فصلنامه علمی- پژوهشی مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی
دوره ۱۴، شماره ٤ (پیاپی ٤٩)، زمستان ۱۳۹۸
شاپای چاپی ٢٥٣٨ -٥٩٦٨ شاپای الکترونیکی ٢٥٣٨ -٥٩٥X
http://jshsp.iaurasht.ac.ir

مقاله پژوهشی
صص. ۱۰۵٦-۱۰۳٥

ارزیابی مصرف انرژی و انتشار کربن معادل در چرخه حیات جداره‌های خارجی متداول مسکن شهری، رهیافتی در توسعه پایدار انرژی (مطالعه موردی: مناطق شهر سنندج)

ایوب مرادخانی– دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

نیلوفر نیک‌قدم* – استادیار، گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

منصوره طاهباز– دانشیار، گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲ **تاریخ پذیرش:** ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

چکیده

پایداری انرژی در چارچوب توسعه پایدار محقق می‌شود. دستیابی به اهداف سیاست پایدار انرژی، یعنی تأمین امنیت، حفاظت محیط‌زیست و رشد اقتصادی، درگرو بهبود بهره‌وری انرژی است. در این راستا، پژوهش حاضر با توجه به سهم عمده مصرف انرژی در ایران توسط ساختمان‌های مسکونی، باهدف شناسایی و مقایسه تطبیقی جداره‌های خارجی متداول مسکن شهری، در قالب روشی بهره گرفته از چرخه حیات ساختمان در پی ارزیابی انرژی نهفته و آلاینده‌های زیست‌محیطی در دوره تولید و همچنین انرژی مصرفی دوره بهره‌برداری است. با توجه به رویکرد تحلیلی-توصیفی پژوهش، پس از تشریح مبانی مرتبط، نخست با روش دلفی و تحلیل سلسه مراتبی AHP فازی به شناسایی و پهنه‌بندی میزان فراوانی جداره‌های خارجی متداول مسکن در مناطق سه‌گانه شهر سنندج اقدام شد. سپس به سنجش مصرف انرژی نهفته دوره تولید با داده‌های موجود و انرژی دوره بهره‌برداری با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک بلوک شهری در نرم‌افزار Design Builder با توجه به متغیرهای مربوطه مبادرت ورزیده شد. تفسیر یافته‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تحلیل آماری ANOVA و همچنین آزمون Duncan برای مقایسه طبقه‌بندی‌ها، حاکی از رابطه معنی‌دار در سطوح انرژی نهفته دوره تولید و بهره‌برداری بین جداره‌ها و گستره آن در مناطق سه‌گانه شهر سنندج است. سهم بسیار پایین انرژی اولیه دوره نهفته در برابر دوره بهره‌برداری در مقایسه سه منطقه شهری به ترتیب ۲/۰۱، ۱/۸۷ و ۱/۸٦ سال از دوره حیات ساختمان است. نتایج پژوهش، وضعیت نامطلوب و الزام برنامه‌ریزی در سطح مدیریت شهری در خصوص کاربست جداره‌های خارجی مسکن مناطق سه‌گانه شهر سنندج را تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: توسعه پایدار انرژی، انرژی نهفته، انرژی دوره بهره‌برداری، آلاینده‌های زیست‌محیطی

نحوه استناد به مقاله:
مرادخانی، ایوب، نیک قدم، نیلوفر و طاهباز، منصوره. (۱۳۹۸). ارزیابی مصرف انرژی و انتشار کربن معادل در چرخه حیات جداره¬های خارجی متداول مسکن شهری، رهیافتی در توسعه پایدار انرژی (مطالعه موردی: مناطق شهر سنندج). *مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی*، ۱۴(۴)، ۱۰۳۵-۱۰۵۶.
http://jshsp.iaurasht.ac.ir/article_672123.html

* نویسنده مسئول
E- mail: n.nikghadam@gmail.com

مقدمه

با آغاز انقلاب صنعتی در اروپا و گستره آن در سراسر دنیا، رشد آنی جمعیت، گسترش جوامع صنعتی، آلودگی و نابودی محیط‌زیست به‌عنوان مشکلات پیش روی جهان، نگرانی‌های گسترده‌ای را به وجود آورد (Saraei & Alizadeh Shoroki, 2015)، (Baker, 2006). در این راستا رهیافت‌های عمده توسعه در قرن بیستم برای پاسخگویی به مسائل و بحران‌های ناشی از اتفاقات یادشده، شامل مدرنیزه‌سازی، اقتصاد نئولیبرالی، توسعه تناوبی و غیره بود که به دلیل ناکارآمدی آن‌ها، رهیافت توسعه پایدار به‌عنوان موضوعی نوین و راهگشا در دهه آخر قرن بیستم، پس از مطرح‌شدن در اجلاس "آینده مشترک ما" که به‌عنوان گزارش برات‌لند شناخته می‌شود، پذیرش همگانی یافت. این اجلاس منجر به تغییر در مفهوم و عمل توسعه بود (Cowen & Shenton, 2005)، (Barton et al, 2003). توسعه پایدار، حالت تعادل و توازن میان ابعاد مختلف توسعه (Maleki & Damnabagh, 2013)، در سه اصل پایداری محیط‌زیست، پایداری اقتصادی و پایداری اجتماعی که یکی از اهداف اساسی آن جستجوی تقویت ابعاد ملاحظات محیطی به‌صورت خاص است (Hataminejad & Mohammadi, 2013). پایداری انرژی در چارچوب توسعه پایدار قابل‌بررسی است. بنابراین هدف از برنامه‌های انرژی پایدار، تولید و مصرف منابع انرژی به طریق منطقی است تا در درازمدت، حیات انسان و تعادل اکولوژیکی میسر شود (Abdoli, 2003). با توجه به آمار موجود تقریباً یک‌سوم انتشار گازهای گلخانه‌ای و ۴۰٪ مصرف انرژی جهان مربوط به بخش ساختمان است که پیامدهای مخرب قابل‌توجهی برای جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به وجود می‌آورد. بنا بر گزارش محیط‌زیست سازمان ملل[1]، اثرات زیست‌محیطی (ازجمله کربن) بخش ساختمان شامل ۴۰٪ انرژی مصرفی، ۳۰٪ مصالح خام مصرفی، ۲۵٪ زباله‌های جامد، ۲۵٪ آب و ۱۲٪ استفاده از زمین است (United Nations Environmental Programme, 2008). انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهرهای جهان به‌واسطه ساختمان‌ها، سالیانه ۱٫۵٪ در حال افزایش است، این روند ممکن است همچنان افزایش یابد (Pérez, 2008). به‌طورکلی مصرف انرژی در ایران علی‌رغم قوانین مصوب و برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته و همچنین اهمیت اقتصاد مقاومتی حال حاضر، بیش از پنج برابر متوسط رشد مصرف در جهان است (Ahadi, 2002). بااین‌حال که ساختمان‌های مسکونی ایران نیز بزرگ‌ترین بخش از مصرف انرژی کشور را به خود اختصاص داده‌اند (Riyazi & Hossaini, 2011)، اما کاهش مصرف انرژی در این بخش ساده‌تر و با سرمایه‌گذاری کم‌تری نسبت به بخش‌های دیگر قابل حصول است (Nasrallahi, 2010). سیاست‌گذاری‌های متعددی در جهان در حوزه بهینه‌سازی مصرف انرژی شهر و ساختمان‌ها اتخاذشده است (Department for Communities, 2016). در وضعیت فعلی ایران، مهم‌ترین حوزه برنامه‌ریزی انرژی شامل ساختمان و عایق‌کاری پوسته خارجی (مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان) است که هرچند در حد خود بسیار ارزشمند است، اما بدون اتصال به فرآیندهای برنامه‌ریزی در سایر مقیاس‌های مرتبط، نتیجه مورد انتظار را حاصل نخواهد کرد (Mirmoghtadaee et al, 2017). بااین‌وجود، توجه اندکی به چارچوب‌های سیاست انرژی مرتبط با مصالح و فرآیندهای ساخت‌وساز ساختمان‌ها شده است. با توجه به مسائل مطرح‌شده، شناخت روند مصرف انرژی در بخش ساختمان به‌منظور رسیدن به اهداف و رویکردهای نوینی همچون توسعه پایدار شهری،[2] نو شهرسازی،[3] شهر کارا[4] و کاهش آلاینده‌های محیطی به‌عنوان مسئله حیاتی مطرح است. در این میان جداره‌های خارجی (نما)[5] ساختمان به‌عنوان عاملی تأثیرگذار و مورد تأکید مقررات ملی ساختمان (مبحث نوزدهم) و مطالعات متعدد، در انتقال یا اتلاف انرژی حرارتی، نقش مؤثری را در الگوی مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی با توجه به دوره بهره‌برداری ایفا می‌کند (Yellamraju, 2004)، (McClintock & Perry, 1997)، (Moshiri, 2015). از سویی نیز به دلیل اهمیت محاسبه انرژی نهفته اولیه جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی (Aktas & Bilec, 2012) و فقدان پژوهش‌های جامع در این زمینه، پژوهشی برای ارزیابی این شاخص‌ها در راستای اهداف توسعه محیطی پایدار ازلحاظ بهره‌وری انرژی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی موردنیاز است. لذا هدف از پژوهش کنونی ارزیابی انرژی نهفته دوره تولید و دوره بهره‌برداری و همچنین کربن معادل[6] بازه ۶۰ سال عمر ساختمان با

---

[1] The United Nations Environment Programme
[2] Sustainable Urban Development
[3] New Urbanism
[4] Energy Efficient City
[5] External Walls Of Residential Buildings
[6] carbon - equivalent (CO2eq)

تأکید بر جداره‌های خارجی متداول ساختمان‌های مسکونی شهر سنندج است. به نظر می‌رسد روشی تحلیلی- کاربردی در این خصوص، می‌تواند چشم‌اندازی وسیع در تصمیم‌گیری کارشناسان حوزه ساخت و همچنین مدیران شهری در مقیاسی کلان را فراهم آورد.

انرژی پایدار، سیستم‌های ارزیابی

ناکارآمدی سامانه‌های انرژی در تولید، توزیع و مصرف و نیز محدودیت‌های موجود در منابع، سرمایه‌گذاری‌ها، مدیریت و فناوری از عوامل عمده عدم دستیابی جوامع کنونی به انرژی پایدار، محسوب می‌شوند (Lélé, 1991). روش‌های متعددی در سنجش میزان پایداری محیطی نیل به پایداری انرژی سیستم‌های ساختمانی تدوین‌شده‌اند. در این راستا، روش چرخه حیات ساختمان[1] شکل ۱، یکی از ابزارهای مناسب برای سنجش و ارزیابی تأثیرات محیطی ساختمان از زمان تولید تا تخریب است (Alisa, 2000)، (Ramesh et al, 2010). کاربرد روش چرخه حیات ساختمان در معماری به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای رو به رشد است (Vilches et al, 2017). گاه به دلیل فقدان داده‌های مربوط به جنبه‌های مختلف مقاوم‌سازی و نوسازی و همچنین تخریب در طول دوره حیات ساختمان (Koezjakov, 2018)، با سهم حدود یک درصد از کل چرخه، نادیده انگاشته می‌شود (Stephan, 2012). از دیگر سیستم‌های ارزیابی ساختمان به‌عنوان‌مثال (BREEAM، BEPAC، HQE، VERDE، LEED و Green Globe) اهمیت آلاینده‌های نهفته دوره تولید و بهره‌برداری را به رسمیت شناخته‌اند. درواقع با صرفه‌جویی در مصرف انرژی و توجه به اولویت محیط‌زیست، می‌توان بهره‌وری انرژی را تا ۲۰٪ ارتقا داد (Acuqaye, 2010). همچنین انتخاب یک ماده ساختمانی مطلوب منجر به اثرات متعددی بر روی آلاینده‌های کربن محتوای انرژی و رفتار دوستانه محیطی[2] داشته باشد (Reddy, 2004). در این راستا تحقیقات متعددی، مصالح جداره‌های خارجی ساختمان‌ها را به‌عنوان مؤلفه کلیدی تأثیرگذار در محاسبات کل انرژی ساختمان، مورد تأکید قرار داده‌اند (Fay, 2000).

