبیعی از جمله بادهای شدید، طوفان، رعد و برق، و همچنین زلزله نشان می‌دهند.[۱۴]

درنهایت لازم است که به استفاده از زیرزمین‌ها در دفاع غیرعامل در مواقع وقوع جنگ‌ها نیز اشاره شود.[۱۵]

علی‌رغم فواید بسیار معماری در پناه زمین، فرو رفتن در خاک محدودیت‌ها و معایبی نیز دارد. مهم‌ترین مشکل، غلبه بر مسائل اجتماعی و روان‌شناسی است.[۱۶] طراحان تصور می‌کنند که مردم زندگی در خانه‌های در پناه زمین را نمی‌پذیرند، اگرچه معتقدند که اگر فواید این نوع معماری برای مردم روشن گردد، خانه‌های در پناه زمین نیز مقبول واقع می‌شوند. فقدان یا تعداد محدود پنجرهٔ این نوع ساختارها، حس در انزوا بودن، ترس از فضاهای تنگ و محصور، همچنین اضطراب ناشی از دسترسی دشوار به راه خروج در مواقع اضطراری، و ... را تشدید می‌کند.[۱۷]

دومین مانع اشاعهٔ ایدهٔ مورد نظر، کمبود اطلاعات دربارهٔ «رفتار انرژی» در ساختارهای در پناه زمین است.[۱۸] پیش‌بینی عملکرد کلی ساختارهای زیرزمینی، به دلیل پیچیدگی تغییرات دمای خاک در یک دورهٔ طولانی و همچنین انتقال گرما از دیوار به خاک، دشوار است.

نکتهٔ قابل‌ذکر دیگر، هزینهٔ ساخت بالاتر ساختمان‌های در پناه زمین نسبت به ساختمان‌های رایج است که همواره در ادبیات موضوع بحث چالش بوده است. چندین نویسنده ادعا کرده‌اند که هزینهٔ ساخت اولیهٔ خانه‌های در پناه زمین بالاتر از خانه‌های رایج (با اسکلت چوبی) با ابعاد و کیفیت مشابه است.[۱۹] علت اصلی این افزایش هزینه، مصالح ساختاری اضافی به منظور تحمل وزن خاک روی بام است. اگرچه نمی‌توان به طور قاطع گفت که هزینهٔ ساخت هر ساختمان در پناه زمین بالاتر از مشابه روی زمین آن است. بسیاری از نویسندگان اظهار داشته‌اند که هزینهٔ ساخت یک خانه در پناه زمین مشابه یک خانهٔ رایج است.[۲۰] در حالی که گروهی دیگر معتقدند ساختارهای در پناه زمین در بسیاری از موارد ارزان‌تر از ساختارهای مشابه روی زمین هستند.[۲۱] زیرا افزایش در هزینهٔ ساخت با هزینهٔ کمتر در زمینه‌های دیگر، از جمله در طراحی سیستم‌های مکانیکی، جبران می‌گردد. علاوه‌بر آن، کاهش بار حرارتی یک ساختمان باعث می‌شود که هزینهٔ عایق مصرفی در ساختمان نیز کاهش یابد. همچنین هرچه سطح تماس ساختمان با خاک بیشتر شود، هزینهٔ نماسازی خارجی نیز کمتر می‌شود. در واقع صرفه‌جویی در مصالح نمای خارجی به‌تنهایی می‌تواند هزینه‌های اضافی ناشی از تحمل بار خاک را جبران کند. در تحقیقی هم که الممین در مقایسهٔ هزینهٔ ساخت دو ساختمان با مساحت یکسان، یکی با طرح گودال باغچه و دیگری روی زمین در کویت انجام داده است، همین نتیجه حاصل شده است. در واقع محاسبات او نشان می‌دهد که ساختمان زیرزمینی هزینهٔ ساخت کمتری خواهد داشت[۲۲].

در جدول «ت ۲» خلاصه‌ای از معایب و مزایای ساختمان‌های در پناه زمین نشان داده شده است.

ت ۲. خلاصه‌ای از معایب و مزایای ساختمان سازی در پناه زمین؛ مأخذ: نگارندگان.

مزایا	معایب
کارایی حرارتی	فقدان مقبولیت از جانب عموم مردم
دید محدود از محیط بیرون به داخل ساختمان	محدودیت دید به مناظر اطراف
افزایش فضای باز	کمبود اطلاعات راجع به عملکرد حرارتی
سر و صدای کمتر	هزینهٔ حفاری زیاد و مستحکم‌سازی زمین
کاهش هزینهٔ تعمیرات و نگهداری	مشکل زهکشی آب
ایمنی ساختمان از حوادث طبیعی	مشکل تهویه
راهکاری برای دفاع غیرعامل	

۱۲. نک:
P. Carpenter, *Sod It: An Introduction to Earth Sheltered Development in England and Wales*.
13. Adil A. Al-Mumin, ibid, p 105.

۱۴. به طور مثال «در زلزلهٔ سال ۱۳۵۸ در گناباد، بسیاری از گرمابه‌های قدیمی (کــه در زیرزمین واقع شــده بودند) در روســتاهای اطراف این شهر از آسیب زلزلــه در امــان ماندنــد. در حالی که گرمابه‌های نوســاز با معمــاری جدید آسیب دیدند» (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، *بازســازی مناطق زلزله‌زده، جلد دوم، جنوب خراسان*، ص ۵۰).

۱۵. دفــاع غیرعامل، به کلیهٔ اقدامات و تدابیــری گفته می‌شــود که بدون اســتفاده از ســلاح، موجــب کاهش آســیب‌پذیری، تلفات و خســارات و افزایش پایداری شود.

۳. دمای سطح و زیر خاک

با مروری که بر پیشینهٔ معماری در پناه زمین انجام شد، در این بخش به «کارایی حرارتی»، یکی از مزایای قابل‌توجه این ساختارها، پرداخته می‌شود. کارایی حرارتی این نوع ساختارها به دلیل «ثبات حرارتی زمین» در مقابل نوسان قابل‌توجه دمای هوای محیط است. در واقع جرم حرارتی زمین دامنهٔ نوسانات درجهٔ حرارت را تعدیل می‌کند و به تأخیر می‌اندازد. در این قسمت در ابتدا به طور مختصر به عوامل تأثیرگذار بر دمای سطح و عمق خاک پرداخته می‌شود و سپس نتایج بررسی‌ها بر چندین فضای زیرزمینی بیان می‌گردد.

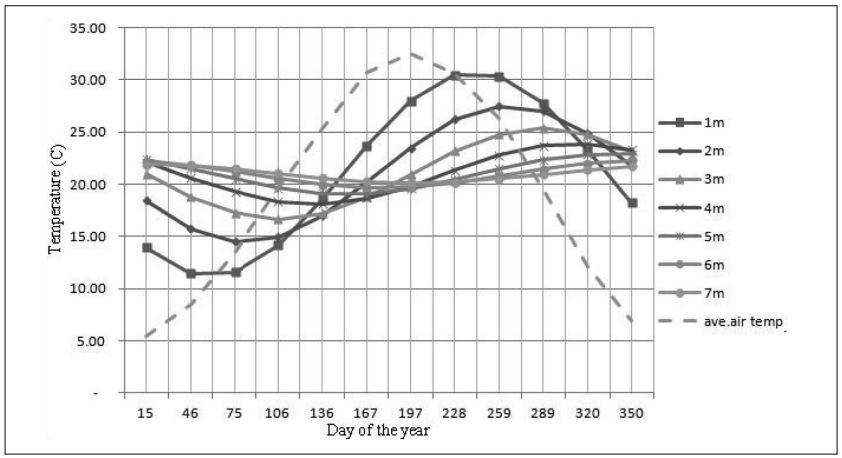
دمای سطح خاک، نوسان سالیانه و روزانه‌ای دارد که با انرژی خورشیدی جذب‌شده در سطح و دمای هوای محیط تعیین می‌شود. دامنهٔ نوسان روزانه عمدتاً به پوشش گیاهی منطقه (خاک فاقد پوشش، چمن، و درخت)، رطوبت خاک و آلبیدو سطح [۲۳] بستگی دارد. همچنین تحت تأثیر ویژگی‌های ترموفیزیکی خاک، به‌ویژه ضریب هدایت حرارتی[۲۴] و ضریب نفوذ[۲۵] (نسبت ضریب هدایت حرارتی به ظرفیت گرمایی ویژه) است. با ضریب نفوذ بالاتر، گرما به‌آسانی از سطح به لایه‌های زیرین آن جابه‌جا می‌شود. بنا بر این نوسان دمای سطح کاهش می یابد. خاک مرطوب ضریب هدایت حرارتی و (نفوذ) بالاتری نسبت به خاک خشک دارد.[۲۶]

نوسان روزانه، با افزایش عمق به‌سرعت کاهش می‌یابد. به طوری که در عمق ۶/۱ متری اکثر نوسانات حرارت از بین می‌رود و دمای زمین در طول سال ثابت است. دمای زمین در این عمق برابر با معدل دمای هوای سالیانهٔ منطقه است.[۲۷]

مطالعهٔ معماری سنتی ایران (به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک و گرم و نیمه‌مرطوب) حاکی از آن است که گذشتگان از ثبات حرارتی زمین آگاه بوده و از آن به بهترین صورت و در اشکال متنوع استفاده کرده‌اند. ساختن ابنیه‌ای چون حمام‌ها، آب‌انبارها، و یخچال‌ها در دل زمین و همچنین استفادهٔ فصلی از فضاهای زیرزمینی در خانه‌های مسکونی همه نشان‌دهندهٔ شرایط حرارتی مناسب این فضاها است.