شکل ۱. مراحل اصلی (تولید، بهره‌برداری و تخریب) روش ارزیابی چرخه حیات ساختمان
(Source:Weiler et al, 2017)

انرژی نهفته

انرژی نهفته[3] و آلاینده‌های نهفته[4] شامل استخراج مواد خام، فرآوری، تولید، حمل‌ونقل، تحویل در محل، ساخت، تعمیر و نگهداری، نوسازی، تخریب نهایی و همچنین تمام فعالیت‌ها و فرآیندهای زنجیره تأمین ساختمان است که پیامدهای قابل‌توجهی برای محیط‌زیست به شمار می‌آیند. اغلب با پیش‌فرض این‌که میزان آلاینده‌های دوره بهره‌برداری یک ساختمان بیش‌تر از آلاینده‌های نهفته آن است، تلاش‌های زیادی را صرف کاهش مصرف انرژی در دوره بهره‌برداری ساختمان داشته‌اند. در این راستا نوآوری‌ها و پیشرفت‌های فنّاورانه درزمینه انرژی تجدید پذیر، بهره‌وری انرژی و انگیزه برای تغییر رفتار باعث کاهش قابل‌ملاحظه آلاینده‌های بهره‌برداری در ساختمان‌ها شده است. بااین‌حال، این اقدامات اغلب به افزایش مصرف مصالح و تقاضای انرژی بیشتر برای تولید آن‌ها شده است (Sorrell, 2007)، (Lützkendorf el at, 2015). ازاین‌رو، بخش انرژی نهفته و آلاینده‌های مربوط به آن، در طراحی ساختمان‌ها و محیط‌های پایدار بسیار موردتوجه قرارگرفته است (Nassen et al, 2007). در تحقیق رِدی و جاگادیش، انرژی نهفته یک ساختمان به‌صورت کل انرژی مرتبط با تولید آن تعریف می‌شود، به عبارتی انرژی لازم برای استخراج مواد خام، فرآوری و تولید در صورت لزوم، انتقال به سایت و قرار دادن آن‌ها کنار یکدیگر را شامل می‌شود (Reddy & Jagadish, 2003). ترِلور و همکاران انرژی نهفته را به‌صورت انرژی موردنیاز برای ارائه یک محصول (به‌طور مستقیم و غیرمستقیم) از طریق تمام فرآیندهای بالادست توصیف کردند (Treloar et al, 2001). به‌طورمعمول، انرژی نهفته به‌عنوان مقداری از انرژی به ازای هر

[1] Life Cycle Building (LCA)
[2] Environmental Friendliness
[3] Embodied Energy (EE)
[4] Embodied Emissions

واحد از مصالح، اجزاء یا سیستم ساختمانی اندازه‌گیری می‌شود. به‌عنوان‌مثال، آن را می‌توان به‌صورت مگا ژول[۱] و یا گیگا ژول[۲] در واحد وزن (کیلوگرم یا تن) و یا مساحت (مترمربع) بیان نمود (Ibn-Mohammed & et al, 2013).

انرژی دوره بهره‌برداری

به‌طورکلی انرژی دوره بهره‌برداری ساختمان درگرو میزان تبادل حرارتی (دریافت و اتلاف گرما)، دمای داخلی و مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی ساختمان به‌واسطه ویژگی‌های حرارتی انتقال گرمایی مصالح جداره خارجی ساختمان و شرایط محیطی در طول دوره استفاده است. درنتیجه، میزان انرژی بهره‌برداری به علت فناوری‌های ساخت‌وساز و روش‌های اجرایی ساختمان‌ها متفاوت است (Zhu et al, 2018). به‌طورکلی سنجش و ارزیابی تبادل حرارت در جداره‌های خارجی ساختمان با توجه به شرایط پایدار[۳] و ناپایدار حرارتی[۴] در نظر گرفته می‌شود. طبق مطالعات دسکلکایی و همکاران برای سنجش میزان بار حرارتی و مصرف انرژی چندین ساختمان، دریافتند که مصالح مورداستفاده در جداره‌های خارجی، تأثیرگذارترین متغیر در رفتار حرارتی بلوک‌های ساختمانی شهری (Dascalaki et al, 2012)، درروند مصرف انرژی مرتبط با گرمایش و سرمایش[۵] است (Kčćí et al, 2014). حال با توجه به استانداردها و مقررات ملی ساختمان در ایران مانند مبحث ۱۹، بیش‌تر محاسبات رفتار حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان با توجه به شرایط پایدار حرارتی و ثابت محیطی در نظر گرفته‌شده است. درصورتی‌که توجه به شرایط ناپایدار حرارتی و عوامل مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان در ارتباط با زمینه شهری، از قبیل شکل و چیدمان آرایشی ترکیب بلوک‌های شهری نه‌تنها بر میزان دریافت انرژی خورشیدی[۶] توسط سطوح ساختمان اثر می‌گذارد، بلکه خرد اقلیم شهری[۷] و جریان هوا را نیز در اطراف ساختمان‌ها دگرگون می‌کند، بنابراین ارزیابی رفتار حرارتی ساختمان به زمینه شهری که در آن واقع‌شده، وابسته است (Perkins et al, 2009)، (Haapio, 2012). با توجه به موارد فوق، در پژوهش حاضر، سعی بر آن است مدل‌سازی و شبیه‌سازی بر اساس شرایط واقعی (شرایط ناپایداری حرارتی) در بلوک شهری واقع در محله نور سنندج، با کنترل متغیرهای مداخله‌گر مؤثر در تحلیل انرژی سالانه و ارزیابی میزان مصرف انرژی به‌واسطه جداره‌های خارجی متداول شناسایی‌شده، سنجش گردد. لذا تحلیل انرژی در مقیاسی فراتر از ساختمان، تحت عنوان محله[۸] با توجه به شاخص‌های مؤثر در رفتار حرارتی ساختمان مدنظر است. در جدول ۱ به‌طور اختصار به این شاخص‌ها اشاره می‌شود.

جدول ۱. شاخص‌های موردبررسی در سوابق تحقیق (رفتار حرارتی بلوک‌های ساختمانی شهری در مقیاس محله)

پژوهشگر	شاخص‌های موردبررسی
هاچمن و همکاران[۹]	شکل سقف، میزان سایه‌اندازی، تراکم، جهت‌گیری در ترکیب بلوک‌های شهری.
یانگ و همکاران[۱۰]	نسبت ارتفاع به عرض (H/W)، ضریب دید آسمان (SVF)، هندسه ساختمان، ارتفاع بلوک‌ها، جرم حرارتی و ضریب هدایت حرارت مصالح جداره‌های خارجی.
صنایعیان و همکاران[۱۱]	نسبت سطح به حجم (S/V)، نسبت ارتفاع به عرض (H/W)، تراکم، جهت‌گیری ساختمان و بلوک شهری.
تسایرایگاتی و تسایکلودکی[۱۲]	نسبت سطح به حجم (S/V)، نسبت ارتفاع به عرض (H/W)، مصالح و جنس جداره بلوک‌های ساختمانی، شکل سقف، جداره خارجی شفاف (پنجره)، مصالح و جنس پوشش کف محوطه، ارتفاع، نسبت حجم ساخته‌شده به مساحت بلوک شهری (CP/PS).
نگویان‌وان و دی‌ترایر[۱۳]	ارتفاع بلوک‌های ساختمانی پیرامونی، عرض خیابان‌های منتهی به ساختمان (عمود و موازی)، فضای سبز سایت، هندسه (طول، عرض و ارتفاع) بلوک، سرعت، جهت و فشار جریان باد.

[1] Megajoul (MJ)
[2] Gigajoules (GJ)
[3] Steady State
[4] Non-Steady State
[5] heating & Cooling Energy Demand
[6] Solar Energy
[7] Urban Microclimate
[8] Urban Quarter(Quartier) :مقیاسی از تقسیمات شهری منتخب در پژوهش حاضر در بررسی رفتار حرارتی بلوک‌های شهری،۱ (تا ۲ کیلومتر)
[9] Hachem, C., Athienitis, A., & Fazio, P. (2011).
[10] Yang, X., Li, Y., & Yang, L. (2012).
[11] Sanaieian, H., Tenpierik, M., van den Linden, K., Seraj, F. M., & Shemrani, S. M. M. (2014).
[12] Tsirigoti, D., & Tsikaloudaki, K. (2018).
[13] Nguyen Van, T., & De Troyer, F. (2018).

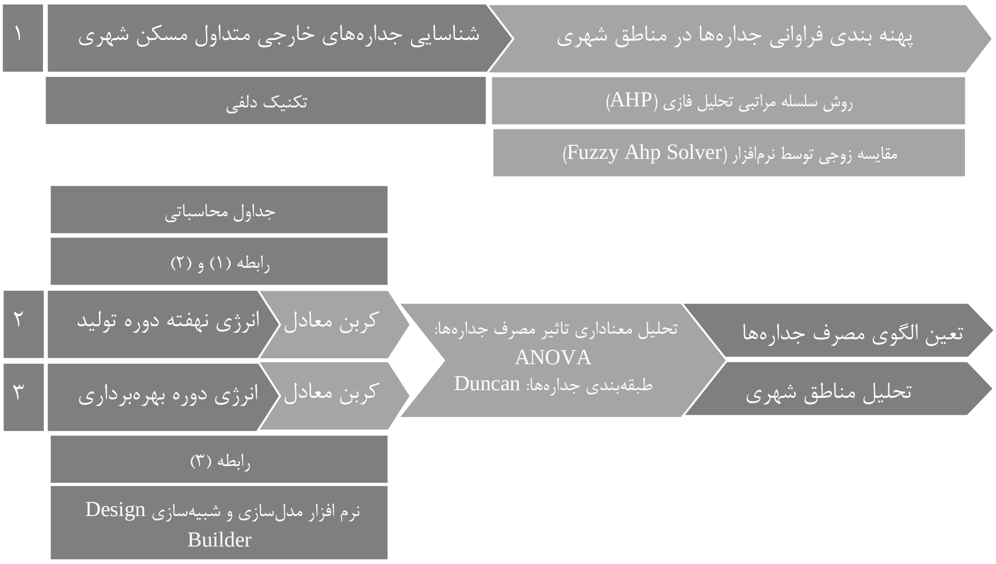
مطالعات حوزه ارزیابی انرژی دوره تولید و بهره‌برداری

مطالعات متعددی نسبت آلاینده‌های نهفته دوره تولید و دوره بهره‌برداری را در مقیاس کلان ساختمان‌های مختلف با توجه به طول حیاتشان ارزیابی کرده‌اند. تفاوت نتایج، عمدتاً به دلیل نوع و کاربری ساختمان، مصالح مصرفی، روش‌های ساخت‌وساز، تفاوت‌های موقعیت جغرافیایی و اقلیمی است. سارتوری و هِستنِس در بررسی ۶۰ مورد از تحقیقات گذشته در کشورهای مختلف، به‌طورکلی و در مقیاس کلان ارزیابی چرخه حیات ساختمان، دریافتند که آلاینده‌های نهفته می‌تواند ۲ تا ۳۸ و ۹ تا ۴۶ درصد نسبت به انرژی دوره بهره‌برداری را به ترتیب برای ساختمان‌های متعارف و انرژی کم شامل شوند (Sartori & Hestnes, 2007). در تحقیقی مشابه، رامِش و همکاران پس از بررسی انتقادی تحلیل آلاینده‌های چرخه حیات ساختمان‌ها (ازجمله ساختمان‌های مسکونی واداری) شامل ۷۳ مورد در ۱۳ کشور، نتیجه گرفتند که میزان آلاینده‌های نهفته به ازای آلاینده‌های دوره بهره‌برداری و تخریب در حدود ۱۰ تا ۲۰٪ است (Ramesh & et al, 2010). اِنجین و فرانسیس در این رابطه، بر اساس پیاده‌سازی پنج گزینه مختلف مداخله‌ای در راستای راه‌اندازی، بهره‌وری انرژی، انرژی پاک، مرمت و بازسازی نتیجه گرفتند که کربن نهفته ۱۱ تا ۵۰ درصد از آلاینده‌های چرخه حیات ۶۰ ساله ساختمان را تشکیل می‌دهند. در پژوهشی تاکانو و همکاران نشان دادند که انرژی نهفته در چرخه حیات ساختمان‌های کم‌مصرف[1]، حدود ۴۶ درصد مصرف انرژی کل را به خود اختصاص می‌دهد (Takano et al, 2015). در این خصوص چن و همکاران با بررسی در هنگ‌کنگ (Chen et al, 2001) و بیوکنن و هانی در نیوزیلند (Buchanan & Honey, 1993) نتایجی تقریباً مشابه را گزارش کرده‌اند. خاطرنشان است، علی‌رغم آن‌که بیش‌تر کشورهای اروپایی در افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها در مقایسه با دیگر قاره‌ها پیشی گرفته‌اند، اما فقدان داده‌های بنیادی در این بخش قابل‌ملاحظه است (Meijer et al, 2009). در مناطق گرمسیر، آلاینده‌های نهفته نشان‌دهنده درصد نسبتاً کمی از کل آلاینده‌های چرخه حیات هستند که ممکن است در مورد مناطق معتدل و سرد، به دلیل آلاینده‌های دوره بهره‌برداری ساختمان، برعکس باشد. گونزالس و ناوارو اظهار دارند، سهم عمده از آلاینده‌های نهفته ساختمان‌های سنتی در کشورهای درحال‌توسعه، بیشتر از آلاینده‌های دوره بهره‌برداری است (Gonzalez & Navarro, 2006). آکتاس و بیلِک در سال ۲۰۱۲ انرژی نهفته اولیه را در محدوده GJ/m^2 ۷/۳ –۱/۷ با میانگین GJ/m^2 ۴ برای ساختمان‌های مسکونی متداول و GJ/m^2 ۷/۷ –۴/۳ با میانگین GJ/m^2 ۶/۲ برای ساختمان‌های مسکونی کم انرژی محاسبه کردند. آن‌ها دریافتند که دلیل این مقدار از انرژی نهفته اولیه در ساختمان‌های کم انرژی، به ضخامت دیوارهای ساختمان و استفاده گسترده از عایق‌ها مربوط می‌شود (Aktas & Bilec, 2012).