نتایج محاسبهٔ دمای زمین تا عمق ۷ متری در شهر یزد بر اساس معادلهٔ کنت لبز[۲۸] نشان می‌دهد که در حالی که میانگین دمای هوای سالیانه، حداقل ۵/۵ درجهٔ سانتی‌گراد در ژانویه و حداکثر ۳۲/۵ درجهٔ سانتی‌گراد در ژوئیه با نوسان حدود ۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد است، با افزایش عمق، نوسان دما کاهش می‌یابد و درنهایت از عمق ۷ متر به بعد دما تقریباً ثابت (حدود ۲۱ درجهٔ سانتی‌گراد) می‌شود. «ت ۳» منحنی تغییرات دمای اعماق زمین در عمق ۱ تا ۷ متری را در مقایسه با میانگین دمای هوا در یک دورهٔ یک ساله نشان می‌دهد.[۲۹]

نتیجهٔ بررسی نوسان دمای پایابِ خانهٔ رسولیان (دانشکدهٔ هنر و معماری دانشگاه یزد)، که در عمق حدود ۹ متری زمین واقع است، نشان می‌دهد که در تیرماه، در حالی که حداکثر دمای محیط ۳۹/۸ درجهٔ سانتی‌گراد است، دمای پایاب حداکثر ۱۹/۷ و حداقل ۱۹/۴ ثبت شده است. در این زمان دمای حداکثر کلاه فرنگی ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد است.[۳۰] بنا بر این دمای پایاب برابر با معدل دمای هوای سالیانهٔ شهر یزد و بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی، ۱۹/۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد تعیین شده است،



ت ۳. منحنی تغییرات دمای عمق ۱ تا ۷ متری زمین در شهر یزد در مقایسه با میانگین دمای هوا در یک دوره یک ساله، مأخذ: عمادیان رضوی، *ثبات حرارتی زمین و رفتار حرارتی بنا*.

۱۶. نک:
G. Golany, *Earth-sheltered Habitat*.

۱۷. راهکارهای پیشنهادی برای کاهش مشکلات روان‌شناسانهٔ طرح‌های در پناه زمین، در منبع زیر جمع‌آوری شده است:
سیده‌زینب عمادیان رضوی، *ثبات حرارتی زمین و رفتار حرارتی بنا*، ص۲۳-۲۲.
18. R. Sterling & M. Tingerthal, "Building Costs and Construction Problems in the Minnesota Earth-sheltered Housing Demonstration Program", pp. 13-20.

که این وضعیت شرایط حرارتی مطلوبی را در فصل تابستان فراهم می‌کند.[۳۱]

اندازه‌گیری دمای داخل یکی از اتاق‌های گودال باغچهٔ خانهٔ هوشمند (واقع در حوالی میدان امیرچخماق یزد) که در عمق حدود ۵ متری سطح زمین واقع شده است، در یک شبانه‌روز بهمن‌ماه نشان‌دهندهٔ دمای ثابت ۱۶ درجهٔ سانتی‌گراد است، در حالی که در این مدت، دمای حداقل محیط ۱۰ و حداکثر آن، ۲۹ درجهٔ سانتی‌گراد (با نوسانی برابر ۱۹ درجه) است.[۳۲]

«ت ۴» دمای حداقل و حداکثر سالیانهٔ عمق ۱ تا ۷ متری زمین در شهر یزد را نشان می‌دهد. از آنجایی که یکی از اهداف بهره‌مندی از ثبات حرارتی زمین، صرفه‌جویی در مصرف انرژی در حین تأمین آسایش حرارتی[۳۳] انسان است، مقایسهٔ دمای زمین در عمقی که امکان ساخت‌وساز معماری هست (حدود ۱۰ متر) با محدودهٔ آسایش حرارتی انسان، حاکی از کارایی این ایده در تأمین اهداف مورد نظر است. چنانچه در «ت ۴» مشاهده می‌شود دمای زمین از عمق ۴ متر به بعد به محدوده‌های آسایش حرارتی مطرح در استانداردهای معتبر دنیا بسیار نزدیک است.[۳۴]

۴. انواع روش‌های استفاده از ثبات حرارتی زمین

روش‌های استفاده از ثبات حرارتی زمین، تا حدی به رابطهٔ بین ساختمان و خاک بستگی دارد. در مواردی که ساختمان و تودهٔ زمین (خاک) از لحاظ حرارتی در تماس با هم باشند، ارتباط مستقیم و در مواقعی که جدا از یکدیگر باشند، ارتباط غیرمستقیم است. در این حالت، ساختمان با مبدل‌های حرارتی مدفون در زیرزمین مثل لوله یا کانال‌های هوا خنک می‌شود. در این قسمت، چندین مثال از روابط مختلف بین ساختمان و خاک بیان می‌گردد.