روش پژوهش

با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته از تحقیقات پیشین، پژوهش‌ها عموماً بر روی یکی از دوره‌های مصرف انرژی ساختمان تأکید می‌کنند و گاه بدون روش‌شناسی ملموسی در مقیاسی وسیع و بدون در نظر گرفتن هر یک از عناصر ساختمانی مؤثر در مصرف انرژی، به‌صورت کلی نتایج را مطرح می‌کنند. روش ارزیابی پیشنهادی پژوهش پیش‌رو، با توجه به جداره‌های خارجی مسکن شهری با اهداف مشخص تحقیق، نه‌تنها به شناسایی، ارزیابی و مقایسه تطبیقی انرژی نهفته دوره تولید و دوره بهره‌برداری جداره‌های متداول مسکن شهر سنندج با بهره‌گیری از مدل چرخه حیات ساختمان می‌پردازد، بلکه تحلیلی در گستره این جداره‌ها با توجه به مناطق سه‌گانه شهر سنندج را مطرح می‌نماید. روش تحقیق استفاده‌شده در پژوهش پیش‌رو تحلیلی-توصیفی است. پس از تعاریف اولیه و مبانی مرتبط در سه‌گام پیشنهادی متوالی، نخست به شناسایی و پهنه‌بندی فراوانی جداره‌های متداول شهر سنندج پرداخته شد. در گام بعدی به سنجش مصرف انرژی نهفته دوره تولید با داده‌های موجود و انرژی دوره بهره‌برداری با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک بلوک شهری در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر[2] با توجه به متغیرهای مربوطه اقدام شد. تفسیر یافته‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تحلیل آماری ANOVA و همچنین آزمون Duncan برای مقایسه طبقه‌بندی‌ها استفاده شد.

---
[1] low Energy
[2] Design Builder



شکل ۲. مراحل اصلی روش پژوهش

گام نخست: در این پژوهش، برای دسته‌بندی انواع جداره‌های متداول خارجی از روش دلفی[1] استفاده شد. در تکنیک دلفی معمولاً از نظرسنجی کارشناسی برای استخراج داده‌ها استفاده می‌شود (Windle, 2004). ابتدا به مطالعه پیشینه متخصصین در حوزه نظارت و اجرا سازمان نظام‌مهندسی به‌عنوان مرجع ذی‌صلاح و ناظر برساخت مسکونی پرداخته شد. سپس تعداد ۲۰ متخصص که اکثراً دارای پروانه مهندسی پایه یک و پایه ارشد از رشته‌های معماری و عمران به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. هدف این است که توافق نظر گروهی در خصوص انواع جداره‌های متداول خارجی و پهنه‌بندی بر اساس مناطق سه‌گانه شهر سنندج به دست آید. در مرحله اول سؤالات کلی در مورد انواع جداره‌های متداول خارجی و میزان فراوانی آن‌ها پرسیده شد. پس‌ازآن، نتایج به گونه‌بندی اولیه از جداره‌های متداول خارجی سازمان‌دهی شد و تکرارها حذف گردید. در مرحله دوم پرسش‌نامه نهایی برای همان متخصصان یا گروه کارشناسان در جهت ارزیابی میزان فراوانی جداره‌های متداول خارجی مسکن شهری سنندج بر اساس نقشه محله بندی عرفی در قالب مناطق سه‌گانه شهر سنندج تنظیم شد. مجدداً نتایج سازمان‌دهی شدند، اما این بار میانگین و حدفاصل برای هرگونه محاسبه شد. در آخرین مرحله پرسشنامه یعنی مرحله سوم از متخصصان خواسته شد تا با توجه به نمرات میانگین و حدفاصل برای هرگونه از جداره‌های خارجی شناسایی‌شده، هر منطقه را بازبینی کنند. این فرآیند نهایی، اتفاق‌نظر عمومی را در مورد ترتیب رتبه‌بندی ارزیابی جداره‌های متداول خارجی در هر منطقه فراهم می‌کند. برای اندازه‌گیری وزن انواع جداره‌های متداول خارجی مسکن در مناطق سه‌گانه شهر سنندج، از روش سلسله مراتبی تحلیل فازی[2] استفاده شد. در این راستا، به‌منظور تعیین پهنه‌بندی انواع جداره‌های متداول خارجی از مقایسه زوجی توسط نرم‌افزار (Fuzzy Ahp Solver) بهره گرفته شد. سپس نتایج وارد نرم‌افزار اکسل شد و پس‌ازآن نقشه پهنه‌بندی به‌وسیله نرم‌افزار (GIS)[3] شکل ۴ تهیه گردید.

گام دوم: جهت محاسبه انرژی نهفته و کربن معادل تمامی لایه‌های مصالح جداره‌های خارجی ساختمان، بر اساس مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها، از رابطه (۱) استفاده شد. به‌عنوان‌مثال، در مورد سیمان، انرژی نهفته (E) به ازای هر کیلوگرم، می‌تواند با استفاده از رابطه زیر برآورد شود:

$$E= (1 + M) (Cx_c + Sx_s + Ax_A + Wx_W + Rx_R + Px_P + O) + T \quad (۱)$$

[1] Delphi
[2] Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP)
[3] Geographic Information System (Science)

که در آن M ضریب هدر رفت (٪) و C، S، A، W، R و P به ترتیب عبارت‌اند از وزن (kg) سیمان، شن، سنگ‌دانه، آب، جایگزین‌های سیمان و مواد روان کننده، O انرژی دوره بهره‌برداری و T انرژی حمل‌ونقل محصول نهایی است. پارامترهای X_C، X_S، X_A، X_W، X_R و X_P به ترتیب ضرایب انرژی نهفته ۶ مصالح شناسایی‌شده در لایه بیرونی جداره‌های خارجی متداول است. مبنای محاسبات، بانک اطلاعاتی انرژی نهفته و ضریب کربن از جداول دستاوردهای پژوهش همون و جونز است (Hammond & Jones, 2008). انرژی نهفته اولیه مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود (Ramesh et al, 2010):

$$EE_i = \sum m_i M_i + E_c \qquad (۲)$$

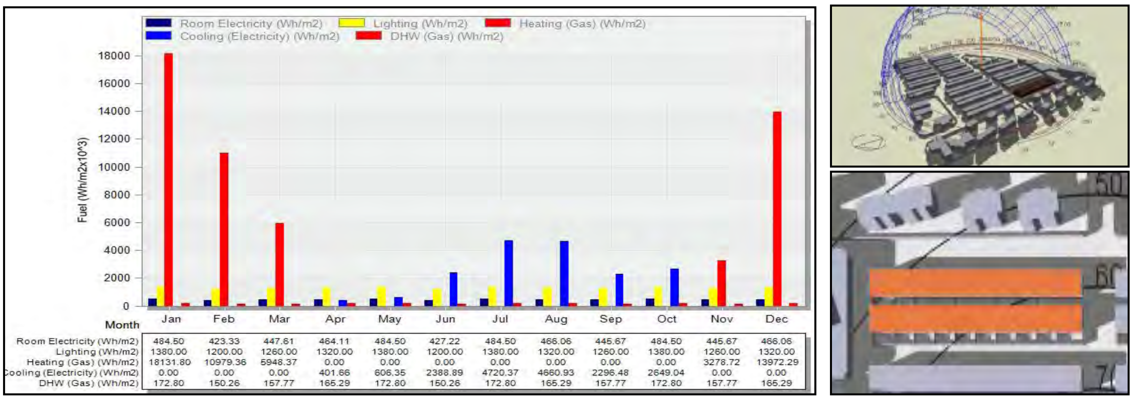
که در آن EE_i= انرژی نهفته اولیه؛ m_i = مقدار مصالح ساختمانی (i)؛ M_i = مقدار انرژی مصالح (i) به ازای هر واحد؛ E_c = انرژی استفاده‌شده در محل برای نصب/ساخت‌وساز اجزای ساختمان است.

گام سوم: رابطه (۳) (Ramesh et al, 2010) مبنای محاسبه انرژی دوره بهره‌برداری با توجه به چرخه حیات ساختمان، شامل گرمایش، سرمایش و (تهویه مطبوع)[1] و همچنین مصارف خانگی است. میزان مصرف انرژی در این دوره، به‌واسطه سطح آسایش موردنیاز، شرایط آب و هوایی و برنامه استفاده ساکنین متغیر است.

$$OE = E_{OA} L_b \qquad (۳)$$

که در آن OE= انرژی مصرفی در طول دوره حیات ساختمان؛ E_{OA}= انرژی مصرفی سالیانه؛ L_b= طول عمر ساختمان است. در این بخش از پژوهش بنا بر توضیحات مطروحه در بخش ادبیات موضوع، جهت برآورد انرژی دوره بهره‌برداری به‌واسطه جداره‌های خارجی متداول شناسایی‌شده، از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر استفاده می‌شود. مدل مورد ارزیابی‌شده، یکی از بلوک‌های محله نور سنندج با توجه به مدل‌سازی ساختمان‌های اطراف (مقیاس محله) است. متغیر وابسته؛ میزان مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی در بلوک شهری و متغیر مستقل، انواع جداره‌های شناسایی‌شده متداول جدول ۲ است. متغیرهای متعددی مانند داده‌های اقلیمی، برنامه حضور ساکنین، نسبت سطح جداره‌های شفاف (پنجره) به دیوار[2] و ملحقات آن مانند نوع سایبان، مصالح سقف طبقات و بام، تعویض هوا[3] بر اساس وضع موجود در مدل یکسان در نظر گرفته شد. به این منظور متغیرهای مداخله‌گر شناسایی‌شده در قالب پرسش‌نامه‌ای بر اساس فرمول کوکران و نمونه‌گیری طبقه‌ای و همچنین مشاهده و برداشت میدانی به‌صورت کمی اعمال گردید. داده‌های اقلیمی مورداستفاده در شبیه‌سازی با توجه به ایستگاه هواشناسی سنندج تعیین شد. سپس از طریق نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با توجه به مستندات اعتبار داده‌های نرم‌افزار در پژوهش‌های پیشین[4]، نتایج ۳۶ شبیه‌سازی مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی تحلیل شدند. شبیه‌سازی این پژوهش در بازه زمانی سالیانه در نظر گرفته‌شده و اعتبارسنجی نتایج در مقایسه با میزان انرژی مصرفی درمجموع فیش‌های برق و گاز سالیانه بلوک شهری منتخب، انجام شد.

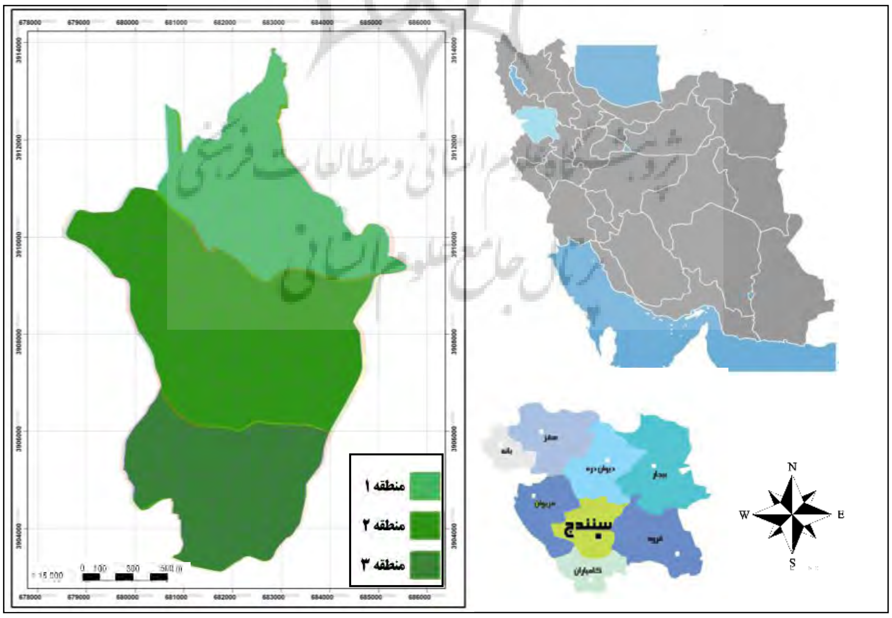
[1] Heating, Ventilation and Air Conditioning
[2] Window–Wall ratio in building facade
[3] Air Exchange
[4] Design Builder SBEM Approval, Available in: http://designbuilder.co.uk



شکل ۳. نمونه‌ای از داده‌های شبیه‌سازی مصرف انرژی بلوک شهری با توجه به جداره CB2-3(c) در ۱۲ ماه سال توسط نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر (5.4.0.021) با موتور انرژی پلاس (6.8)

قلمرو جغرافیایی پژوهش

شهر سنندج، مرکز استان کردستان در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۱۵ درجه طول غربی از نصف‌النهار تهران قرار دارد. متوسط ارتفاع شهر سنندج از سطح دریا معادل ۱۵۳۵ متر است که در پست‌ترین نقطه ۶۰۰ متر و همچنین کوه آبیدر به‌عنوان بلندترین نقطه ۲۵۵۰ متر است. در گروه‌بندی ساختمان‌ها ازنظر نیاز به صرفه‌جویی انرژی در راهنمای مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۸۷)، شهر سنندج با سه منطقه شهری در اقلیم سرد کوهستانی با نیاز انرژی متوسط مطابق شکل ۴، به‌عنوان نمونه موردی مطالعه در پهنه‌بندی جداره‌های متداول خارجی مسکن انتخاب‌شده است. بلوک شهری مورد تحلیل با توجه به غالب بودن بلوک‌های نواری دو ردیفی در گونه شناسی بلوک‌های مسکونی سنندج، (به منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی مصرف انرژی دوره بهره‌برداری) مطابق شکل ۳، در محله نور واقع در منطقه ۲ مبنای محاسبات قرار گرفت.



شکل ٤. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (مناطق سه‌گانه شهر سنندج)

متوسط دمای شهر سنندج در زمستان به محدوده پایینی دما و در تابستان به محدوده بالایی دما نزدیک است. لذا این شهر در زمستان‌ها سرد و تابستان‌ها گرم است. دمای هوا در ماه‌های جون، جولایی و اوت بالاتر از محدوده آسایش حرارتی بوده و در ماه-

های جون تا می و اکتبر تا دسامبر دما پایین‌تر از محدوده مذکور است، بر این اساس محدوده آسایش در ماه‌های سالیانه شهر سنندج در ماه‌های جون و سپتامبر است. رطوبت نسبی بیشینه ۶۹ درصد در ماه ژانویه و رطوبت نسبی کمینه ۲۱ درصد در ماه جون تجربه می‌شود. بر اساس گلباد سالانه شهر سنندج، باد غالب در طول سال از جهت شمال و شمال غربی می‌وزد. ساعت‌های آفتابی سالیانه در حدود ۲۹۹۴ ساعت است که بیشترین آن در ماه جون و کمترین به ژانویه تعلق دارد.

یافته‌ها و بحث

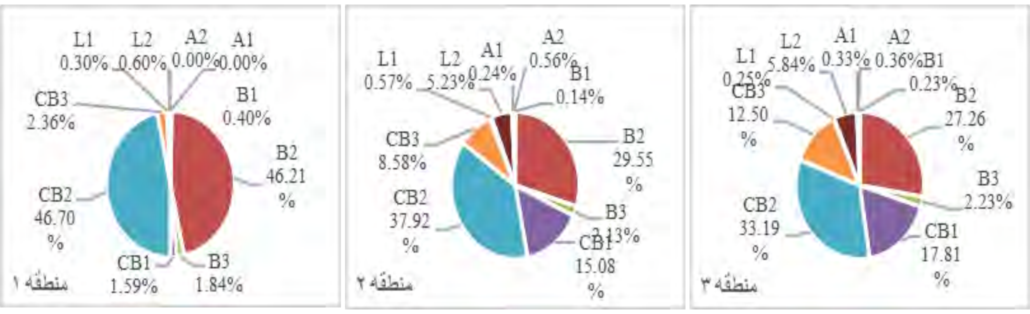
بر اساس گام نخست بخش روش پژوهش، نتایج حاصل از پیمایش، تمامی انواع جداره‌ها در ۱۰ نوع اصلی و ۳۶ زیرمجموعه طبقه‌بندی شدند. انواع جداره‌های متداول خارجی ساختمان‌های مسکونی شهر سنندج در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۲. الگوهای متداول جداره‌های خارجی مسکن شهری سنندج

	الگو جداره خارجی	لایه‌های تشکیل‌دهنده	نوع پوشش خارجی			
			بدون پوشش	سنگ نما	آجرنما	پوشش سیمانی
۱	B1- آجر فشاری (۱۰cm)	e + f + B1 + g	(B1-1)	(B1-2)	(B1-3)	(B1-4)
۲	B2- آجر فشاری (۲۰cm)	e + f + B2 + g	(B2-1)	(B2-2)	(B2-3)	(B2-4)
۳	B3- آجر سوراخ‌دار (۱۰cm)	e + f + B3 + g	(B3-1)	(B3-2)	(B3-3)	(B3-4)
۴	CB1- بلوک سفالی توخالی (۲۰cm)	e + f + CB1 + g	(CB1-1)	(CB1-2)	(CB1-3)	(CB1-4)
۵	CB2- بلوک سفالی توخالی (۱۵cm)	e + f + CB2 + g	(CB2-1)	(CB2-2)	(CB2-3)	(CB2-4)
۶	CB3- بلوک سفالی توخالی فوم‌دار (۱۵cm)	e + f + CB3 + g	(CB3-1)	(CB3-2)	(CB3-3)	(CB3-4)
۷	L1- بلوک لیکا (۱۰cm)	e + f + L1 + h + L1 + g	(L1-1)	(L1-2)	(L1-3)	–
۸	L2- بلوک لیکا (۲۰cm)	e + f + L1 + g	(L2-1)	(L2-2)	(L2-3)	–
۹	A1- AAC هبلکس (۱۰cm)	e + f + A1 + h + A1 + g	(A1-1)	(A1-2)	(A1-3)	–
۱۰	A2- AAC هبلکس (۱۵cm)	e + f + A2 + g	(A2-1)	(A2-2)	(A2-3)	–

در این جدول نوع پوشش شامل: لایه‌های تشکیل‌دهنده: آستر رنگ‌روغنی و اندود گچ ۰،۵cm (e)، ملات گچ‌وخاک cm ۲،۵ (f)، ملات ماسه سیمان ۳cm (g)، عایق پلی استایرن ۵cm (h) است.

میزان فراوانی جداره‌های شناسایی‌شده در مناطق شهر سنندج مطابق جدول ۳ و شکل ۵، در منطقه ۱ استفاده از آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری و بلوک سفالی توخالی ۱۵ سانتی‌متری بیش‌ترین درصد فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. در مناطق ۲ و ۳ علاوه بر این دوجداره، بلوک سفالی توخالی ۲۰ سانتی‌متری نیز در اولویت سوم فراوانی جداره‌ها قرارگرفته است، همچنین استفاده از مصالح جدید با ضریب هدایت حرارتی کم با درصدی پایین مانند بلوک لیکا و هبلکس در این دو منطقه مشهود است. به نظر می‌رسد در این تحلیل میزان فراوانی، عوامل متعددی مانند وضعیت اقتصادی، اجتماعی، مسائل اجرایی- نظارتی و در دسترس بودن مصالح ساختمانی نقش بسزایی در کاربست جداره‌های مناطق شهری سنندج دارد.



شکل ۵. نسبت فراوانی جداره‌های خارجی متداول در مناطق سه‌گانه سنندج (روش سلسله مراتبی تحلیل فازی)

جدول ۳. درصد فراوانی انواع جداره‌های خارجی متداول شناسایی‌شده در سه منطقه شهری سنندج

الگوهای متداول	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
	A2	A1	L2	L1	CB3	CB2	CB1	B3	B2	B1
منطقه ۱	۰	۰	۰,۶۰	۰,۳۰	۲,۳۶	۴۶,۷	۱,۵۹	۱,۸۴	۴۶,۲۱	۰,۴۰
منطقه ۲	۰,۵۶	۰,۲۴	۵,۲۳	۰,۵۷	۸,۵۸	۳۷,۹۲	۱۵,۰۸	۲,۱۳	۲۹,۵۵	۰,۱۴
منطقه ۳	۰,۳۶	۰,۳۳	۵,۸۴	۰,۲۵	۱۲,۵	۳۳,۱۹	۱۷,۸۱	۲,۲۳	۲۷,۲۶	۰,۲۳

بر اساس گام دوم بخش روش پژوهش، نتایج نهایی برآورد انرژی نهفته اولیه و کربن معادل برای هر مترمربع جداره‌های متداول خارجی ساختمان‌های مسکونی در جدول ۴ نشان داده‌شده است. با توجه به اینکه متغیر اصلی پژوهش کنونی جداره‌های متداول خارجی مسکن شهری است، لذا تمامی مصالح بکار رفته شده در اجزا مختلف ساختمانی مانند جنس اسکلت، کف، سقف، دیوارهای داخلی و غیره محاسبه و ثابت در نظر گرفته شد. بر این اساس مقدار انرژی نهفته برای هر مترمربع بلوک شهری مطالعاتی برای مصالح ذکرشده به‌غیراز متغیر اصلی (جداره‌های متداول خارجی مسکن شهر سنندج) ۳۵۴۶ مگا ژول بر مترمربع برآورد شد. بنابراین داده‌های اشاره‌شده در جدول ۴ صرفاً انرژی نهفته جداره‌ها است.

جدول ٤. نتایج کل انرژی نهفته اولیه (MJ/m^2) و کربن معادل برای هر مترمربع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی در شهر سنندج

	الگوی جداره‌های متداول خارجی با نوع پوشش خارجی مختلف							
	بدون پوشش		سنگ نما		آجرنما		پوشش سیمانی	
۱	(B1-1)		(B1-2)		(B1-3)		(B1-4)	
	C :۱۱,۲۵۴	e :۵۰۴	C :۱۵,۱۳۲	e :۷۹۳	C :۱۶,۹۴۸	e :۶۷۷	C :۱۴,۹۰۸	e :۵۹۲
۲	(B2-1)		(B2-2)		(B2-3)		(B2-4)	
	C :۲۱,۴۵۴	e :۹۲۹	C :۲۵,۳۳۲	e :۱۲۱۸	C :۲۷,۱۴۸	e :۱۱۰۲	C :۲۵,۱۰۸	e :۱۰۱۷
۳	(B3-1)		(B3-2)		(B3-3)		(B3-4)	
	C :۸,۸۵۴	e :۴۰۴	C :۱۲,۷۳۲	e :۶۹۳	C :۱۴,۵۴۸	e :۵۷۷	C :۱۲,۵۰۸	e :۴۹۲
۴	(CB1-1)		(CB1-2)		(CB1-3)		(CB1-4)	
	C :۸,۲۵۴	e :۳۷۹	C :۱۲,۱۳۲	e :۶۶۸	C :۱۳,۹۴۸	e :۵۵۲	C :۱۱,۹۰۸	e :۴۶۷
۵	(CB2-1)		(CB2-2)		(CB2-3)		(CB2-4)	
	C :۶,۴۵۴	e :۳۰۴	C :۱۰,۳۳۲	e :۵۹۳	C :۱۲,۱۴۸	e :۴۷۷	C :۱۰,۱۰۸	e :۳۹۲
۶	(CB3-1)		(CB3-2)		(CB3-3)		(CB3-4)	
	C :۷,۰۰۱	e :۳۳۲	C :۱۰,۸۷۹	e :۶۲۱	C :۱۲,۶۹۵	e :۵۰۶	C :۱۰,۶۵۵	e :۴۲۱
۷	(L1-1)		(L1-2)		(L1-3)		–	
	C :۱۶,۸۱۲	e :۷۶۹	C :۱۸,۶۲۸	e :۶۵۳	C :۱۶,۵۸۸	e :۵۶۸	–	
۸	(L2-1)		(L2-2)		(L2-3)		–	
	C :۱۳,۳۳۲	e :۶۶۸	C :۱۵,۱۴۸	e :۵۵۲	C :۱۳,۱۰۸	e :۴۶۷	–	
۹	(A1-1)		(A1-2)		(A1-3)		–	
	C :۱۱,۶۰۴	e :۸۷۹	C :۱۳,۴۲	e :۷۶۳	C :۱۱,۳۸	e :۶۷۸	–	
۱۰	(A2-1)		(A2-2)		(A2-3)		–	
	C :۷,۲۴۲	e :۶۶۵	C :۹,۰۵۸	e :۵۴۹	C :۷,۰۱۸	e :۴۶۴	–	