۴. ۱. ارتباط مستقیم ساختمان با خاک

ارتباط مستقیم ساختمان با خاک، تنها زمانی انجام می‌شود که دیوارهای خارجی و یا بام ساختمان، بدون هیچ‌گونه عایقی در تماس مستقیم با خاک باشد. در این حالت خاک، محیط پیرامون ساختمان محسوب می‌شود. با چنین ارتباط هدایتی، دمای سطح داخلی پوستهٔ خارجی در تماس با خاک، نزدیک به دمای زمین می‌شود. ترکیب بنا با زمین از طریق روش‌های مختلفی قابل‌دسترسی است که می‌تواند شامل یک زیرزمین معمولی، خانه‌ای که بر بام آن چمن روییده، یا حیاطی که در داخل زمین فرو رفته باشد (ت ۵).

در مناطقی که فصل زمستان نسبتاً گرم یا حتی گرم (دمای حداقل میانگین زمستان بالاتر از حدود ۱۰ درجهٔ سانتیگراد) باشد، توصیه می‌شود که تماس حرارتی مستقیم ساختمان با خاک، با حداقل مقاومت حرارتی صورت گیرد. به این معنی که عناصر ساختمانی در تماس با خاک سرد باید از مصالح با هدایت حرارتی بالا مانند بتن یا آجرهای متراکم و بدون هیچ عایق حرارتی ساخته شوند. تعبیهٔ صرفاً یک لایهٔ ضد آب در قسمت‌هایی که سطوح ساختمان با خاک در تماس است، کفایت می‌کند. از طرف دیگر، در مناطق با دمای حداقل حدود ۵ درجهٔ سانتیگراد و میانگین دمای روزانه حدود ۱۰ درجهٔ سانتیگراد در زمستان، به منظور حداقل‌سازی بار گرمایشی ساختمان، مقاومت حرارتی در عناصر پوستهٔ خارجی توصیه می‌شود.[۳۵]

۴. ۲. ارتباط غیرمستقیم ساختمان با خاک

در مناطق با زمستان‌های سرد، ساختمان باید عایق شود. ارتباط حرارتی مستقیم بین فضای داخلی و خاک پیرامون از طریق دیوارها، کف و بام با قابلیت هدایت حرارتی بالا، به دلیل میزان

19. R. Sterling, W.T. Farnan, J. Carmody, *Earth Sheltered Residential Design Manual*; S. Rawls & H.L. Wells, "Earth Sheltered Housing: The Design for a Model ESH Unit", pp. 205-217.

ت ۴. تغییرات دمای عمق ۱ تا ۷ متری زمین در شهر یزد، مأخذ: عمادیان رضوی، سیده زینب، ۱۳۹۰.

ت ۵ (صفحهٔ روبه‌رو، بالا). روش‌های مختلف ترکیب بنا با زمین، مأخذ: واتسون، دانلد، *طراحی اقلیمی، اصول نظری و کاربرد انرژی در ساختمان*، ص ۱۲۳.

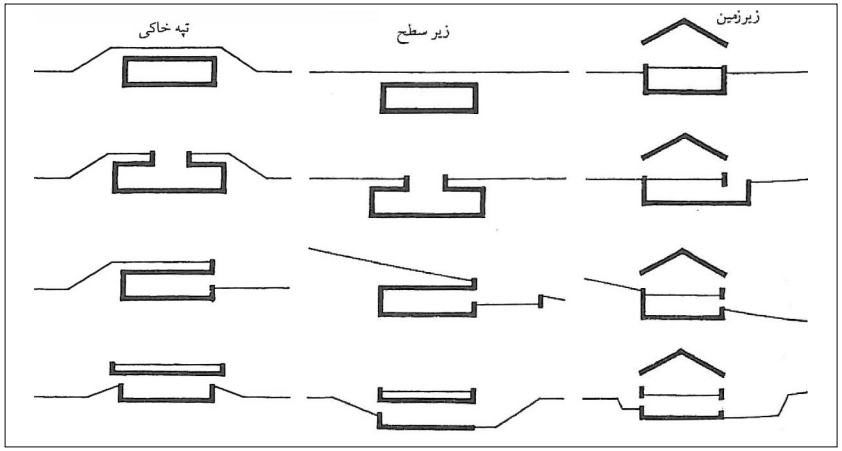
ت ۶ (صفحهٔ روبه‌رو، پایین).. خانهٔ «سینسیناتی» که با استفاده از کانال‌های زیرزمینی خنک می‌شود(روش غیرمستقیم ارتباط با خاک)، مأخذ: مور، فولر، *تنظیم شرایط محیطی در ساختمان*، ص ۲۸۱.