(در این جدول؛ انرژی نهفته اولیه (e)، میزان کربن (c) است)

بر اساس این جدول، واضح است که انرژی نهفته و کربن معادل جداره‌هایی با نوع «بدون پوشش» کم‌تر از انواع دیگر پوشش‌های خارجی است. این مسئله از ابتدا مشخص بود، زیرا مصالح ساختمانی برای لایه بیرونی دیوارها استفاده‌نشده است. بین پوشش

سنگی و پوشش آجری، پوشش آجری انرژی نهفته اولیه کم‌تری دارد. نتایج تحلیل ANOVA برای انرژی نهفته اولیه دیوارهای متداول خارجی در جدول ۵ و آزمون Duncan برای مقایسه طبقه‌بندی جداره‌های خارجی در جدول ۶ نشان داده‌شده است.

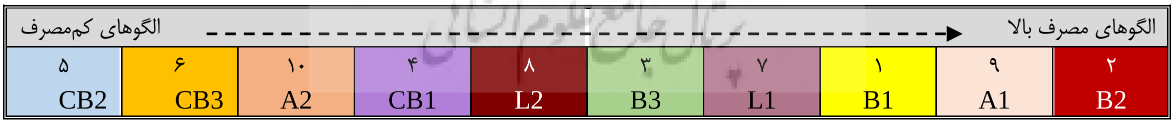
جدول ۵. نتایج تحلیل ANOVA برای انرژی نهفته اولیه

منبع تغییرات	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	F	Sig.
بین گروه‌ها	۹۰۷۳۷۲,۷	۹	۱۰۰۸۱۹,۱۸۹	۹,۹۱۴	۰,۰۱
درون گروه‌ها (خطا)	۲۰۳۳۹۶	۲۰	۱۰۱۶۹,۸		
جمع کل	۱۱۱۰۷۶۸,۷	۲۹			

جدول ٦. آزمایش Duncan برای مقایسه مقادیر انرژی نهفته اولیه

الگوی جداره	تعداد	Subset for alpha = ۰,۰۱		
		۱	۲	۳
۵	۳	۵۲۴۹,۳۳		
۶	۳	۵۲۷۸	۵۲۷۸	
۱۰	۳	۵۳۲۱,۳۳	۵۳۲۱,۳۳	
۴	۳	۵۳۲۴,۳۳	۵۳۲۴,۳۳	
۸	۳	۵۳۲۴,۳۳	۵۳۲۴,۳۳	
۳	۳	۵۳۴۹,۳۳	۵۳۴۹,۳۳	
۷	۳	۵۴۲۵,۳۳	۵۴۲۵,۳۳	
۱	۳	۵۴۴۹,۳۳	۵۴۴۹,۳۳	
۹	۳		۵۵۳۵,۳۳	
۲	۳			۵۸۷۴,۳۳
Sig.		۰,۰۴۶	۰,۰۱۲	۱

نتایج تحلیل تفاوت انرژی نهفته اولیه در سطوح انواع جداره‌های مختلف معنی‌دار بود. پایین‌ترین میزان انرژی اولیه متعلق به جداره نوع ۵ (بلوک سفالی سوراخ‌دار ۱۵ سانتی‌متری) و بالاترین میزان انرژی اولیه متعلق به جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری)، به ترتیب برابر ۴۴۱/۵ و ۱۰۶۶/۵ مگا ژول بر مترمربع است. همچنین پایین‌ترین سطح CO_2eq متعلق به جداره نوع ۱۰ (بلوک هبلکس AAC ۱۵ سانتی‌متری) با لایه میانی از پلی‌استایرن منبسط و بالاترین سطح CO_2eq متعلق به جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری)، به ترتیب برابر ۷/۷۷۳ و ۲۴/۷۶۱ است.



شکل ۵. طبقه‌بندی مقادیر انرژی نهفته اولیه کل بر اساس تأثیر جداره‌های متداول خارجی برگرفته از آزمون Duncan

همچنین منطقه شهری ۱ دارای بیش‌ترین مصرف انرژی نهفته و کربن معادل و منطقه شهری ۳ دارای کم‌ترین مصرف انرژی نهفته و کربن معادل برای هر مترمربع جداره‌های خارجی است که این امر به دلیل سهم بالای درصد جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری) در مناطق شهری ۱ (۴۶,۲۱ درصد) و سهم کم‌تر آن در منطقه شهری ۲ و ۳ (۲۷,۲۶ درصد) است. خوشبختانه بسیاری از ساختمان‌ها در شهر سنندج در هر ۳ منطقه شهری دارای الگوی جداره نوع ۵ (CB2) هستند، بنابراین در مورد انرژی نهفته، به نظر می‌رسد که شرایط مناسبی داشته باشد، اما در مقابل، میزان فراوانی جداره نوع ۲ (B2) بالا و نزدیک به جداره نوع ۵ است. ازآنجایی‌که آجر فشاری (۲۰ سانتی‌متری) دارای بالاترین میزان انرژی نهفته است، مقدار زیادی هدر رفت انرژی برای این نوع جداره اتفاق می‌افتد؛ بنابراین به نظر می‌رسد که برای الگوی ساخت‌وساز در خصوص جداره‌های خارجی ساختمان، نیاز به تغییر و تجدیدنظر اساسی در محدوده مناطق سه‌گانه سنندج وجود دارد. آجر فشاری سنتی از قدیمی‌ترین و در دسترس‌پذیر مصالح

ساخت‌وساز در منطقه تحقیق است. لازم به ذکر است که محاسبات این بخش‌بر اساس داده‌های بین‌المللی است، لذا بومی‌سازی این داده‌ها به علت متغیر بودن در شرایط جغرافیایی و فناوری مواد و مصالح ساختمانی برای دقت و صحت داده‌ها اهمیت زیادی دارد.

بر اساس گام سوم بخش روش پژوهش، نتایج نهایی انرژی دوره بهره‌برداری برای هر مترمربع جداره‌های خارجی متداول ساختمان‌های مسکونی در منطقه تحقیق در جدول ۷ نشان داده‌شده است.

جدول ۷: نتایج کل انرژی دوره بهره‌برداری (kWh/m^2) و کربن معادل برای هر مترمربع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی در شهر سنندج

	الگوی جداره‌های متداول با نوع پوشش خارجی مختلف							
	بدون پوشش		سنگ نما		آجرنما		پوشش سیمانی	
۱	(B1-1)		(B1-2)		(B1-3)		(B1-4)	
	C :۳۱۷,۷۹	e :۹۰۳,۹۳	C :۲۶۸,۷۴	e :۷۶۴,۴۲	C :۲۴۷,۸۶	e :۷۰۵,۰۱	C :۲۵۶,۷۹	e :۷۳۰,۴۲
۲	(B2-1)		(B2-2)		(B2-3)		(B2-4)	
	C :۲۱۴,۶۲	e :۶۱۰,۴۵	C :۱۹۷,۷۸	e :۵۶۲,۵۵	C :۱۸۸,۸۵	e :۵۳۷,۱۶۲	C :۱۹۲,۷۸	e :۵۴۸,۳۳
۳	(B3-1)		(B3-2)		(B3-3)		(B3-4)	
	C :۲۶۶,۶۷	e :۷۵۸,۵۲	C :۲۳۸,۱۷	e :۶۷۷,۴۶	C :۲۲۱,۷۵	e :۶۳۰,۷۴	C :۲۲۸,۲۰	e :۶۴۹,۰۹
۴	(CB1-1)		(CB1-2)		(CB1-3)		(CB1-4)	
	C :۱۷۲,۵۷	e :۴۹۰,۸۵	C :۱۶۳,۸۷	e :۴۶۶,۱۲	C :۱۵۸,۶۵	e :۴۵۱,۲۷	C :۱۶۱,۱۹	e :۴۵۸,۴۸
۵	(CB2-1)		(CB2-2)		(CB2-3)		(CB2-4)	
	C :۲۰۰,۴۴	e :۵۷۰,۱۱	C :۱۸۶,۶۳	e :۵۳۰,۸۴	C :۱۷۹,۱۷	e :۵۰۹,۶۳	C :۱۸۱,۷۴	e :۵۱۶,۹۴
۶	(CB3-1)		(CB3-2)		(CB3-3)		(CB3-4)	
	C :۱۵۱,۴۹	e :۴۳۰,۸۹	C :۱۴۲,۳۸	e :۴۰۴,۹۸	C :۱۳۹,۵۲	e :۳۹۶,۸۴	C :۱۴۱,۰۹	e :۴۰۱,۳۲
۷	(L1-1)		(L1-2)		(L1-3)		-	
	C :۱۰۰,۶۶	e :۲۸۶,۳۱	C :۹۹,۹۸	e :۲۸۴,۳۹	C :۱۰۰,۳۴	e :۲۸۵,۴۰	-	
۸	(L2-1)		(L2-2)		(L2-3)		-	
	C :۱۶۸,۸۴	e :۴۸۰,۲۵	C :۱۶۳,۴۱	e :۴۶۴,۷۹	C :۱۶۵,۷۸	e :۴۷۱,۵۳	-	
۹	(A1-1)		(A1-2)		(A1-3)		-	
	C :۹۷,۷۵	e :۲۷۸,۰۳	C :۹۷,۷۸	e :۲۷۸,۱۱	C :۹۷,۸۶	e :۲۷۸,۳۴	-	
۱۰	(A2-1)		(A2-2)		(A2-3)		-	
	C :۱۴۹,۸۰	e :۴۲۶,۰۹	C :۱۴۹,۸۰	e :۴۲۶,۰۹	C :۱۴۷,۸۶	e :۴۲۰,۵۵	-	

در این جدول انرژی مصرفی (گرمایش و سرمایش) دوره بهره‌برداری (e)، میزان کربن (c) است.

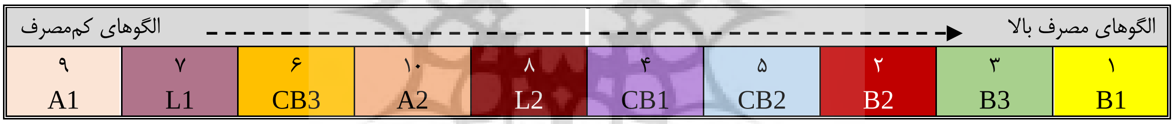
انرژی دوره بهره‌برداری و کربن معادل نوع «بدون پوشش» بیش‌تر از انواع دیگر پوشش‌های خارجی است. پوشش سنگی، پوشش سیمانی و پوشش آجری به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان مصرف انرژی دوره بهره‌برداری را به خود اختصاص داده است. بر اساس تحلیل جداره‌ها در شرایط ناپایدار حرارتی که مورد تأکید این پژوهش است، جرم حرارتی شامل (چگالی، ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی) تأثیرگذارترین عامل در رفتار حرارتی و مصرف انرژی ساختمان است. ظرفیت حرارتی بالا مقدار حرارت قابل‌جذب در ماده را افزایش می‌دهد، بنابراین مصالح با چگالی زیاد، حرارت بیشتری جذب می‌کند و به ضریب هدایت حرارتی یک ماده کمک می‌کند تا ظرفیت حرارتی یک ماده کارآمد گردد (Anbouhi, 2016). از سویی شرایط فیزیکی (پر و خالی بودن مصالح مصرفی جداره‌ها) رفتار حرارتی بلوک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر اساس محاسبات در شرایط پایدار حرارتی انتظار می‌رود مصالحی که ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند، در مصرف سالانه انرژی، بهینه‌تر عمل کنند، اما صرفاً توجه به محاسبه و نتیجه‌گیری بر اساس ضریب هدایت حرارتی (شرایط پایدار حرارتی) روشی جامع برای ارزیابی تأثیر جداره‌ها نخواهد بود. درواقع ساختارهای مختلف باقابلیت عایق گرمایی یکسان (U- value)، ویژگی‌های رفتاری متفاوتی ازلحاظ تعامل با حرارت محیط و تعدیل نوسانات هوای فضای داخلی از خود بروز می‌دهند. با توجه به طبقه‌بندی جداره‌ها بر اساس مصرف سالانه در دوره بهره-

برداری باوجوداینکه جداره‌هایی با ضریب هدایت حرارتی پایین لحاظ شده است، اما ازنظر تعدیل شرایط آب و هوایی و تأمین آسایش ساکنین دارای عملکرد و نتایج متغیر هستند. این نتایج، کم‌ترین میزان مصرف انرژی دوره بهره‌برداری مربوط به جداره نوع ۹ (بلوک هبلکس ۱۰ سانتی‌متری با لایه میانی پلی استایرن)، برابر با ۲۷۸/۰۳ کیلووات ساعت در مترمربع بود. همچنین بیش‌ترین میزان مصرف انرژی مربوط به جداره نوع ۱ (آجر فشاری ۱۰ سانتی‌متری بدون پوشش خارجی)، حدوداً برابر با ۹۰۳/۹۳ کیلووات ساعت در مترمربع برآورد شد. مطابق نتایج تحلیل ANOVA و آزمون Duncan برای مقایسه طبقه‌بندی‌ها، انرژی دوره بهره‌برداری در سطوح جداره‌های متداول خارجی معنی‌دار بود. این نشان می‌دهد که در بین جداره‌های مختلف و مصالح گوناگون تفاوت بسیار زیادی از منظر انرژی دوره بهره‌برداری برای گرمایش و سرمایش یک ساختمان وجود دارد.

جدول ۸: نتایج تحلیل ANOVA برای انرژی دوره بهره‌برداری با توجه به تأثیر جداره‌های متداول خارجی

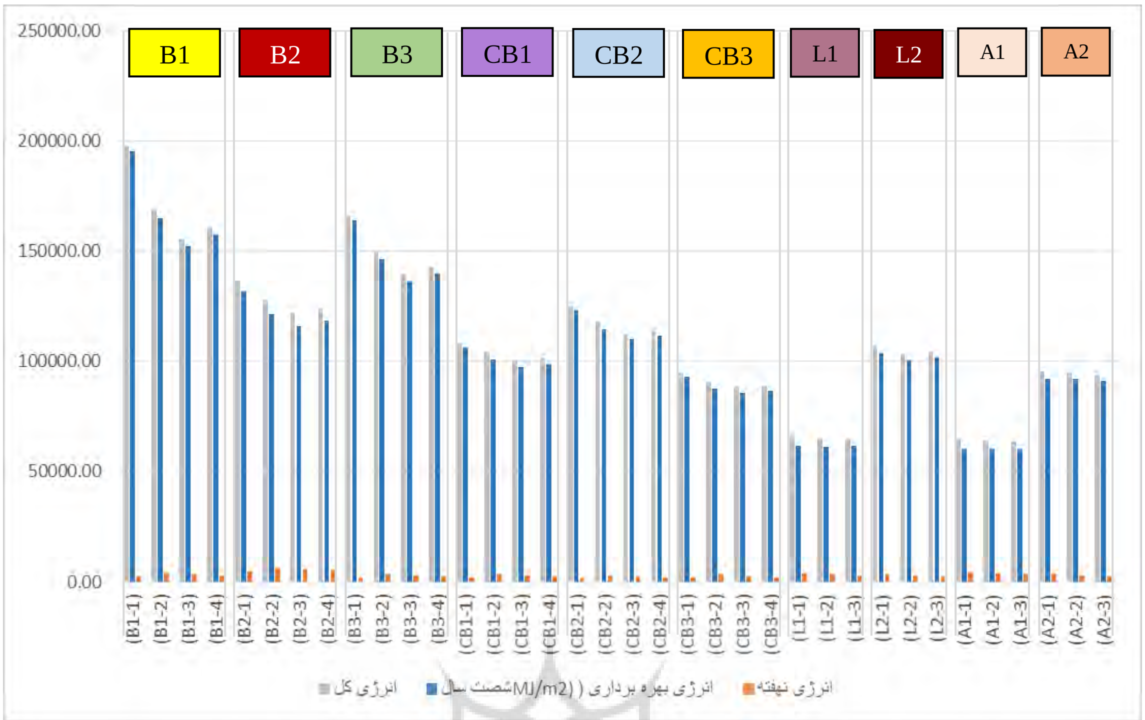
منبع تغییرات	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	F	Sig.
بین گروهها	۳۱۸۳۷۸۲۶۹۵۴,۹۹۲	۳۵	۹۰۹۶۵۲۱۹۸,۷۱۴	۵۵۹۹۶۳۰۵۰۷,۷۱۹	۰,۰۱
درون گروهها (خطا)	۵,۸۴۸	۳۶	.۱۶۲		
جمع کل	۳۱۸۳۷۸۲۶۹۶۰,۸۴۱	۷۱			

لذا توجه به نوع مصالح به‌کاررفته در ساخت جداره‌های ساختمان‌های مسکونی می‌تواند در مصرف بهینه انرژی تأثیر بسیار بالایی داشته باشد. با توجه به این‌که بلوک هبلکس دارای کم‌ترین مصرف انرژی و در مقابل آجر فشاری دارای بیش‌ترین مصرف انرژی است، انتظار می‌رود که به دلیل سهم بالای آجر فشاری در منطقه ۱ و عدم استفاده از بلوک هبلکس، میزان مصرف انرژی در این منطقه بالا باشد.



شکل ٦. طبقه‌بندی مقادیر انرژی دوره بهره‌برداری بر اساس تأثیر جداره‌های متداول خارجی برگرفته از آزمون Duncan

بر این اساس منطقه ۱ شهری، دارای بیش‌ترین میانگین مصرف انرژی و کربن معادل در دوره بهره‌برداری بود، درحالی‌که منطقه ۳ کم‌ترین میانگین مصرف انرژی و کربن معادل در دوره بهره‌برداری را به خود اختصاص داده است. این نتایج اختلاف معنی‌داری را با یکدیگر نشان دادند. از برآیند نتایج گذشته، می‌توان به مقایسه انرژی نهفته و دوره بهره‌برداری در جداره‌های شناسایی‌شده در شکل ۷ پرداخت.

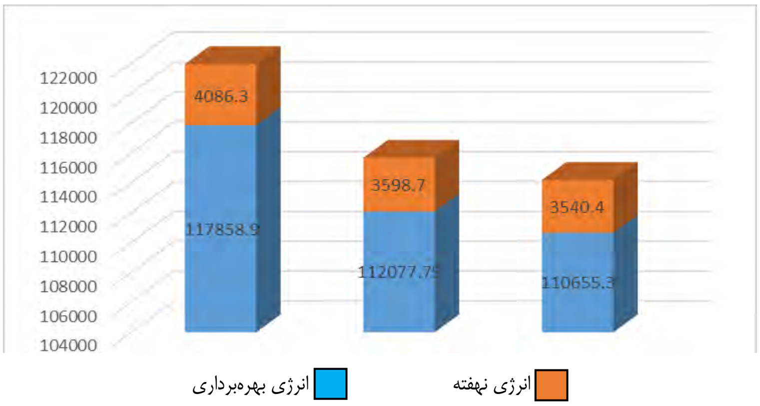


شکل ۷. مقایسه میزان انرژی کل مصرفی (انرژی نهفته دوره تولید و دوره بهره‌برداری جداره‌های خارجی متداول مسکن سنندج)

	الگوهای مصرف بالا ←									الگوهای کم‌مصرف
	۱	۳	۲	۵	۴	۸	۱۰	۶	۷	۹
درصد استفاده از جداره متداول خارجی ساختمان	B1-آجر فشاری (۱۰cm)	B3-آجر سوراخ‌دار (۱۰cm)	B2-آجر فشاری (۲۰cm)	CB2-بلوک سفالی توخالی (۱۵cm)	CB1-بلوک سفالی توخالی (۲۰cm)	L2-بلوک لیکا (۲۰cm)	AAC-A2 هبلکس (۱۵cm)	CB3-بلوک سفالی توخالی فوم‌دار (۱۵cm)	L1-بلوک لیکا (cm10)	AAC-A1 هبلکس (۱۰cm)
منطقه ۱	۰,۴۰	۱,۵۹	۴۶,۲۱	۴۶,۷	۱,۵۹	۰,۶۰	۰	۲,۳۶	۰,۳۰	۰
منطقه ۲	۰,۱۴	۱۵,۰۸	۲۹,۵۵	۳۷,۹۲	۱۵,۰۸	۵,۲۳	۰,۵۶	۸,۵۸	۰,۵۷	۰,۲۴
منطقه ۳	۰,۲۳	۱۷,۸۱	۲۷,۲۶	۳۳,۱۹	۱۷,۸۱	۵,۸۴	۰,۳۶	۱۲,۵	۰,۲۵	۰,۳۳

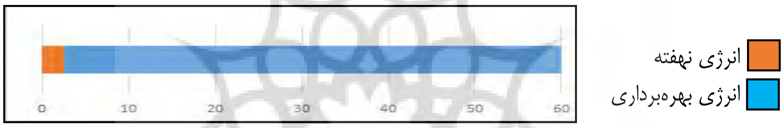
شکل ۸. وضعیت استفاده از جداره‌های خارجی متداول مسکن شهری بر اساس اولویت مصرف بهینه انرژی کل در طول حیات ساختمان برگرفته از آزمون Duncan

بنا به این نتایج، متوسط انرژی نهفته در مناطق شهری ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۴۰۸۶، ۳۵۹۹ و ۳۵۴۰ مگا ژول بر هر مترمربع جداره بود. همچنین متوسط انرژی دوره بهره‌برداری در مناطق شهری ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۱۹۶۴/۳۳، ۱۸۶۷/۹۵ و ۱۸۴۴/۲۳ مگا ژول بر هر مترمربع جداره برآورد شد. اگر متوسط عمر ساختمان ۶۰ سال در نظر گرفته شود، متوسط انرژی دوره بهره‌برداری در مناطق شهری ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۱۱۷۸۵۹/۸، ۱۱۲۰۷۷ و ۱۱۰۶۵۳/۸ مگا ژول بر هر مترمربع جداره تخمین زده خواهد شد. برآیند این نتایج در شکل ۹ نشان داده‌شده است.