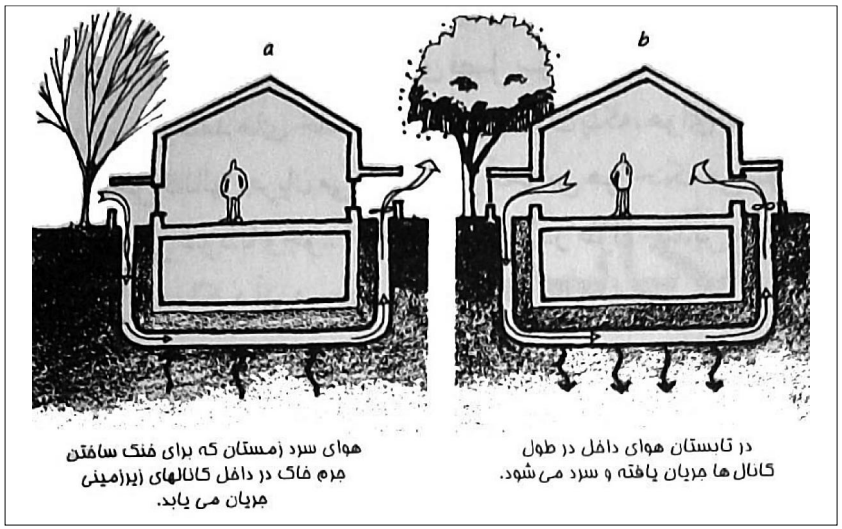
	عمق زمین						
	۱متر	۲متر	۳متر	۴متر	۵ متر	۶ متر	۷ متر
دمای حداقل سالیانه (درجه سانتی‌گراد)	۱۱/۲	۱۴/۵	۱۶/۶	۱۸	۱۹	۱۹/۷	۲۰/۱
دمای حداکثر سالیانه (درجه سانتی‌گراد)	۳۰/۸	۲۷/۵	۲۵/۴	۲۳/۹	۲۳	۲۲/۳	۲۱/۸
نوسان سالیانه	۱۹/۶	۱۳	۸/۸	۵/۹	۴	۲/۶	۱/۷

چشمگیر اتلاف حرارت در زمستان توصیه نمی‌شود. در این شرایط سیستمی مطلوب است که ارتباط بین ساختمان و خاک را در تابستان برقرار و در زمستان متوقف کند. انتقال گرما بین ساختمان و خاک با روش‌های فعال و توسط جریان اجباری آب یا هوا صورت می‌گیرد. در این روش، مبادلهٔ حرارت با خاک را می‌توان با شبکه‌ای از لوله‌ها انجام داد. روش دیگر، ساخت دیوارهای در تماس با خاک سرد به صورت دیوارهای دوجداره با لایهٔ هوا[۳۶] است. در این حالت، لایهٔ خارجی از مصالحی با قابلیت هدایت حرارتی بالا و ضد آب (از جنس بتن) که در تماس مستقیم با خاک است و لایهٔ داخلی، عایق می‌شود. بین دو لایه، هوا قرار دارد. لایهٔ خارجی دمایی نزدیک به دمای زمین پیرامون خواهد داشت. دمای آن در تابستان کمتر و در زمستان بیشتر از میانگین دمای هوای محیط و در تابستان از تابش خورشیدی محفوظ است. در طول تابستان، هوای داخل ساختمان در یک سیستم بسته با هوای بین دو لایهٔ دیوار تعویض می‌گردد و سرمایش همرفتی را برای فضای داخلی فراهم می‌کند. در زمستان، با جلوگیری از گردش هوا، لایهٔ داخلی و لایهٔ هوا، عایقی در برابر لایهٔ سرد خارجی ایجاد می‌کند. این راه‌حل در مناطقی با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد (یا تا حدودی سرد) کاربرد دارد.[۳۷]

دیاگرام چگونگی ارتباط با خاک در خانهٔ سینسیناتی که توسط فولر مور طراحی شده است، در «ت ۶» نشان داده شده است. در این خانه از یک سیستم سرمایش ترکیبی، با استفاده از کانال‌های زیرزمینی (لوله‌های پی وی سی مدفون در زیرزمین)، استفاده می‌شود. در طول زمستان، هوای سرد خارج از ساختمان با استفاده از یک فن در داخل کانال‌های زیرزمینی جریان می‌یابد و درنهایت به خارج از ساختمان تخلیه می‌شود. این چرخه «دشارژ» در زمستان، جرم خاک را به‌خوبی تا دمایی پایین‌تر از دماهای زیرزمین، سرد و بدین ترتیب آن را برای فصل تابستان آماده می‌کند. در طول تابستان نیز با بستن منفذهای خانه و با استفاده از همان فن، هوای اتاق به سمت پایین کشیده می‌شود و در داخل کانال‌ها جریان می‌یابد و پس از خنک شدن دوباره به ساختمان برگردانده می‌شود (ت ۶).

از دیگر نمونه‌های ساخته‌شده می‌توان به خانهٔ مؤلف[۳۸] در یزد اشاره کرد. در این خانه که با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و استفاده امروزی از روش‌های همسازی با





۲۰. نک:
S. Baggs & J.C. Baggs & D. Baggs, *Australian Earth-covered Building*; G. Klodt,

اقلیم در گذشته، طراحی و اجرا شده، از برودت زمین به روش مستقیم و غیرمستقیم استفاده شده است. ساخت گودال باغچه و طراحی فضایی چندمنظوره در مجاورت آن (استفادهٔ مستقیم از برودت زمین) و انتقال هوای خنک زیرزمین از عمق حدود ۶ متری از طریق کانال‌هایی به بخش‌های اصلی خانه (نشیمن و اتاق‌های خواب که در طبقهٔ همکف و اول طراحی شده‌اند)، مثالی از استفادهٔ غیرمستقیم از ثبات حرارتی زمین است. نتایج تجزیه‌وتحلیل اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در این خانه، نشان می‌دهد که دمای خشک هوای خارج‌شده از کانال زیرزمینی بین ۲۱ تا ۲۵ درجهٔ سلسیوس در تابستان متغیر است. این در حالی است که دمای محیط در گرم‌ترین ساعات روز به حدود ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مطالعهٔ تاریخی «معماری در پناه زمین» نشان می‌دهد که این نوع معماری در کشور ما نه‌تنها ایدهٔ جدیدی نیست، بلکه سابقه‌ای بسیار طولانی و ارزشمند داشته است. با توجه به مزایای قابل‌توجه این نوع معماری در زمینهٔ کاهش مصرف انرژی و آزادسازی فضای باز، «استفاده از ثبات حرارتی زمین» می‌تواند در دستور کار معماران، کارفرمایان، و سرمایه‌گذاران بخش ساختمان قرار گیرد. امید است که تحقیقات بیشتر پیرامون تمهیدات و تدابیر معمارانه و درنتیجه افزایش ساخت‌وساز این معماری، امکان بهره‌گیری از این منبع انرژی خدادادی را فراهم کند.

در این خصوص لازم است نکات زیر مد نظر قرار گیرد:

ـ لازم است در طراحی ساختمان‌های در پناه زمین، به ملاحظات معمارانه توجه شود. هر مسئلهٔ عمومی طراحی معماری، در حیطهٔ ساختمان‌های مرتبط با زمین، ویژگی‌های خاصی دارد. پیروی از یک روند سیستماتیک در مرحلهٔ طراحی می‌تواند به راه‌حل‌های مطلوبی منتهی شود. این روند گام‌های پیشنهادی زیر را طلب می‌کند:

الف. ارزیابی نگرش کاربران راجع به بنای در پناه زمین اولین گام مرحلهٔ طراحی است. لازم است تصمیم‌هایی بر اساس نیازهای روانی انسان اتخاذ شود. این تصمیم‌ها باید خواسته‌های ساکنین ساختمان و همچنین مقتضیات کاربری ساختمان (مسکونی، اداری، مدرسه، و...) را مد نظر قرار دهد. خواسته‌های افراد در خصوص نور طبیعی، تهویهٔ طبیعی، و ارتباط بصری با محیط بیرون نیز باید ملاحظه شود.

ب. تحلیل سایت که در تعریف رابطه بین ساختمان و زمین، کمک شایانی می‌کند، با توجه به نیازهای خاص این نوع ساختمان‌ها باید انجام شود. لازم است تصمیم‌هایی در خصوص روش‌های دسترسی پیاده و سواره به ساختمان اتخاذ گردد.

پ. در طراحی الگوی اولیهٔ بنا، علاوه‌بر تحلیل سایت، تحلیل اقلیمی نیز ضروری است. لازم است که تحلیل اقلیمی در طول زمستان و تابستان انجام شود. طراح باید نیاز ساختمان به گرمایش زمستانی، ظرفیت دریافت تابش خورشیدی و نیاز به سرمایش در تابستان، و تهویهٔ طبیعی را تعریف کند. دمای زیرزمین محاسبه و مزایای حرارتی اقلیم زیرزمین با محاسبهٔ جریان گرما در پوستهٔ خارجی بنا کمی‌شود. درنهایت برآورد مصرف کل انرژی الگو یا الگوهای طراحی‌شده حائز اهمیت است.

ت. مسائل تکنیکی و ساختاری، از جمله فشارهای ایجادشده از طرف زمین، عایق‌کاری رطوبتی، و زهکشی باید ملاحظه شود.

ث. هزینهٔ ساخت و هزینه‌های مصرف انرژی، تعمیرات

Earth Sheltered Housing.

21. P. Carpenter, ibid; K. Fletcher, "Home Ground", pp. 22-26

22. Adil A. Al-Mumin, ibid, p. 107.

۲۳. آلبیدو (Albedo) یک سطح، نسبت مقدار بازتابش پرتو خورشید است به کل تابش رسیده به سطح.

24. conductivity

25. Resulting diffusivity

26. Baruch Givoni, *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, p. 193.

۲۷. دانلد واتسون و کنت لبز، *طراحی اقلیمی، اصول نظری و کاربرد انرژی در ساختمان*، ص ۱۲۴.

۲۸. همان، ص ۹۰– ۹۲.

۲۹. نک: سیده‌زینب عمادیان رضوی، *ثبات حرارتی زمین و رفتار حرارتی بنا*.

۳۰. نک:
S.M.Hossein Ayatollahi, *Preserving the Traditional "Wind Catcher" to Preserve the Urban identity (Yazd-Iran)*.

۳۱. دماهای فوق در تاریخ ۱۰ ژوئن تا ۴ ژوئیه ۲۰۰۲ ثبت شده است.

۳۲. نک: عمادیان رضوی، *مروری بر معماری در پناه زمین*، پروژهٔ درس ویژهٔ ۲.

۳۳. شرایط رضایتمندی ذهن از محیط حرارتی.

و... پس از ساخت (در طول زمان استفاده) نیز تأثیرگذار است.

ج. انتخاب بین انواع مختلف ساختمان‌های در پناه زمین بر اساس تحلیل اقلیمی، تحلیل سایت، و همچنین تحلیل مسائل انسانی صورت می‌گیرد.

ـ امروزه در سطح گسترده‌ای از کشور ما، امکان بهره‌گیری از ثبات حرارتی زمین به دلیل شرایط مناسب خاک و همچنین شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک هست. در این مناطق، درصد قابل توجهی از واحدهای مسکونی به صورت تک‌خانواری (با ارتفاع حداکثر دو طبقه روی زمین) ساخته می‌شوند. پیشنهاد می‌شود که در طراحی این واحدها، چنان‌که در گذشته کوچ افقی و عمودی در خانه‌های چهار فصل مرسوم بوده است، با توجه به شرایط جدید، از کوچ عمودی استفاده شود و به زیرزمین خانه‌ها به منزلهٔ فضایی قابل‌استفاده در تابستان و یا همهٔ فصول توجه گسترده‌ای شود.

ـ با توجه به اینکه امکان بهره‌گیری از ثبات حرارتی زمین به روش‌های مستقیم یا غیرمستقیم وابسته به دمای زمین در اعماق مختلف است، لازم است قبل از هر نوع تحقیق و طراحی در خصوص ابنیهٔ در پناه زمین، دمای عمق زمین در شرایط آب‌وهوایی و اقلیمی مورد نظر محاسبه و اندازه‌گیری و بر این اساس، امکان بهره‌گیری از خاصیت حرارتی زمین در آن منطقه، نوع ارتباط با زمین، میزان عایق مورد نیاز و... پیش‌بینی شود.

ـ اگرچه در مورد هزینهٔ ساخت اولیه ساختارهای در پناه زمین اختلاف نظر زیادی هست، جای هیچ بحثی نیست که در طول زمان در مصرف انرژی و در نتیجه هزینهٔ خانوار اکیداً صرفه‌جویی خواهد شد. البته لازم است که میزان دقیق صرفه‌جویی در مصرف انرژی یک ساختمان در پناه زمین برآورد شود تا امکان مقایسهٔ آن با ساختمان‌های مشابه روی زمین فراهم شود.

ـ امروزه با گسترش شهرها، فشار بر محدودهٔ مرکزی افزایش و تقاضا برای توسعه با تراکم بالا و ساخت‌وساز بلندمرتبه، همراه با نیاز به فضاهای باز، به منظور گذران اوقات فراغت و حفاظت از کیفیت محیط مطرح می‌شود. در شهرهای با تراکم زیاد، توسعهٔ زیرزمینی می‌تواند عامل ایجاد فضاهایی باز در مراکز شهرها گردد. به‌ویژه در ساختمان‌های با مساحت بالا و کاربری عمومی، از جمله مراکز تجاری، سینماها، موزه‌ها، و... که نیاز به نور طبیعی اهمیت کمتری دارد، توسعهٔ ساختمان در زمین، نتایج ارزشمندی خواهد داشت. از جملهٔ این ساختمان‌ها می‌توان به ساختمان یونسکو در پاریس اشاره کرد که با ایدهٔ گودال باغچه و بام سبز ساخته شده است.

ـ متأسفانه امروزه ابنیهٔ در پناه زمین حاصل از معماری گذشتگان ما، در حال تخریب است و تلاش زیادی برای احیای آن‌ها نشده است. در حالی که با شناخت عمیق‌تر این فضاها و ظرفیت آن‌ها در سرمایش محیط، می‌توان به منظور احیا و فعال‌سازی این نوع فضاها، گام‌هایی برداشت. از جملهٔ این تلاش‌ها می‌توان به تحقیقات انجام‌شده در خانهٔ رسولیان (دانشکده هنر و معماری دانشگاه یزد) بر انتقال جریان هوای پایاب به فضای تابستانهٔ زیرزمین و همچنین ارتقای شرایط آسایش کتابخانهٔ واقع در گودال باغچه اشاره کرد.[۳۹]

۳۴. با مدل‌های متفاوتی در دوره‌های زمانی مختلف و با رویکردهای متنوعی در زمینهٔ آسایش حرارتی تحقیق کرده‌اند. در اکثر این مدل‌ها محدوده‌ای نزدیک به ۲۰/۵ الی ۲۴/۵ درجهٔ سانتی‌گراد را محدودهٔ آسایش زمستانه و ۲۳/۵ الی ۲۶/۵ درجهٔ سانتی‌گراد را محدودهٔ آسایش تابستانه می‌دانند. اگرچه نوع فعالیت و لباس انسان از عوامل تأثیرگذار بر این محدوده است و دامنهٔ دمایی آن را محدودتر می‌کند.

35. Baruch Givoni, ibid, p. 210

36. Double walls with an air space

37. Baruch Givoni, ibid, p. 213

۳۸. نک: سیدمحمدحسین آیت‌الهی، «ارزیابی پنج سالهٔ کارایی خانهٔ خورشیدی».

۳۹. نک: همو، «ارتقای شرایط آسایش حرارتی کتابخانهٔ دانشکده هنر و معماری با بهره‌گیری از پتانسیل‌های مکان».

منابع و مآخذ

آیت‌الهی، سیدمحمدحسین. «ارزیابی پنج سالهٔ کارایی خانهٔ خورشیدی»، در صفه، ش ۴۳ (پاییز و زمستان ۸۵)، ص ۷۲– ۹۱.

ـــــــ . «ارتقای شرایط آسایش حرارتی کتابخانهٔ دانشکده هنر و معماری با بهره‌گیری از پتانسیل‌های مکان»، پذیرش‌شده در *مجلهٔ صفه*.

بینا، محسن. «تجزیه و تحلیل شوادون‌ها در خانه‌های دزفول» در نشریه هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، شمارهٔ ۳۳، بهار ۱۳۸۷، صص۳۷–۴۶.

جعفری، صدف. *در پناه زمین*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد معماری، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی، شهریور ۱۳۸۷.

مور، فولر. *تنظیم شرایط محیطی در ساختمان*، ترجمهٔ محمدعلی کی‌نژاد و رحمان آذری، انتشارات دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ۱۳۸۲.

قبادیان، وحید. *بررسی اقلیمی ابنیهٔ سنتی ایران*، دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.

عمادیان رضوی، سیده‌زینب. *ثبات حرارتی زمین و رفتار حرارتی بنا*، پایان‌نامهٔ دکتری معماری، دانشکده معماری وشهرسازی دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۰.

ـــــــ . *مروری بر معماری در پناه زمین*، پروژهٔ درسی ویژهٔ ۲، گروه دکتری معماری دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۷.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. *بازسازی مناطق زلزله‌زده، جلد دوم، جنوب خراسان*، آذر ۱۳۸۵.

واتسون، دانلد و کنت لبز. *طراحی اقلیمی، اصول نظری و کاربرد انرژی در ساختمان*، ترجمهٔ وحید قبادیان و محمد فیض مهدوی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.

Al-Mumin, Adil A. "Suitability of Sunken Courtyards in the Desert Climate of Kuwait", in *Energy and Buildings*, No. 33 (2001), pp. 103-111

Ayatollahi, S.M.Hossein, *Preserving the Traditional "Wind Catcher" to Preserve the Urban Identity (Yazd-Iran)*, Proceedings for the first international conference: Living in Earthen Cities – Kerpic, Istanbul Technical University (TTU), Istanbul, Turkey, 05, 6-7 July 2005.

Baggs, S. & J.C. Baggs & D. Baggs, *Australian Earth-covered Building*, NSW University Press, Kensington, 1991.

Boyer, L.L. & W.T.Grondzik, "Habitability and Energy Performance of Earth Sheltered Dwellings", in *Proceedings of the Third Miami International Conference on Alternative Energy Sources*, vol. 7, Hemisphere Publishing, Miami Beach, 1983, pp. 39-64.

Carmody, J. & R.Sterling. "Design Considerations for Underground Buildings", in *Underground Space*, No. 8 (1984), pp. 352-362.

Carpenter, P. *Sod It: An Introduction to Earth Sheltered Development in England and Wales*, Coventry University, Coventry, 1994

Fletcher, K. "Home Ground", in *Building Services Journal*, No. 24(8) (2002), pp. 22-26

Givoni, Baruch. *Passivea and Low Energy Cooling of Buildings*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

Golany, G.S. *Earth-Sheltered Habitat: History, Architecture and Urban Design*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1993

Khair-el-Din, A.M. "Earth Sheltered Housing: an Approach to Energy Conservation in Hot Arid Areas", in *Ekistics*, No. 51(307) (1984), pp. 365-369

Klodt, G. *Earth Sheltered Housing*, Reston Publishing Co., Reston,VA, 1985

McMillian, J.Q., *The Earth Sheltered Home*, October9,2001

Rawls, S. & H.L. Wells, "Earth Sheltered Housing: The Design for a Model ESH Unit", in *Housing Science*, No. 12(3)(1988), pp. 205-217.

Sterling, R. & M. Tingerthal, "Building Costs and Construction Problems in the Minnesota Earth-sheltered Housing Demonstration Program", in *Underground Space*, No. 6 (1981), pp. 13-20.

Sterling, R. & W.T. Farnan & J. Carmody, *Earth Sheltered Residential Design Manual*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. Fffolj