شکل ۹. متوسط انرژی نهفته و دوره بهره‌برداری (MJ) در مناطق شهری ۱، ۲ و ۳

طبق نتایج فوق، سهم و درصد انرژی نهفته، نسبت به‌کل انرژی مصرفی در ساختمان‌های مسکونی در سه منطقه شهری به ترتیب برابر ۳/۳۵، ۳/۱۱ و ۳/۱۰ درصد است. لذا همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، می‌توان با توجه به درصدهای فوق به این نتیجه رسید که میزان مصرف انرژی نهفته نسبت به انرژی کل مصرفی در ساختمان، اگر با سال عنوان شود، در سه منطقه شهری به ترتیب برابر ۲/۰۱، ۱/۸۷ و ۱/۸۶ سال از ۶۰ سال عمر تقریبی ساختمان است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. متوسط انرژی نهفته و دوره بهره‌برداری جداره‌های متداول مسکن سنندج در زمان ٦٠ سال

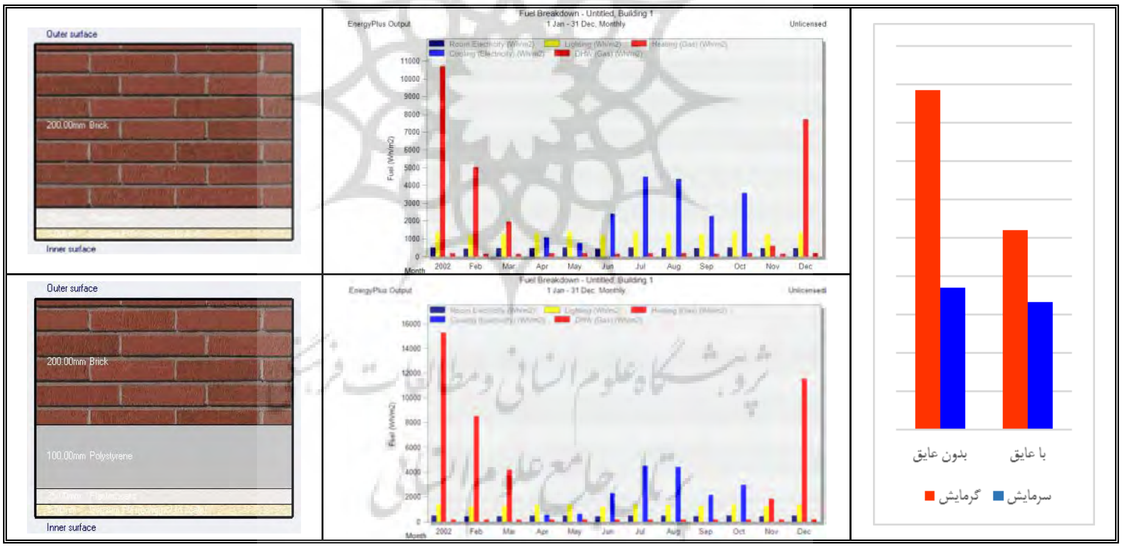
در پژوهش‌های پیشین برای ساختمان‌ها و اجزای آن تدابیری تحت عنوان بدون کربن و کم انرژی با توجه به استانداردها تأکید می‌شود و در بسیاری از نتایج، انرژی نهفته دوره تولید سهم قابل‌توجهی از دوره عمر ساختمان را شامل می‌شود. از سویی سهم انرژی نهفته نسبت به‌کل انرژی مصرفی در جداره‌های خارجی متداول شهر سنندج بسیار پایین است و از سویی دیگر نیز انرژی دوره بهره‌برداری در جداره‌ها با توجه به فراوانی در مناطق سه‌گانه شهری سنندج بسیار بالا است. در این راستا، مطابق جدول ۹ با به‌کارگیری بهینه‌ترین مصالح در جداره‌های خارجی ساختمان، انرژی مصرفی دوره بهره‌برداری حدوداً ۴۳٪ کاهش پیداکرده و به kWh/m^2 ۲۷۸/۱۶ خواهد رسید. بهینه‌ترین جداره با توجه به انرژی نهفته دوره تولید حدوداً ۳۱/۵۳ درصد کاهش پیداکرده و به ۲۳۳۹/۲۶ مگا ژول بر مترمربع می‌رسد. همچنین با به‌کارگیری بهینه‌ترین مصالح در جداره‌های خارجی ساختمان، انرژی مصرفی کل حدوداً ۴۱٪ کاهش پیداکرده و به kWh/m^2 ۲۷۸/۱۶ خواهد رسید. برآورد عددی پژوهش حاضر به ازای هر مترمربع انرژی مصرفی در طول دوره حیات ساختمان، نتایج پژوهش‌های مشابه (Azari & Abbasabadi, 2018)، (Adalberth, 1997) و (Chastas et al, 2016) را با اندکی انحراف عددی ناشی از آب‌وهوا، موقعیت جغرافیایی، کیفیت مصالح و غیره تائید می‌کند. این نتایج نقش بسیار مهم جداره‌های خارجی ساختمان را نشان می‌دهد و دلیل محکمی برای تغییر اساسی در الگوی ساخت جداره‌های خارجی ساختمان شهر سنندج است.

جدول ۹. نتایج میانگین کل انرژی نهفته دوره تولید و دوره بهره‌برداری (MJ/m^2) برای هر مترمربع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی و مناطق شهری سه‌گانه شهر سنندج

	درصد کاهش انرژی در صورت استفاده از جداره بهینه	میانگین انرژی مصرفی منطقه شهری ۱ (MJ/m^2)	میانگین انرژی مصرفی منطقه شهری ۲ (MJ/m^2)	میانگین انرژی مصرفی منطقه ۳ شهری (MJ/m^2)
انرژی بهره‌برداری**	۴۳	۱۱۷۸۵۸/۹۰	۱۱۲۰۷۷/۷۵	۱۱۰۶۵۵/۳۰
انرژی نهفته**	۳۱/۵۱	۴۰۸۶/۳	۳۵۹۸/۷	۳۵۴۰/۴
انرژی کل**	۴۱	۱۲۱۹۴۵/۲	۱۱۵۶۷۶/۵	۱۱۴۱۹۵/۷

**معنی‌دار در سطح ۱ درصد

حال با توجه به میزان فراوانی جداره‌های آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری در مناطق سه‌گانه شهری سنندج و همچنین میزان زیاد اتلاف انرژی کل (گرمایش و سرمایش) در دو دوره انرژی نهفته و بهره‌برداری، پژوهش حاضر در پی پیشنهادی قابل وصول برای ساختمان‌های موجود در جهت بهینه‌سازی این جداره‌ها بدون تغییرات اساسی است. پیش‌بینی عایق حرارتی از جنس پلی‌استایرن بر اساس تحقیقات در حوزه مرتبط (Bojic et al, 2002) و (Li et al, 2018) در بخش داخلی جداره‌های خارجی مطابق جزئیات شکل ۹، بدون صرف هزینه‌های گزاف و قابلیت اجرایی بالا و همچنین در دسترس بودن این عایق، مطابق برآورد مدل‌سازی و شبیه‌سازی اتلاف انرژی ساختمان را نسبت به بدون عایق به حدوداً نصف کاهش می‌دهد. این تغییرات در مقیاس اجرایی وسیع می‌تواند کارا و مؤثر واقع شود. شایسته است در تحقیقات آتی با توجه به تأثیر عایق‌های حرارتی بر ضخامت و نوع آن‌ها در جهت کاهش مصرف انرژی تأکید گردد.



شکل ۹. مقایسه مصرف انرژی کل (گرمایش و سرمایش) جداره آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری بدون عایق(B2-4) و استفاده از عایق ۱۰ سانتی‌متری از جنس پلی‌استایرن

نتیجه‌گیری

ساختمان بخش مهمی از پیامدهای زیست‌محیطی در مناطق شهری را تشکیل می‌دهد، زیرا بیش‌ترین نقش را در انتشار گازهای گلخانه-ای جهان، ناشی از مصرف انرژی دارد. انرژی یکی از مهم‌ترین منابع مورداستفاده در ساختمان‌ها در طول حیات آن‌ها است؛ بنابراین هدف، طراحی و به‌کارگیری مواد و مصالح در ساخت ساختمان‌هایی با حداقل تأثیرات زیست‌محیطی در راستای ارتقا سطح توسعه پایدار انرژی است. مهم‌ترین آلاینده‌های ناشی از ساختمان‌ها شامل، آلاینده‌های نهفته و آلاینده‌های دوره بهره‌برداری است. کشورهای پیشرو تلاش‌های قابل‌توجهی برای کاهش این آلاینده‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی انجام داده‌اند. در ایران نیز اقداماتی ارزشمند درزمینه آلاینده‌ها و به طبع آن بهینه‌سازی مصرف انرژی دوره بهره‌برداری در چارچوب مبحث نوزدهم ساختمان انجام‌گرفته است. این اقدامات

بایستی در سطح گسترده و باکیفیت نظارتی بالایی در گستره شهرها با توجه به چرخه حیات ساختمان ارتقا یابد. در این خصوص فقدان اطلاعات و تحلیل‌های اولیه در ارزیابی انرژی نهفته و دوره بهره‌برداری به‌وضوح قابل‌تشخیص است. تحقیقات متعددی به‌صورت کلی و غالباً بدون اشاره به عناصر ساختمانی در قالب یکی از دو دوره انرژی نهفته و بهره‌برداری انجام‌شده است. تاکنون پژوهشی جامع درزمینه مصرف انرژی و انتشار کربن جداره‌های خارجی متداول ساختمان‌های مسکونی در دوره حیاتشان با توجه به ارائه روش تحلیلی در مقیاس خرد و کلان‌شهری انجام نگرفته است. پژوهش حاضر با ارائه روشی برگرفته از مراحل ارزیابی چرخه حیات ساختمان، با توجه به انرژی نهفته و دوره بهره‌برداری، رابطه معنی‌داری بین سطوح مصرف انرژی و به طبع آن آلاینده‌های کربن در ارتباط با جداره‌های متداول خارجی ساختمان‌های مسکونی در گستره مناطق سه‌گانه شهر سنندج را برآورد کرد. بدین ترتیب مصرف انرژی در صورت استفاده از جداره بهینه در دوره بهره‌برداری، دوره نهفته و انرژی کل مصرفی به ترتیب به ۴۳، ۳۱/۵۱ و ۴۱ درصد کاهش خواهد یافت. با مقایسه‌ای بین مصرف انرژی نهفته دوره تولید و دوره بهره‌برداری، وضعیت نامطلوب استفاده از جداره‌های نامناسب، به‌عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل مصرف انرژی را نشان می‌دهد. نتایج ضمن تأیید بخش مطالعات حوزه ارزیابی انرژی دوره تولید و بهره‌برداری ازلحاظ مقادیر برآورد شده، پیشنهاد می‌کند نسبت به وضعیت فعلی در تصمیم‌گیری کلان مدیریت شهری در اصلاح وضع موجود در قالب آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های اجرایی و همچنین انتخاب و تجدیدنظر طراحان و کارشناسان حوزه ساخت‌وساز، با توجه به نتایج فوق در شهر سنندج نسبت به جداره خارجی ساختمان‌های مسکونی تدابیری اندیشیده شود. برای مثال با توجه به فراوانی بلوک سفالی توخالی در پهنه‌بندی مناطق شهری، اگر به‌جای این بلوک از بلوک سفالی ۱۵ سانتی‌متری فوم دار استفاده می‌شد، راندمان از رده هفتم به رده سوم در طبقه-بندی مصرف انرژی کل (شکل ۸) ارتقا می‌یابد. بسیاری از ساختمان‌های مسکونی موجود فاقد به‌کارگیری مصالح کارآمد و عایق حرارتی مناسب در جداره‌های خارجی ساختمان هستند، می‌توان با سرمایه‌گذاری در قالب حمایت‌های دولتی و بدون صرف هزینه‌های گزاف با عایق‌کاری در بخش داخلی ساختمان، میزان مصرف انرژی را تا حد زیادی کاهش داد. این کاهش مصرف انرژی در مقیاس شهری قابل‌توجه و درنهایت منجر به بازگشت سرمایه اولیه در زمان اندک خواهد شد.

Refrences

Abdoli, M.A., (2003). Energy for Sustainable Development. *Proceedings of the 4th National Iranian Energy Conference, Tehran*. (*in Persian*)

Adalberth, K. (1997). Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples. *Building and environment*, *32*(4), 321-329.

Ahadi, H.R. (2002). Intermodal transportation and optimum depot selection. In *Applications of Advanced Technologies in Transportation (2002)* (pp. 266-273).

Aktas, C.B., & Bilec, M.M. (2012). Impact of lifetime on US residential building LCA results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *17*(3), 337-349.

Alisa, M. & Heasman, I. (2000), Concrete, Vol. 34, No. 1, Jan 2000, pp. 26.

Anbouhi, M. H., Farahza, N., & Ayatollahi, S. M. H. (2016). Analysis of Thermal Behavior of Materials in the Building Envelope Using Building Information Modeling (BIM)—A Case Study Approach. *Open Journal of Energy Efficiency*, *5*(03), 88.

Azari, R., & Abbasabadi, N. (2018). EMBODIED ENERGY OF BUILDINGS A Review of Data, Methods, Challenges, and Research Trends. *Energy and Buildings*.

Baker, S. (2012). *Politics of sustainable development*. Routledge.

Barton, H., Grant, M., & Guise, R. (2003). *Shaping neighbourhoods: a guide for health, sustainability and vitality*. Taylor & Francis.

Bojic, M., Yik, F., & Leung, W. (2002). Thermal insulation of cooled spaces in high rise residential buildings in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, *43*(2), 165-183.

Buchanan, A. H., & Honey, B. G. (1993). Energy and carbon dioxide impacts of building construction. In *IPENZ Annual Conference 1993, Proceedings of: Sustainable development: Papers prepared for the conference, the University of Waikato, Hamilton, 5th-9th February* (p. 354). Institution of Professional Engineers New Zealand.

Chastas, P., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*, *105*, 267-282.

Chen, T. Y., Burnett, J., & Chau, C. K. (2001). Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy*, *26*(4), 323-340.

Cowen, R., .Shenton, W. (2005) Doctrines of Development, Taylor & Francis E-Library.

Dascalaki, E., Balaras, C. A., Droutsa, K., Kontoyiannidis, S., Zavrl, M.Š., Rakušcek, A., & Roarty, C. (2012). Typology approach for building stock energy assessment. *Main Results of the TABULA Project. Final Project Report*. Available online: http://episcope.eu (accessed on 16 December 2017).

Department for Communities, Local Government, Building a Greener Future: Policy Statement for Target of Zero Carbon Homes by 2016, 2007.

Fay, R., Treloar, G., & Iyer-Raniga, U. (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Building Research & Information*, *28*(1), 31-41.

González, M. J., & Navarro, J. G. (2006). Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and environment*, *41*(7), 902-909.

Haapio, A. (2012). Towards sustainable urban communities. *Environmental Impact Assessment Review*, *32*(1), 165-169.

Hammond, G. P., & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, *161*(2), 87-98.

Hataminejad, H & Mohammadi, R. (2013). An approach to sustainable form of city. *Geographical Data*. 21(84), 2-7. *(in Persian)*

Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., & Acquaye, A. (2013). Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. *Energy and Buildings*, *66*, 232-245.

Kočí, V., Bažantová, Z., & Černý, R. (2014). Computational analysis of thermal performance of a passive family house built of hollow clay bricks. *Energy and Buildings*, *76*, 211-218.

Koezjakov, A., Urge-Vorsatz, D., Crijns-Graus, W., & van den Broek, M. (2018). The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, *165*, 233-245.

Lélé, S. M. (1991). Sustainable development: a critical review. *World development*, *19*(6), 607-621.

Li, J., Ng, S. T., & Skitmore, M. (2018). Developing a decision aid for selecting low-carbon refurbishment solutions for multi-story residential buildings in subtropical cities. *Energy and Buildings*, *158*, 1724-1735.

Lützkendorf, T., Foliente, G., Balouktsi, M., & Wiberg, A. H. (2015). Net-zero buildings: incorporating embodied impacts. *Building Research & Information*, *43*(1), 62-81.

Maleki, S.; Damnabagh, S (2013) Evaluation of sustainable urban development indicators with an emphasis on social, physical and urban services. Case study: Ahwaz city's eight cities, Urban planning studies, 1 (3),. 54-29. (*in Persian*)

McClintock, M., & Perry, J. (1997). The Challenge of 'Green'Buildings in Asia. In *International Conference of Building Envelope Systems and Technologies (ICBEST). Bath University, UK.*

Meijer, F., Itard, L., & Sunikka-Blank, M. (2009). Comparing European residential building stocks: performance, renovation and policy opportunities. *Building Research & Information*, *37*(5-6), 533-551.

Mirmoghtadaee, M., Mousavian, S., Gomarian, P. (2017). A comparative study on the role of energy efficiency in urban planning system of Iran and Germany. *The Monthly Scientific Journal of Bagh- E Nazar*, 13(43), 91-100. (*in Persian*)

Moshiri, S. (2015). The effects of the energy price reform on households consumption in Iran. *Energy Policy*, *79*, 177-188.

Nasrallahi, F. (2010). Energy Efficiency in Building and Housing. *Energy Efficiency Conference, Tehran, Institute of Industrial Conference*. (*in Persian*)

Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A., & Nyman, M. (2007). Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: an input–output analysis. *Energy*, *32*(9), 1593-1602.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, *40*(3), 394-398.

Perkins, A., Hamnett, S., Pullen, S., Zito, R., & Trebilcock, D. (2007). *Transport, housing and urban form: the life cycle transport and housing impact of city centre apartments compared with suburban dwellings* (Doctoral dissertation, SOAC).

Programme des Nations unies pour le développement, Unies, N., & Conseil mondial de l'énergie. (2000). World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability. United Nations development programme.

Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and buildings*, *42*(10), 1592-1600.

Reddy, B. V. (2004). Sustainable building technologies. *Current Science*, 899-907.

Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and buildings*, *35*(2), 129-137.

Riyazi, M & Hossaini, S. M. (2011). Look at the policies of production optimization and energy consumption in the Iranian construction sector. *The first international conference of modern approaches to energy conservation, Tehran, Amir Kabir*. (*in Persian*)

Saraei, M. H. & Alizadeh Shoroki, Y. (2015). Analysis of Sustainability Level in Neighborhoods of Meybod Historical Garden City. *Human Geography Research Quarterly*. *47*(3), 451-462. (*in Persian*)

Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and buildings*, *39*(3), 249-257.

Sorrell, S. (2007). The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency.

Stephan, A., Crawford, R. H., & De Myttenaere, K. (2012). Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings. *Energy and buildings*, *55*, 592-600.

Takano, A., Pal, S. K., Kuittinen, M., & Alanne, K. (2015). Life cycle energy balance of residential buildings: A case study on hypothetical building models in Finland. *Energy and Buildings*, 105, 154-164.

Treloar, G., Fay, R., Ilozor, B., & Love, P. (2001). Building materials selection: greenhouse strategies for built facilities. *Facilities*, *19*(3/4), 139-150.

United Nations Environmental Programme-Sustainable Buildings and Climate Initiative, Protocol for Measuring Energy Use and Reporting Greenhouse Gas Emissions from Building Operations, 2008.

Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy and Buildings*, *135*, 286-301.

Weiler, V., Harter, H., & Eicker, U. (2017). Life cycle assessment of buildings and city quarters comparing demolition and reconstruction with refurbishment. *Energy and Buildings*, *134*, 319-328.

Windle, P. E. (2004). "Delphi technique: assessing component needs." J. Perianesth. Nurs. 2004, 19(1): 46-47.

Yellamraju, V. (2004). *Evaluation and design of double-skin facades for office buildings in hot climates* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).

Zhu, H., Hong, J., Shen, G. Q., Mao, C., Zhang, H., & Li, Z. (2018). The exploration of the life-cycle energy saving potential for using prefabrication in residential buildings in China. *Energy and Buildings*, *166*, 561-570.

How to cite this article:
Moradkhani, A., Nikghadam, N., Tahbaz, M. (2020). Estimating energy consumption and equivalent carbon emissions in the life cycle of conventional housing external walls, an approach to sustainable energy development (Case study: Regions in Sanandaj). *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, *14*(4), 1035-1056. http://jshsp.iaurasht.ac.ir/article_672123.html

Estimating Energy Consumption and Equivalent Carbon Emissions in the Life Cycle of Conventional Housing External Walls, an Approach to Sustainable Energy Development (Case Study: Regions in Sanandaj)

Ayoob Moradkhani
Ph.D. Candidate of Architectecture, Dep. of Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Niloufar Nikghadam*
Assistant Professor, Dep. of Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mansoureh Tahbaz
Associate Professor, Dep. of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 14 October 2018 **Accepted:** 09 January 2019

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Sustainable development, the state of balance and equilibrium among the various dimensions of development, in three principles of environmental sustainability, economic sustainability and social sustainability is one of the fundamental goals of seeking to strengthen the dimensions of environmental considerations in particular. Energy sustainability can be explored within the framework of sustainable development. Therefore, the goal of sustainable energy programs is to generate and consume energy resources in a sustainable logical way, so that human life and ecological balance could be possible in the long run. According to available statistics, about one third of global greenhouse gas emissions and 40% of global energy consumption are related to the construction sector, which leads to significant economic, environmental and social consequences. Understanding energy consumption in the building sector is important in order to achieve new goals and approaches such as sustainable urban development, new urbanism, energy efficient city and reducing environmental pollutants. In this regard, the external walls of residential building as an effective factor emphasized by the national building regulations (19th volume) and numerous studies on the transmission or loss of thermal energy have an effective role in the energy consumption pattern of residential buildings according to operational cycle. On the other hand, because of the importance of calculating the embodied energy of the external walls of residential buildings and the lack of comprehensive research in this field, a study to assess these indicators in line with the objectives of sustainable environmental development in terms of energy efficiency and reduction of pollutants in the environment is needed. Therefore, the present study aimed at assessing the embodied energy of the production period and the operational cycle as well as the CO2eq of 60 years of building life, with an emphasis on the common external walls of residential buildings in Sanandaj. An analytical approach in this regard seems to provide a broader vision for decision makers in the field of construction as well as large-scale metropolitan managers.

Methodology

According to the analyses from previous studies, researches generally focuses on one of the energy consumption building periods, and sometimes they generally outline the results with no tangible methodology on a large scale, without taking into account any of the effective building elements in energy consumption. Considering the major share of energy consumption in Iran by

* Corresponding Author
Email: n.nikghadam@gmail.com

residential buildings, the proposed evaluation method of this study aims to identify and make a comparison of the external walls of urban housing using a life-cycle method in order to assess the embodied energy and environmental pollutants in the production period as well as energy consumption during the operational cycle. According to the analytical-descriptive approach, after explaining the related principles, Delphi method and Fuzzy AHP hierarchical analysis were used to identify and zonate the frequency of common external walls of housing in the three- areas of Sanandaj city.
Then, the consumption of embodied energy in the production period was assessed with the existing data and the energy of the operational cycle, using modeling and simulation of a city block in Design Builder software considering the relevant variables. Interpretation of the findings was done using SPSS software, ANOVA statistical analysis, and Duncan's test for comparing the classifications of the embodied energy levels in the production and operational cycle among the walls and its extent in the three regions of Sanandaj.

Results and Discussion
According to the results of the survey, all types of walls were classified in 10 main types and 36 sub-categories. The 20 cm compressive bricks and hollow clay blocks of 15 cm were used the most in the walls of Sanandaj city in zone 1. In the 2nd and 3rd areas, in addition to these two types of walls, the 20cm hollow clay block was also considered as the third priority in the frequency of the walls, as well as the use of new materials with low thermal conductivity with a low percentage such as the block of LECA and Hebelex were obvious in these two areas. The final results of the estimation of the embodied energy and Co2eq for each square meter of the external walls of residential buildings, and the results of the analysis of the primary embodied energy in the levels of different types of walls were significant. The lowest amount of primary energy belonged to the type 5 wall (permeable clay block of 15 cm) and the highest primary energy belonged to the type 2 wall (20 cm pressure brick) which were 441.5 and 1066.5, respectively. Also, the lowest level of CO2eq belonged to the type 10 wall (the 15-centimeter HEXAC block) with the middle layer of expanded polystyrene and the highest level of CO2eq belonged to the type 2 wall (20 cm pressure bricks), were 7.773 CO2 / kg and 24.761 kg CO2 / kg, respectively. Also, urban area 1 has the highest embodied energy consumption and Co2eq and urban area 3 had the lowest embodied energy consumption and Co2eq for each square meter of external walls, which was due to the high contribution of the type 2 wall (20 cm pressure bricks) in urban areas 1 (46.21%) and its smaller share in urban area 2 and 3 (27.26%). Final results of the energy of the operational cycle for each square meter of the common external walls of residential buildings, the lowest amount of energy consumed during the operational cycle belonged to the type 9 wall (Hebelex block of 10 cm with the middle layer of polystyrene), which was 2778 kWh per square meter. Also, the highest amount of energy used for the type 1 wall (10 cm non-exterior bricks) was estimated to be 903.93 kWh / m2. According to the above results, the share and percentage of embodied energy used in the residential buildings in the three urban areas were 3.35%, 3.13% and 3.10%, respectively. Therefore, according to the above percentages, it can be concluded that the amount of embodied energy consumed compared to the total energy consumed in the building, if counted by the year, in the three urban areas is equal to 1.01, 1.87 and 1.86 years, respectively from the 60 years the approximate life of the building.

Conclusion
Leading countries have made significant efforts to reduce these pollutants and optimize energy use. In Iran, valuable measures have been taken in the area of pollutants and thus, optimization of energy consumption during the operational cycle has been carried out within the framework of the 19th issue of the building. These measures should be promoted at a widespread and high quality oversight in urban areas, taking into account the lifecycle of the building. The present study presents a methodology for estimating the life cycle of the building, considering the embodied energy and operational cycle, a meaningful relationship between energy consumption

levels and hence Co2eq contaminants in relation to the external walls of the residential building were estimated in the three areas of Sanandaj. By comparing the embodied energy consumption of the production period and operational cycle, the unfavorable condition of the use of inappropriate walls is shown to be the most important and most effective factor in energy consumption. The results, while confirming the field studies of the energy assessment sector, of the production and operational cycle of the current research in terms of estimated values, it is suggested to be compared to the current situation in the decision-making of urban management in order to improve the status quo in the form of regulations and guidelines. The executives, as well as the designers and experts in the field of construction, should consider the above results in the city of Sanandaj, and take measures for the external walls of residential buildings.

Keywords: Sustainable energy development, embodied energy, energy of operational cycle, environmental pollutants

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی