

## بررسی تأثیر جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی بر میزان انرژی نهفته و گاز دی‌اکسید کربن انتشار یافته (CO<sub>2</sub>eq): مطالعه موردی سنندج

ایوب مرادخانی<sup>۱</sup>

استادیار گروه معماری، واحد مریوان، دانشگاه آزاد اسلامی، مریوان، ایران

محمددانا سالم

استادیار گروه معماری، واحد مریوان، دانشگاه آزاد اسلامی، مریوان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

### چکیده

هدف از این پژوهش، برآورد انرژی نهفته اولیه و کربن دی‌اکسید معادل (CO<sub>2</sub>eq) برای جداره‌های متداول خارجی مسکن شهری سنندج واقع در ایران است. انرژی نهفته در سه منطقه شهری سنندج به منظور تعیین اختلاف احتمالی بین مناطق موجود، بررسی شده است. در راستای شناسایی انواع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی، از روش دلفی و نظرسنجی از افراد متخصص استفاده شد. بر اساس نتایج نظرسنجی‌ها، انواع جداره‌های خارجی در ۱۰ نوع اصلی و ۳۶ زیرمجموعه طبقه‌بندی شدند. محاسبات انرژی نهفته نشان می‌دهد که 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 441.5 MJ و 1066.5 MJ است. همچنین پایین‌ترین سطح CO<sub>2</sub>eq متعلق به جداره نوع ۱۰ (بلوک هبلکس ۱۵ سانتی‌متری AAC) و بالاترین سطح CO<sub>2</sub>eq متعلق به جداره نوع ۲ به ترتیب برابر 7.773 kg CO<sub>2</sub>/kg و 24.761 kg CO<sub>2</sub>/kg است. منطقه ۱ شهری دارای بیش‌ترین و منطقه ۳ شهری دارای کمترین مصرف انرژی نهفته برای هر مترمربع جداره‌های خارجی است. همچنین منطقه ۱ شهری دارای بالاترین و منطقه ۳ شهری دارای پایین‌ترین مقدار CO<sub>2</sub>eq برای هر مترمربع جداره‌های خارجی است.

کلیدواژگان: دی‌اکسید کربن معادل، انرژی نهفته، جداره‌های خارجی، انرژی نهفته اولیه، ساختمان‌های مسکونی.

طبق پیش‌بینی که توسط نشست بین دولتی در مورد تغییر آب‌وهوا (IPCC)<sup>۱</sup> انجام شد، تا سال ۲۱۰۰ دمای متوسط جهانی بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سلسیوس و سطح آب دریاها بین ۹ تا ۸۸ سانتی‌متر افزایش خواهد یافت. انتشار گازهای گلخانه‌ای، منبع اصلی گرمایش جهانی است. همچنین عامل اصلی انتشار نیز مصرف انرژی و سوخت‌های فسیلی است. روند توسعه صنعتی و رشد اقتصادی و به تبع آن افزایش گازهای گلخانه‌ای نظیر متان، دی‌اکسید کربن، بخار آب و اکسید نیتروژن در جو زمین، دمای کره زمین را افزایش داده و باعث ایجاد تغییرات ناخوشایند در اقلیم و محیط‌زیست می‌شود (Hamidi Razi & Feshari, 2017). میلیون‌ها سال پیش گیاهان سطح زمین را در برگرفته بودند. در اثر فتوسنتز، انرژی تابشی نور خورشید به بافت‌های زنده تبدیل شد که قسمتی از آن‌ها در اعماق زمین دفن گردید که بعدها منابع زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی را به وجود آوردند (Cantrell & Wepfer, 1984)؛ (Kavanaugh & Rafferty, 1997). در دهه‌های اخیر، از این مواد شیمیایی برای مصارف متعددی استفاده شد و از آن‌ها محصولاتی مانند پلاستیک، منسوجات، کود و محصولات نهایی مختلف صنعت پتروشیمی به دست آمد. باگذشت هر دهه، استفاده از این محصولات رشد یافته است (United Nations, 2001). زمین به علت بالا رفتن تقاضای انرژی جهانی، با بحران انرژی مواجه شده است. به دلیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی، حمل‌ونقل و رشد جمعیت جهان، این بحران همچنان ادامه دارد. علت اصلی افزایش دمای متوسط جهانی، مصرف بیش‌ازحد سوخت‌های فسیلی است که نه تنها باعث به پایان رسیدن منابع طبیعی می‌شود، بلکه باعث افزایش انتشار کربن‌دی‌اکسید نیز می‌گردد. توافق جامعی میان جوامع علمی و دولت‌ها مبنی بر مداخله بشر در تسریع تغییرات دوره‌ای در آب‌وهوای منطقه‌ای و جهانی توافق جامعی میان جوامع علمی و دولت‌ها وجود دارد. این تغییرات نیازمند واکنش سریعی در راستای کاهش اثرات مخرب آن خواهد داشت (Coyle & Simmons, 2014). از سویی پایداری مفهومی برای نیل به این هدف، حاوی محدوده‌ای است که در آن توسعه و پیشرفت بایستی بدون مداخله در توانایی نسل‌های آینده در رسیدن به نیازهایشان، با اتکا به نیازهای حال باشد. این مفهوم شامل سطوح و مقیاس‌های متنوعی از توسعه اقتصادی و کشاورزی تا مدیریت شهری و شیوه‌های ساخت‌وساز است. این تعریف کلی، به‌منظور توسعه شیوه‌های پایدار ساخت‌وساز و مدیریت شهری به وجود آمد (Steele, 1997). از سوی دیگر، به‌منظور رسیدن به هدف کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید، نیازمند رویکرد چرخه حیات است. رویکرد چرخه حیات (LCA)<sup>۲</sup>، پتانسیل اثرات محیطی یک محصول یا نوعی از خدمات را تعیین کرده و در استانداردهای ISO 14040:2006 و ISO 14044:2006 تعریف می‌شود. امروزه، کاربرد LCA در معماری به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای رو به رشد است و برای ارزیابی ساختمان‌های جدید مورد استفاده قرار گرفته است (Vilches & et al, 2017). در این میان، ساختمان بخش قابل‌توجهی از مصرف انرژی جهان و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است (Shadram & Mukkavaara, 2018). مطابق آمار موجود، ساختمان‌های مسکونی ایران بزرگ‌ترین مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است (Riazi & Hoseini, 2011). انواع مصارف انرژی در طی چرخه حیات ساختمان عبارت است از انرژی نهفته، دوره بهره‌برداری، نگهداری، تخریب. به عبارتی، انرژی نهفته (EE)<sup>۳</sup> شامل کل انرژی مصرفی برای

<sup>1</sup> The Intergovernmental Panel on Climate Change

<sup>2</sup> Life Cycle Assessment

<sup>3</sup> Embodied Energy

ساخت و ساز ساختمان است، که بیانگر مجموع انرژی نهفته مصالح ساختمانی، انرژی حمل و نقل مصالح و انرژی ساخت و ساز است (Praseeda et al, 2016). به دلیل عدم وجود داده های کامل و دقیق انرژی نهفته، توافقی بر روی روشی استاندارد اندازه گیری وجود ندارد، که این مسئله ارزیابی انرژی نهفته از انرژی بهره برداری را چالش برانگیزتر نموده است (Copiello, 2016؛ Dixit & Singh, 2018). همچنین، انرژی نهفته در یک ساختمان شامل تمام منابع انرژی تجدید ناپذیر مصرف شده در فرایندها و محصولات استفاده شده در ساخت و ساز اولیه، نگهداری، تعمیرات و تخریب نهایی است (Dixit et al, 2013). علی رغم سنجش مقادیر انرژی نهفته و کربن معادل برای مصالحی مانند آلومینیوم، فولاد یا چوب، به علت تنوع در فرایندهای تولید و استحصال مواد اولیه، این اندازه گیری ها دقیق نیستند. باین وجود، می توانند به عنوان معیاری برای استفاده در ارزیابی کارایی چرخه حیات ساختمان ها و محصولات تولیدی در نظر گرفته شوند (Hammond & Jones, 2008). به دلیل اهمیت محاسبه دقیق انرژی نهفته اولیه و  $CO_2eq^1$  جداره های خارجی ساختمان های مسکونی و فقدان پژوهش های جامع در این زمینه، پژوهشی در راستای ارزیابی این شاخص ها مورد نیاز است. لذا هدف از پژوهش کنونی ارزیابی انرژی نهفته اولیه و  $CO_2eq$  برای جداره های خارجی ساختمان های مسکونی شهر سنندج واقع در ایران است. نتایج این پژوهش می تواند مورد استفاده تصمیم گیرندگان مدیریت شهری قرار گیرد و همچنین امکان تحلیل و بازنگری در تعیین و انتخاب الگوهای جداره های خارجی متداول توسط طراحان حوزه ساختمان با محوریت بهینه سازی مصرف انرژی در مسکن شهری سنندج را فراهم آورد.

#### پیشینه پژوهش (حوزه ارزیابی انرژی نهفته)

انرژی نهفته<sup>۲</sup> و آلاینده های نهفته<sup>۳</sup> شامل استخراج مواد خام، فرآوری، تولید، حمل و نقل، تحویل در محل، ساخت، تعمیر و نگهداری، نوسازی، تخریب نهایی و همچنین تمام فعالیت ها و فرایندهای زنجیره تأمین ساختمان است که پیامدهای قابل توجهی برای محیط زیست به شمار می آیند. اغلب با پیش فرض این که میزان آلاینده های دوره بهره برداری یک ساختمان بیش تر از آلاینده های نهفته آن است، تلاش های زیادی را صرف کاهش مصرف انرژی در دوره بهره برداری ساختمان داشته اند. در این راستا نوآوری ها و پیشرفت های فناورانه در زمینه انرژی تجدید پذیر، بهره وری انرژی و انگیزه برای تغییر رفتار باعث کاهش قابل ملاحظه آلاینده های بهره برداری در ساختمان ها شده است. باین حال، این اقدامات اغلب به افزایش مصرف مصالح و تقاضای انرژی بیشتر برای تولید آنها شده است (Lützkendorf et al, 2015) و (Sorrell, 2007). از این رو، بخش انرژی نهفته و آلاینده های مربوط به آن، در طراحی ساختمان ها و محیط های پایدار بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Nassen & et al, 2007). در تحقیق ردی و جاگادیش<sup>۴</sup>، انرژی نهفته یک ساختمان به صورت کل انرژی مرتبط با تولید آن تعریف می شود، 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 می شود (Reddy & Jagadish, 2003). ترلور و همکاران<sup>۵</sup> انرژی نهفته را به صورت انرژی مورد نیاز برای ارائه یک

<sup>1</sup> Carbon Dioxide Equivalent

<sup>2</sup> Embodied Energy (EE)

<sup>3</sup> Embodied Emissions

<sup>4</sup> Reddy & Jagadish

<sup>5</sup> Treloar & et al

محصول (به‌طور مستقیم و غیرمستقیم) از طریق تمام فرایندهای بالادست توصیف کردند (Treloar & et al, 2001). به‌طور معمول، انرژی نهفته به‌عنوان مقداری از انرژی به ازای هر واحد از مصالح، اجزاء یا سیستم ساختمانی اندازه‌گیری می‌شود. به‌عنوان مثال، آن را می‌توان به‌صورت مگا ژول (MJ) و یا گیگا ژول (GJ) در واحد وزن (کیلوگرم یا تن) و یا مساحت (مترمربع) بیان نمود (Ibn-Mohammed & et al, 2013). انرژی نهفته، کل انرژی‌های تجدید ناپذیری است که از ابتدای تولید مصالح در بخش صنعتی‌سازی و کارخانه‌ای تا حمل‌ونقل به کارگاه ساختمانی و نصب را نیز شامل می‌شود، این انرژی نقش وسیعی را در انشعاب مصالح ساختمانی ایفا می‌کند. در تعریفی مشابه از جان‌نوتن<sup>۱</sup>، انرژی نهفته یک ساختمان، کل انرژی موردنیاز برای ساخت‌وساز ساختمان، که شامل بیرون کشیدن مصالح خام، فرایند صنعتی‌سازی آن‌ها در صورت نیاز، حمل‌ونقل آن‌ها به کارگاه ساختمانی و کنار هم قرار دان آن‌ها است (Newton & Westaway, 2001). به‌طور کلی فرایندهای صنعتی‌سازی، بیشتر انرژی محصولات را بالا می‌برد. به‌عنوان مثال صفحات چوبی یا تخته‌های چوبی ساختمانی در یک اندازه مساوی با چوب‌های سخت‌اره شده از انرژی نهفته بالاتری برخوردار هستند. انرژی نهفته در هر ساختمان جدید و نوسازی در هر سال حدود ۱۰٪ مصرف انرژی در انگلستان محاسبه شده است. این سهم از انرژی نهفته، حدود نیمی از آن در مرحله استخراج صنعتی‌سازی مصالح و نیم دیگر در بخش حمل‌ونقل مصرف می‌شود. بر اساس اظهارات میلر<sup>۲</sup>، واژه انرژی نهفته دستخوش تفاسیر متعدد متخصصان و همچنین نشریات شده است. گاهی این تفاسیر آنی، ناواضح و گنگ هستند (Miller, 2001). کروسر، انرژی نهفته را این‌گونه تعریف می‌کند: کل انرژی موردنیاز در خلق ساختمان، شامل انرژی مستقیم مصرفی در ساخت‌وساز، فرایند اتصال مصالح و انرژی غیرمستقیم که موردنیاز برای تولید مصالح و اجزای مشارکت‌کننده در ساخت است (Crowther, 1999). تری‌لر و همکاران<sup>۳</sup>، اظهار می‌دارند که انرژی نهفته موردنیاز برای تولید محصولی (مستقیم و غیرمستقیم) و برای کل فرایند تولید در نظر گرفته می‌شود (Treloar & et al, 2001). انرژی مستقیم<sup>۴</sup> به انرژی مصرف‌شده برای جابجایی محصولات ساختمانی به کارگاه و سپس ساخت ساختمان اطلاق می‌شود. انرژی مستقیم به شکل‌های گوناگون در فعالیت‌های ساختگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد، همچنین خارج از ساختگاه مانند پیش‌ساخته‌سازی، حمل‌ونقل را شامل می‌شود (Ding, 2004). انرژی غیرمستقیم<sup>۵</sup> شامل انرژی به‌کاررفته برای بدست آوردن فرایند صنعتی‌سازی مصالح ساختمانی که دربرگیرنده هرگونه جابجایی و حمل‌ونقل در ارتباط با این فعالیت‌ها می‌شود، که غالباً در طی تولید مواد ساختمانی، در فرایندهای اصلی و اساسی و تخریب در نظر گرفته می‌شود. آکتاس و بیلک در سال ۲۰۱۲ انرژی نهفته اولیه را در محدوده  $1.7 - 7.3 \text{ GJ/m}^2$ ، با میانگین  $4.0 \text{ GJ/m}^2$ ، برای ساختمان‌های مسکونی متداول و  $4.3 - 7.7 \text{ GJ/m}^2$  با میانگین  $6.2 \text{ GJ/m}^2$ ، برای ساختمان‌های مسکونی کم انرژی محاسبه کردند. آن‌ها دریافتند که دلیل بالا بودن متوسط انرژی نهفته اولیه در ساختمان‌های کم انرژی، به ضخامت جداره‌های ساختمان و استفاده گسترده از عایق‌ها مربوط می‌شود (Aktas & Bilec, 2012). پراسیدا و همکاران در سال ۲۰۱۶ انرژی نهفته چندین ساختمان مسکونی واقع در هند در موقعیت‌های اقلیمی مختلف را محاسبه کردند. در مطالعه آن‌ها، انرژی نهفته مسکن در محدوده  $1.01 \text{ GJ/m}^2$  تا

<sup>1</sup> Newton & Westaway

<sup>2</sup> Miller

<sup>3</sup> Treloar & et al

<sup>4</sup> Direct Energy

<sup>5</sup> Recuring EE

10.50 GJ/m<sup>2</sup> قرار دارد (Praseeda et al, 2016). در جدول ۱، به پژوهش‌هایی در حوزه انرژی نهفته و ابعاد موردبررسی آن اشاره شده است.

جدول ۱. پژوهش‌های مرتبط با انرژی نهفته

موضوع موردبررسی	پژوهشگر/سال انتشار
بهینه‌سازی انرژی نهفته در ساختگاه‌های خانگی	تاینگ و سیلوا <sup>۱</sup> (۲۰۰۴)
ارائه ساختار فضایی انرژی نهفته ساختمان‌های مسکونی در محیط شهری	پوالن <sup>۲</sup> (۲۰۰۸)
مصرف انرژی اولیه چرخه حیات و انتشار کربن ساختمان‌های مسکونی	دودو <sup>۳</sup> (۲۰۱۱)
ارزیابی ساخت‌وساز با مصالح کاه در جهت به حداقل رساندن انرژی نهفته	اوفاین <sup>۴</sup> (۲۰۱۰)
طراحی در جهت تفکیک به‌منظور بهینه‌سازی انرژی نهفته	کراوتر <sup>۵</sup> (۱۹۹۹)
شناسایی پارامترها برای سنجش انرژی نهفته	دکسایت و همکاران <sup>۶</sup> (۲۰۱۰)
انرژی نهفته و تأثیرات آن بر تصمیم‌گیری‌های معمارانه	هالتزبوسن <sup>۷</sup> (۲۰۰۷)
محاسبات انرژی نهفته با تحلیل چرخه حیات ساختمان‌های مسکونی	هابنس <sup>۸</sup> (۲۰۱۰)
ساختار ارزیابی انرژی نهفته برای بناهای پایدار	لی <sup>۹</sup> (۲۰۱۰)
انرژی نهفته در توسعه بناهای مسکونی	همس <sup>۱۰</sup> (۱۹۹۹)
انرژی نهفته مصالح ساختمان - ضرایب جدید نیوزلند	بایرد <sup>۱۱</sup> (۱۹۹۷)
بناهای بلندمرتبه و انرژی نهفته	اولدفیلد <sup>۱۲</sup> (۲۰۰۹)

در تحقیقات انجام‌شده، محققین مرزهای سامانه‌های متعددی را در نظر گرفته‌اند و در نتیجه ارقام بدست آمده متفاوت است. در نظر گرفتن برخی ورودی‌های انرژی در عناصر ساختمان همچون مبلمان، تجهیزات سرویس بهداشتی، فرآیندهایی همچون ساخت‌وسازهایی در محل ساختگاه و تخریب موجب این تفاوت‌ها در محاسبه انرژی نهفته ساختمان است (Ding, 2004).

### مزایای ارزیابی آلاینده‌های نهفته

اگر به‌عنوان پیش‌بینی، آلاینده‌های نهفته تبدیل به هدفی برای کاهش آلاینده‌ها شوند، برای شرکت‌های ساختمانی سنتی<sup>۱۳</sup> اندازه‌گیری و گزارش آلاینده‌های مرتبط با پروژه‌های آن‌ها، ضروری خواهد بود. این امر به‌طور بالقوه این اجازه را می‌دهد که آلاینده‌های این بخش به‌طور کلی ارزیابی شوند و به‌طور دقیق‌تری تصمیم‌گیری نسبت به مسئولیت‌های مربوط به آلاینده‌های کلی کشور را امکان‌پذیر می‌سازد (Hamilton-MacLaren & et al, 2009). به همین ترتیب، با گزارش آلاینده‌های نهفته پروژه، مهندسين ساختمان قادر خواهند بود، در کنار اندازه‌گیری آلاینده‌های بهره‌برداری موجود، چشم‌انداز جامع‌تری از اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های تکمیل‌شده ارائه دهند. در

<sup>1</sup> Ting & Silva

<sup>2</sup> Pullen

<sup>3</sup> Dodo

<sup>4</sup> Offin

<sup>5</sup> Crowther

<sup>6</sup> Dixit & et al

<sup>7</sup> Holtzhausen

<sup>8</sup> Haynes

<sup>9</sup> halls Lee & et al

<sup>10</sup> Homes

<sup>11</sup> Baird & et al

<sup>12</sup> Oldfield

<sup>13</sup> Traditional Construction Companies

نظر گرفتن آلاینده‌های نهفته نیز در زمینه صرفه‌جویی آلاینده‌های بهره‌برداری کمک می‌کند و می‌تواند طرح‌های بهبود خوبی را با یک نمایه کاهش کربن مثبت به ارمغان بیاورد (Brás & Gomes, 2015). در مقیاس کلان، توجه به ارزیابی آلاینده‌های بهره‌برداری و نهفته، به جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعاتی برای دستیابی به وجه اقتصاد انرژی پایدار کمک می‌کند. این مسئله همچنین توسعه و در دسترس بودن یک پایگاه اطلاعاتی قابل‌اطمینان را میسر می‌کند. در دسترس بودن پایگاه اطلاعاتی نیز در ایجاد دستورالعمل‌هایی که می‌تواند به یک اتفاق نظر جهانی تبدیل شود، کمک خواهد کرد (Dixit & et al, 2012). چنین پیشرفت‌هایی در بانک اطلاعاتی آلاینده‌های نهفته برای شاخص کربن، مشاورین و تحلیل‌گران را قادر می‌سازد تا ساختمان‌ها را با استفاده از رتبه‌بندی آلاینده‌های نهفته‌شان، گروه‌بندی کنند (Ibn-Mohammed & et al, 2013). چنین روش‌شناسی و مفهومی برای محدود کردن گروه ساختمان‌ها با توجه به آلاینده‌های نهفته آن‌ها، به‌خوبی در تحقیق آکوای<sup>۱</sup> و همکاران نشان داده شده است (Acquaye & et al, 2011). این رویکرد به مشتریان اجازه می‌دهد درک قابل‌ملاحظه‌ای از تأثیر آلاینده‌های نهفته پروژه‌های تکمیل شده خود را به دست آورند. همچنین برای مشخصات هوشمند، بر اساس تأثیر و همچنین سهولت اجرا و ترویج تقاضا برای ایجاد تحولات بازار در بخش‌های کربن زنجیره تأمین<sup>۲</sup>، امکان‌پذیر خواهد بود (Brás & Gomes, 2015). علاوه بر این، در نظر گرفتن آلاینده‌های نهفته، این اطمینان را حاصل خواهد کرد که شرکت‌های ساختمانی از مصالح ساختمانی بازیافت‌شده و قابل بازیافت استفاده می‌کنند و از تأثیر استراتژی‌هایی مانند فن‌آوری انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۳</sup> و ایجاد تقاضا برای محصولات با فرآیندهای کم‌کربن حمایت<sup>۴</sup> می‌کنند (Ibn-Mohammed & et al, 2012). آگاهی بهتر از محتوای آلاینده‌های نهفته مصالح ساختمانی، نه تنها تولید و توسعه مصالح با آلاینده نهفته کم را ترویج می‌دهد، بلکه باعث ترجیح استفاده از آن‌ها در میان طراحان ساختمان برای جلوگیری از مصرف انرژی و آلاینده‌های دی‌اکسید کربن خواهد شد (Ding, 2004). آگاهی از اثرات کربن پروژه‌های ساخت‌وساز و بازسازی ممکن است به تشویق ساخت‌وسازهای با طول حیات زیاد به‌منظور جلوگیری از تمایل به چرخه بازسازی کوتاه‌مدت کمک کند (Rawlinson & Weight, 2007). علاوه بر در نظر گرفتن میزان آلاینده‌های نهفته در مرحله طراحی، در مراحل ساخت و نگهداری نیز کمک قابل‌توجهی به توسعه پایدار در ساختمان‌ها می‌کند. این امر با تغییر موقعیت شرکت‌های ساختمانی سستی به استفاده مجدد از فن‌آوری خود برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده مجدد از مصالح ساختمانی به دست می‌آید. همچنین خدمات اجتماعی<sup>۵</sup> را از طریق استفاده گسترده از مدل‌های مختلف و مقررات فرصت‌های اقتصادی بهبود خواهد بخشید. همان‌طور که تایواری<sup>۶</sup> به‌درستی آن را بیان می‌کند، نتایج آلاینده‌های نهفته برای طرح‌های استراتژیک ملی و جهانی در مصرف انرژی، حیاتی هستند، زیرا صنایع ساختمانی (تولید) مسئول ۲۰ درصد از مصرف انرژی در جهان هستند (Tiwari, 2001).

محدوده مورد مطالعه

<sup>1</sup> Acquaye

<sup>2</sup> carbon-intensive sectors

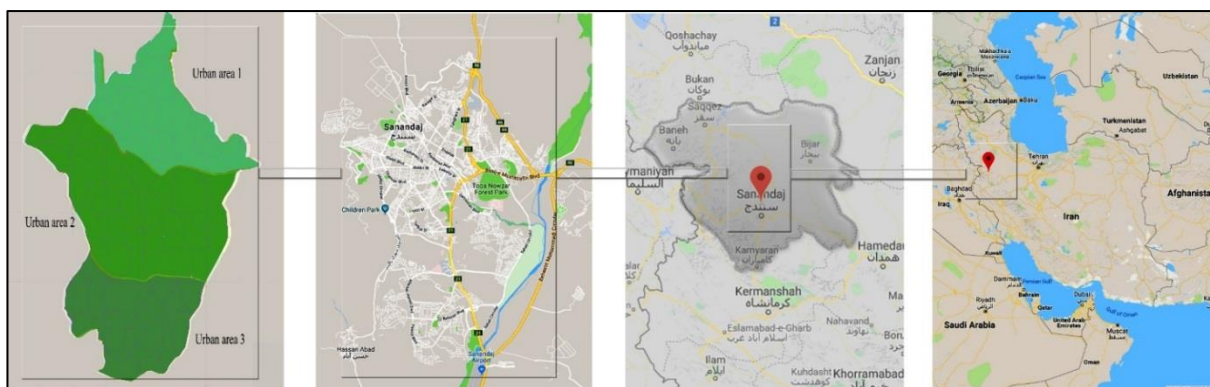
<sup>3</sup> renewable energy technologies

<sup>4</sup> products with low-carbon processes

<sup>5</sup> social services

<sup>6</sup> Tiwari

این مطالعه در شهر سنندج، ایران انجام شد. سنندج در غرب ایران واقع شده است. جمعیت این شهر در سال ۲۰۱۶ برابر ۴۶۱۲۷۸ نفر بود (Statistical Center of Iran, 2016). شهر سنندج، مرکز استان کردستان در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۱۵ درجه طول غربی از نصف النهار تهران قرار دارد. متوسط ارتفاع آن از سطح دریا معادل ۱۵۳۵ متر است که در پست-ترین نقطه ۶۰۰ متر و همچنین کوه آبدرد به عنوان بلندترین نقطه ۲۵۵۰ متر است. شهر سنندج در گروه بندی ساختمانها از نظر نیاز به صرفه جویی انرژی در راهنمای مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۸۷)، با سه منطقه شهری در اقلیم سرد کوهستانی با نیاز انرژی متوسط مطابق شکل ۱، به عنوان نمونه موردی مطالعه در پهنه بندی جداره های متداول خارجی مسکن انتخاب شده است. به منظور تعیین اختلاف احتمالی بین مناطق مختلف، انرژی نهفته و کربن معادل به طور جداگانه در این مناطق شهری مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. موقعیت شهر سنندج در ایران و مناطق شهری آن

### روش بررسی

انرژی نهفته و ضرایب کربن موجود در شش مصالح ساختمانی مهم، شامل: آجر، بتن، شیشه، فولاد و چوب، توسط هاموند و جونز در سال ۲۰۰۸ اعلام شده است (Hammond & Jones, 2008). به طور معمول، انواع متعددی از سیمان، ملات و بتن در ساخت ساختمان های بسیاری استفاده می شود. در این راستا، مدلی ساده برای محاسبه و ارزیابی انرژی نهفته و کربن معادل که در زیر آورده شده است، استفاده شد. این مدل امکان برآورد انرژی نهفته و کربن معادل برای تمامی اجزای جداره های خارجی ساختمان را بر اساس مواد تشکیل دهنده آنها فراهم می آورد. به عنوان مثال، در مورد سیمان، انرژی نهفته (E) به ازای هر کیلوگرم، می تواند با استفاده از رابطه زیر برآورد شود:

$$E = (1 + M) (C X_C + S X_S + A X_A + W X_W + R X_R + P X_P + O) + T$$

که در آن M ضریب هدر رفت (%) و C، S، A، W، R، P به ترتیب عبارت اند از وزن (kg) سیمان، شن، سنگدانه، آب، جایگزین های سیمان و مواد روان کننده. O انرژی دوره بهره برداری و T انرژی حمل و نقل محصول نهایی است. پارامترهای  $X_C$ ،  $X_S$ ،  $X_A$ ،  $X_W$ ،  $X_R$  و  $X_P$  به ترتیب ضرایب انرژی نهفته ۶ مصالحی است که در بالا ذکر گردید (Hammond & Jones, 2008).

انرژی نهفته اولیه یک ساختمان، انرژی است که صرف ساخت و ساز اولیه ساختمان می شود. این انرژی به صورت زیر تعریف می شود (Ramesh et al, 2010):

$$EE_i = \sum m_i M_i + E_c$$

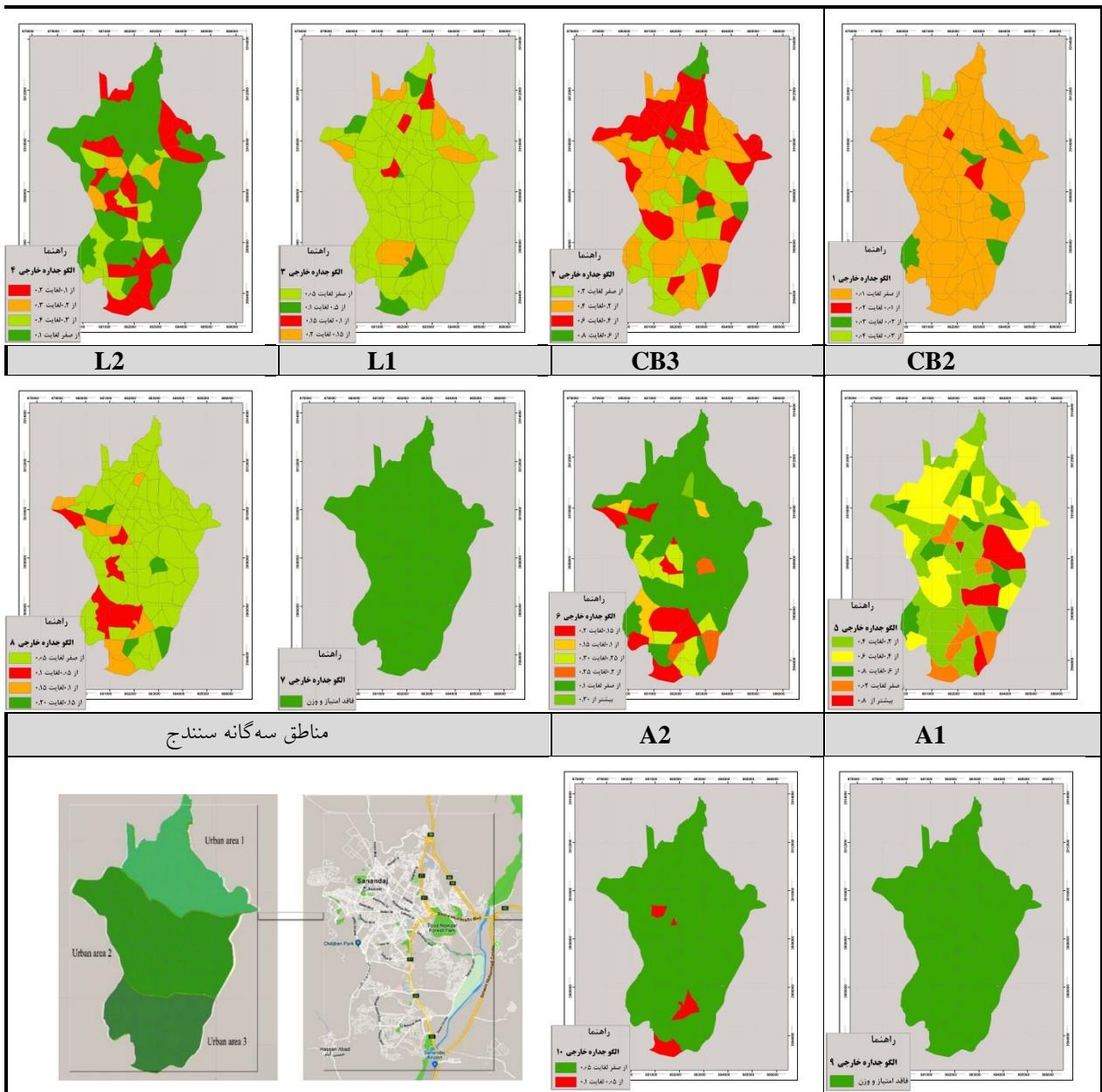
که در آن  $EE_i$  = انرژی نهفته اولیه ساختمان؛  $m_i$  = مقدار مصالح ساختمانی (i)؛  $M_i$  = مقدار انرژی مصالح (i) به ازای هر واحد؛  $E_c$  = انرژی استفاده‌شده در محل برای نصب/ساخت‌وساز اجزای ساختمان.

برای دسته‌بندی انواع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی، در مناطق شهری سنندج، پرسش‌نامه‌هایی از افراد متخصص مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از پیمایش، تمامی انواع جداره‌های خارجی در ۱۰ نوع اصلی و ۳۶ زیرمجموعه طبقه‌بندی شدند. انواع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی در جدول ۳ نشان داده شده است. برای دسته‌بندی انواع جداره‌های متداول خارجی از روش Delphi استفاده شده است. در تکنیک Delphi معمولاً از نظرسنجی کارشناسی برای استخراج داده‌ها استفاده می‌شود (Windle, 2004). پس از تجزیه و تحلیل سؤالات نظرسنجی اولیه، سؤالات دوباره اصلاح و ارسال می‌شوند. 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 (I) سؤالات کلی در مورد انواع جداره‌های متداول خارجی و میزان فراوانی آن‌ها پرسیده شد. پس از آن، نتایج به گونه‌بندی اولیه از جداره‌های متداول خارجی سازمان‌دهی شد و تکرارها حذف شد. در مرحله (II) پرسش‌نامه نهایی از همان متخصصان یا گروه کارشناسان برای ارزیابی میزان فراوانی جداره‌های متداول خارجی ساختمان بر اساس نقشه منطقه بندی به دست آمد. مجدداً نتایج سازمان‌دهی می‌شوند، اما این بار میانگین و حدفاصل برای هرگونه محاسبه می‌شود. در آخرین مرحله پرسشنامه یعنی مرحله (III) از متخصصان خواسته می‌شود تا با توجه به نمرات میانگین و حدفاصل برای هرگونه از جداره‌های خارجی شناسایی شده در هر منطقه را بازبینی کنند. این فرآیند نهایی، اتفاق نظر 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 تحلیلی (AHP) استفاده شد. در این راستا، به منظور تعیین پهنه‌بندی انواع جداره‌های متداول خارجی از مقایسه زوجی توسط نرم‌افزار Fuzzy AHP Solver استفاده شد. سپس نتایج وارد نرم‌افزار Excel شد و پس از آن نقشه پهنه‌بندی به وسیله نرم‌افزار GIS تهیه گردید. در جدول ۲، پهنه‌بندی میزان فراوانی جداره‌های خارجی متداول مسکن محله‌های شهر سنندج به وسیله نقشه‌های (GIS) به تفکیک نشان داده شده است. برای نمایش گرافیکی پراکنش الگوهای ده‌گانه جداره‌های خارجی مسکن مورد بررسی در محلات شهری، وزن معیارها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (بانک اطلاعاتی محلات) وارد و سپس از طریق نرم‌افزار GIS نسبت به طبقه‌بندی وزن الگوها به تفکیک محله‌های مختلف اقدام گردید. لازم به ذکر است از آنجایی که فاصله بین کمترین و بیشترین وزن هر الگو در سطح محلات بسیار متغیر بود، امکان استفاده از طیف‌های سنجشی برای طبقه‌بندی یکسان وزن الگوها میسر نبود؛ لذا طبقه‌بندی وزن و اهمیت هر الگو در سطح محلات مختلف با توجه به بیشینه و کمینه همان الگو و با رعایت فاصله یکسان بین طبقات هر الگو انجام پذیرفت.

جدول ۱. درصد فراوانی جداره‌های خارجی متداول شناسایی شده در محله بندی عرفی سنندج (GIS)

CB1	B3	B2	B1
-----	----	----	----





جدول ۳. انواع جداره های خارجی ساختمان های مسکونی در شهر سنندج ایران

نوع پوشش خارجی			لایه های تشکیل دهنده	گونه جداره	
سیمانی	آجر نما	سنگ نما	بزون	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm) -ملات گچ و خاک - آجر فشاری (۲.۵cm) - آجر فشاری (۱۰cm) -ملات ماسه سیمان (۳cm) B1 آجر فشاری (۱۰cm)	
سیمانی	آجر نما	سنگ نما	بزون	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm) -ملات گچ و خاک - آجر فشاری (۲.۵cm) - آجر فشاری (۲۰cm) -ملات ماسه سیمان (۳cm) B2 آجر فشاری (۲۰cm)	
سیمانی	آجر نما	سنگ نما	بزون پوشش	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm) -ملات گچ و خاک - آجر سوراخ دار (۲.۵cm) - آجر سوراخ دار (۱۰cm) -ملات ماسه سیمان (۳cm) B3 آجر سوراخ دار (۱۰cm)	

سیمانی	آجرنما	سنگ نما	بدون پوشش	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm)-ملات گچ‌وخاک (۲.۵cm)-بلوک سفالی توخالی (۲۰cm)-ملات ماسه‌سیمان (۳cm)	CB1 بلوک سفالی توخالی (۲۰cm)	
سیمانی	آجرنما	سنگ نما	بدون پوشش	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm)-ملات گچ‌وخاک (۲.۵cm)-بلوک سفالی (۱۵cm)-ملات ماسه‌سیمان (۳cm)	CB2 بلوک سفالی توخالی (۱۵cm)	
سیمانی	آجرنما	سنگ نما	بدون پوشش	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm)-ملات گچ‌وخاک (۲.۵cm)-بلوک سفالی توخالی فوم‌دار (۱۵cm)-ملات ماسه- سیمان (۳cm)	CB3 بلوک سفالی توخالی فوم‌دار (۱۵cm)	
سیمانی	آجرنما	سنگ نما	سنگ نما	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm)-ملات گچ‌وخاک (۲.۵cm)-بلوک لیکا (۱۰cm)-لایه عایق پلی استایرن (۵cm)-بلوک لیکا (۱۰cm)-ملات ماسه‌سیمان (۳cm)	L1 بلوک لیکا (۱۰cm)	
سیمانی	آجرنما	سنگ نما	سنگ نما	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm)-ملات گچ‌وخاک (۲.۵cm)-بلوک لیکا (۲۰cm)-ملات ماسه‌سیمان (۳cm)	L2 بلوک لیکا (۲۰cm)	
سیمانی	آجرنما	سنگ نما	سنگ نما	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm)-ملات گچ‌وخاک (۲.۵cm)- AAC-هبلکس (۱۰cm)-لایه عایق پلی استایرن (۵cm)- AAC-هبلکس (۱۰cm)-ملات ماسه‌سیمان (۳cm)	A1 AAC هبلکس (۱۰cm)	
سیمانی	آجرنما	سنگ نما	سنگ نما	- آستر- رنگ روغنی-اندود گچ (۰.۵cm)-ملات گچ‌وخاک (۲.۵cm)- AAC-هبلکس (۱۵cm)-ملات ماسه‌سیمان (۳cm)	A2 AAC هبلکس (۱۵cm)	

### یافته‌های تحقیق

نتایج نهایی انرژی نهفته اولیه و  $Co_2eq$  برای هر مترمربع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی در منطقه تحقیق در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج کل انرژی نهفته اولیه و  $Co_2eq$  برای هر مترمربع جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی در

### شهر سنندج

نوع جداره	نوع پوشش خارجی	انرژی نهفته (MJ)	$Co_2eq$ (kg $CO_2/kg$ )
B1	بدون پوشش	504	11.254
	سنگ نما	793	15.132
	آجرنما	677	16.948
	سیمانی	592	14.908
B2	بدون پوشش	929	21.454
	سنگ نما	1218	25.332
	آجرنما	1102	27.148
	سیمانی	1017	25.108
B3	بدون پوشش	404	8.854
	سنگ نما	693	12.732
	آجرنما	577	14.548

	سیمانی	492	12.508
CB1	بدون پوشش	379	8.254
	سنگ نما	668	12.132
	آجرنما	552	13.948
CB2	سیمانی	467	11.908
	بدون پوشش	304	6.454
	سنگ نما	593	10.332
	آجرنما	477	12.148
CB3	سیمانی	392	10.108
	بدون پوشش	332	7.001
	سنگ نما	621	10.879
	آجرنما	506	12.695
L1	سیمانی	421	10.655
	سنگ نما	769	16.812
	آجرنما	653	18.628
L2	سیمانی	568	16.588
	سنگ نما	668	13.332
	آجرنما	552	15.148
A1	سیمانی	467	13.108
	سنگ نما	879	11.604
	آجرنما	763	13.420
A2	سیمانی	678	11.380
	سنگ نما	665	7.242
	آجرنما	549	9.058
	سیمانی	464	7.018

بر اساس این جدول، واضح است که انرژی نهفته اولیه نوع "بدون پوشش" کم تر از انواع دیگر است. همچنین  $CO_2eq$  این نوع از دیگر انواع کم تر است. این مسئله از ابتدا مشخص بود، زیرا مصالح ساختمانی برای لایه بیرونی جداره ها استفاده نشده است. بین پوشش سنگی و پوشش آجری، پوشش آجری انرژی نهفته اولیه کم تری دارد. نتایج تحلیل ANOVA برای انرژی نهفته اولیه جداره های متداول خارجی در جدول ۵ و آزمون Duncan برای مقایسه طبقه بندی ها در جدول ۶ نشان داده شده است.

#### جدول ۵. نتایج تحلیل ANOVA برای انرژی نهفته اولیه جداره های متداول خارجی

	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F	Sig.
بین گروهی	1181311.972	9	131256.886	9.618	.000
درون گروهی	354829.667	26	13647.295		
کل	1536141.639	35			

#### جدول ۶. آزمایش Duncan برای مقایسه مقادیر انرژی نهفته اولیه

نوع جداره	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4

5	4	441.50			
6	4	470.00	470.00		
4	4	516.50	516.50		
3	4	541.50	541.50		
10	3	559.33	559.33		
8	3	562.33	562.33		
1	4	641.50	641.50	641.50	
7	3		663.33	663.33	
9	3			773.33	
2	4				1066.50
Sig.		.056	.065	.168	1.000

با توجه به جدول ۶، تفاوت انرژی نهفته اولیه در بین انواع جداره‌های مختلف در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. نتایج آزمون Duncan نشان می‌دهد که کم‌ترین انرژی اولیه مربوط به جداره نوع ۵ (بلوک‌های سفالی سوراخ‌دار ۱۵ سانتی‌متری) و بالاترین انرژی اولیه مربوط به جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری) است. نتایج تحلیل ANOVA برای تعیین CO<sub>2</sub>eq جداره‌های متداول خارجی در جدول ۷ و آزمون Duncan برای مقایسه طبقه‌بندی‌ها در جدول ۸ نشان داده شده است.

#### جدول ۷. نتایج تحلیل ANOVA برای تعیین CO<sub>2</sub>eq جداره‌های خارجی

	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F	Sig.
بین گروهی	779.312	9	86.590	20.013	.000
درون‌گروهی	112.496	26	4.327		
کل	891.808	35			

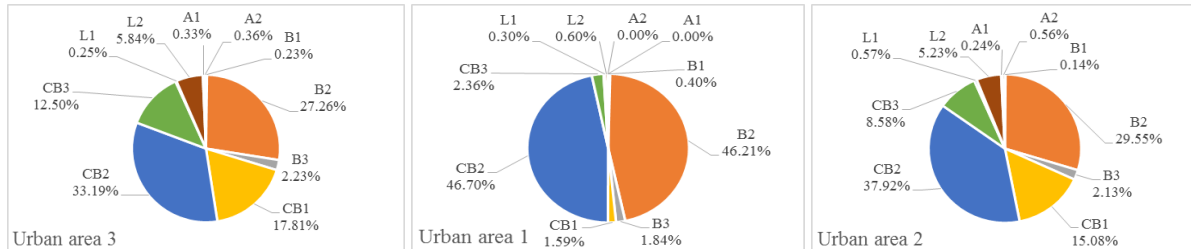
#### جدول ۸. آزمون Duncan برای مقایسه دسته‌بندی‌های CO<sub>2</sub>eq

نوع جداره	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
10	3	7.77267					
5	4	9.76050	9.76050				
6	4	10.30750	10.30750	10.30750			
4	4		11.56050	11.56050	11.56050		
9	3		12.13467	12.13467	12.13467		
3	4		12.16050	12.16050	12.16050		
8	3			13.86267	13.86267		
1	4				14.56050	14.56050	
7	3					17.34267	
2	4						24.76050
Sig.		.137	.182	.050	.097	.087	1.000

طبق جدول ۷، تفاوت CO<sub>2</sub>eq در بین انواع جداره‌های مختلف در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. نتایج آزمون Duncan نشان می‌دهد که پایین‌ترین مقدار CO<sub>2</sub>eq مربوط به جداره نوع ۱۰ (بلوک هبلکس AAC ۱۵ سانتی‌متری) با لایه میانی از پلی‌استایرن منبسط و بالاترین میزان CO<sub>2</sub>eq متعلق به جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی‌متری) است. پس از جداره نوع ۱۰، جداره نوع ۵ (بلوک‌های سفالی سوراخ‌دار ۱۵ سانتی‌متری) کم‌ترین مقدار CO<sub>2</sub>eq را دارد. میزان درصد انواع جداره‌های مختلف خارجی در سه منطقه شهری در جدول ۹ و شکل ۲ نشان داده شده است.

#### جدول ۹. مقادیر درصد انواع جداره‌های مختلف در سه منطقه شهری

نوع جداره	B1	B2	B3	CB1	CB2	CB3	L1	L2	A1	A2
منطقه شهری										
منطقه ۱ شهری	0.40	46.21	1.84	1.59	46.70	2.36	0.30	0.60	0.00	0.00
منطقه ۲ شهری	0.14	29.55	2.13	15.08	37.92	8.58	0.57	5.23	0.24	0.56
منطقه ۳ شهری	0.23	27.26	2.23	17.81	33.19	12.50	0.25	5.84	0.33	0.36



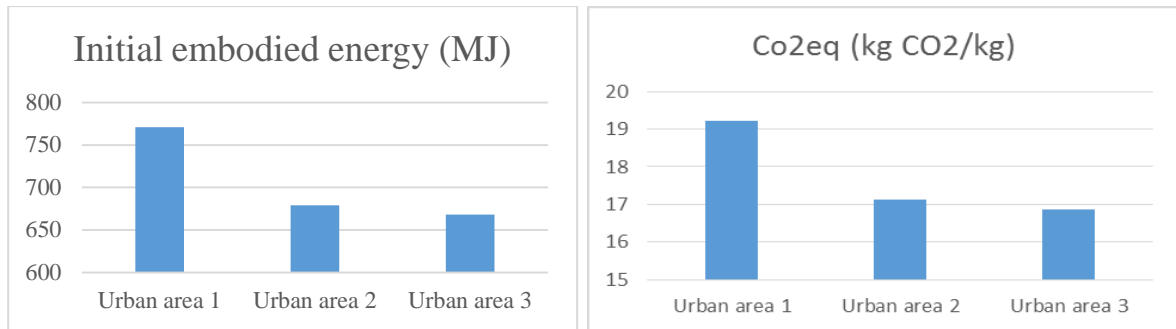
شکل ۲. مقادیر درصد انواع جداره های مختلف در سه منطقه شهری

خوشبختانه بسیاری از ساختمان ها در شهر سنندج در هر ۳ منطقه شهری دارای الگوی جداره نوع ۵ (CB2) هستند، بنابراین در مورد انرژی نهفته، به نظر می رسد که شرایط مناسبی داشته باشد، اما در مقابل، میزان فراوانی جداره نوع ۲ (B2) بالا و نزدیک به جداره نوع ۵ است. از آنجایی که آجر فشاری (۲۰ سانتی متری) دارای بالاترین میزان انرژی نهفته است، مقدار زیادی هدر رفت انرژی برای این نوع جداره اتفاق می افتد. بنابراین به نظر می رسد که برای الگوی ساخت و ساز در خصوص جداره های خارجی ساختمان، نیاز به تغییر و تجدیدنظر اساسی وجود دارد. آجر فشاری سنتی از قدیمی ترین و در دسترس ترین مصالح ساخت و ساز در منطقه تحقیق است. با توجه به نتایج کلی حاصل از انرژی نهفته اولیه و  $CO_2eq$  جداره های متداول خارجی ساختمان های مسکونی و میزان فراوانی انواع جداره های مختلف در سه منطقه شهری، می توان نتیجه گرفت که مقدار انرژی نهفته اولیه و  $CO_2eq$  برای هر مترمربع جداره های خارجی در هر منطقه شهری برای یک جداره خارجی منتخب (آجر فشاری) را می توان مطابق آنچه در جدول ۱۰ و شکل ۳ نشان داده شده است، محاسبه نمود.

جدول ۱۰: میزان انرژی نهفته اولیه و  $CO_2eq$  برای هر مترمربع جداره های خارجی در مناطق شهری برای جداره

#### خارجی منتخب

منطقه شهری	انرژی نهفته (MJ)	Co2eq (kg CO2/kg)
منطقه ۱ شهری	771	19.223
منطقه ۲ شهری	679	17.137
منطقه ۳ شهری	668	16.875



شکل ۳. میزان انرژی نهفته اولیه و CO<sub>2</sub>eq برای هر مترمربع جداره‌های خارجی در مناطق شهری برای جداره خارجی منتخب

منطقه شهری ۱ دارای بیش‌ترین میزان مصرف انرژی نهفته است و منطقه شهری ۳ دارای کمترین مصرف انرژی نهفته برای هر مترمربع جداره‌های خارجی است که این امر به دلیل سهم بالای درصد جداره نوع B2 در مناطق شهری ۱ (۴۶.۲۱٪) و سهم کم‌تر آن در مناطق شهری ۳ (۲۷.۲۶٪) است. همچنین منطقه شهری ۱ دارای بالاترین مقدار CO<sub>2</sub>eq و منطقه شهری ۳ دارای پایین‌ترین مقدار CO<sub>2</sub>eq برای هر مترمربع جداره‌های خارجی است. این نتایج برای مقادیر CO<sub>2</sub>eq مناطق مختلف شهری همانند نتایج مصرف انرژی نهفته است. سلاوکویچ و رادی‌ووژیچ در سال ۲۰۱۵ هفت نوع جداره خارجی را تحلیل و مقایسه کردند و به نتایجی در رابطه با ترجیح مصالح عایق‌بندی مختلف از جنبه انرژی نهفته رسیدند. روش‌شناسی آن‌ها برای ارزیابی انرژی نهفته در ۱ مترمربع جداره خارجی بر اساس گروه‌بندی فازهای چرخه حیات به مصرف انرژی ساختمان بود. انرژی نهفته اولیه محاسبه شده آن‌ها در ۱ مترمربع برای انواع جداره‌های خارجی بین 548.02 تا 4133.60 MJ بود (Slavković & Radivojević, 2015).

#### نتیجه‌گیری و دستاورد علمی پژوهشی

تحقیقات متعددی به ارزیابی چرخه حیات ساختمان در مقیاس‌های مختلف پرداخته‌اند. در این خصوص از سویی تسری نتایج تحقیقات به نقاط جغرافیایی مختلف، بدون توجه به بستر و خاستگاه محدوده مطالعاتی غیرممکن است، از سویی دیگر این تحقیقات اغلب به‌صورت کلی و در مقیاس وسیع بدون در نظر گرفتن جزئیات تأثیرگذار بر مصرف انرژی و مراحل محاسباتی آن در قالب الگوریتم منظم در ارزیابی چرخه حیات ساختمان پرداخته‌اند. در این میان جداره‌های خارجی مسکن شهری به عنوان مهم‌ترین عامل در مصرف انرژی موردتوجه پژوهش حاضر قرار گرفته است. تدوین روش جامع برگرفته از چرخه حیات ساختمان که بتواند به ارزیابی و اندازه‌گیری انرژی مصرفی در دوره نهفته فاز تولید را با توجه به الگوهای جداره‌های خارجی مسکن شهری و همچنین واکاوی متغیرهای تأثیرگذار در مصرف انرژی، چشم‌اندازی وسیع برای مدیران، برنامه‌ریزان، متخصصین حوزه ساخت و طراحان در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی را متصور می‌کند. با توجه به اختصاص سهم بالای مصرف انرژی در شهرها به‌واسطه مسکن، سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌هایی در جهت کنترل و کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌های زیست‌محیطی در مقیاس خرد و کلان در سطوح مختلف مطرح شد. در ایران نیز مهم‌ترین و کاربردی‌ترین حوزه برنامه‌ریزی انرژی شامل بخش ساختمان و عایق‌کاری پوسته خارجی در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان گردآوری شده است. این قوانین صرفاً به دوره بهره‌برداری ساختمان با دیدی کلی در شرایط محاسباتی حرارتی پایدار بدون در نظر گرفتن تمهیدات بعضاً اجرایی-عملیاتی و همچنین نظارتی نگارش شده که تاکنون محاسبات انرژی

نهفته در آن تدوین نشده است. در صورتی که بسیاری از کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته پیشرو در زمینه بهینه سازی مصرف انرژی، روش های ارزیابی و قوانین مدونی با چشم انداز دستیابی به توسعه پایدار را با کیفیتی مطلوب تهیه و تنظیم کرده اند. از میان روش های ارزیابی مصرف انرژی در جهت بهینه سازی و کاهش مصرف انرژی، روش ارزیابی چرخه حیات ساختمان مورد توجه و تأیید تحقیقات متعددی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر با تأکید بر برآورد انرژی دوره نهفته و ارائه روش محاسباتی کاربردی در خصوص جداره های خارجی مسکن شهری نتایج نشان می دهد که پایین ترین میزان انرژی اولیه متعلق به جداره نوع ۵ (بلوک سفالی سوراخ دار ۱۵ سانتی متری) و بالاترین میزان انرژی اولیه متعلق به جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی متری) و به ترتیب برابر ۴۴۱.۵ و ۱۰۶۶.۵ است. همچنین پایین ترین سطح CO<sub>2</sub>eq متعلق به جداره نوع ۱۰ (بلوک هبلکس AAC ۱۵ سانتی متری) با لایه میانی از پلی استایرن منبسط و بالاترین سطح CO<sub>2</sub>eq متعلق به جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی متری) و به ترتیب برابر ۷.۷۷۳ CO<sub>2</sub>/kg و ۲۴.۷۶۱ kg CO<sub>2</sub>/kg است. منطقه شهری ۱ دارای بیشترین مصرف انرژی نهفته و Co<sub>2</sub>eq و منطقه شهری ۳ دارای کمترین مصرف انرژی نهفته و Co<sub>2</sub>eq برای هر مترمربع جداره های خارجی است که این امر به دلیل سهم بالای درصد جداره نوع ۲ (آجر فشاری ۲۰ سانتی متری) در مناطق شهری ۱ (۴۶.۲۱٪) و سهم کم تر آن در مناطق شهری ۳ (۲۷.۲۶٪) است. باتوجه به نتایج فوق و اتلاف انرژی ناشی از این بخش از ساختمان و اهمیت مصرف بهینه انرژی، به نظر می رسد که باید در تصمیم گیری کلان مدیریت شهری برای جایگزینی و یا اصلاح وضع موجود در قالب آیین نامه ها و دستورالعمل های اجرایی تدابیری اندیشید.

## منابع

- Acquaye, A., Duffy, A., & Basu, B. (2011). Embodied emissions abatement—A policy assessment using stochastic analysis. *Energy Policy*, 39(1), 429-441.
- 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.
- 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.
- Brás, A., & Gomes, V. (2015). LCA implementation in the selection of thermal enhanced mortars for energetic rehabilitation of school buildings. *Energy and Buildings*, 92, 1-9.
- Cantrell, J. M., & Wepfer, W. J. (1984). Shallow ponds for dissipation of building heat: a case study. *ASHRAE transactions*, 90(2), 238-246.
- Copiello, S. (2016). Economic implications of the energy issue: Evidence for a positive non-linear relation between embodied energy and construction cost. *Energy and buildings*, 123, 59-70.
- Coyle, E. D., & Simmons, R. A. (2014). *Understanding the global energy crisis*. Purdue University Press.
- Crowther, P. (1999). Design for disassembly to recover embodied energy.
- Ding, G. K. C. (2004). The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities (Doctoral dissertation).
- Ding, G. K. C. (2004). The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities (Doctoral dissertation).
- Dixit, M. K., Culp, C. H., & Fernández-Solís, J. L. (2013). System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 153-164.

Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2012). Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(6), 3730-3743.

Dixit, M. K., & Singh, S. (2018). Embodied energy analysis of higher education buildings using an input-output-based hybrid method. *Energy and Buildings*, 161, 41-54.

Hamidi Razi, D., & Feshari, M. (2017). Investigation of Per capita CO2 Dynamics in OPEC Countries ( $\beta$  and  $\sigma$  Convergence Approach). *Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 87-99.

Hamilton-MacLaren, F., Loveday, D. L., & Mourshed, M. (2009). The calculation of embodied energy in new build UK housing.

Hammond, G. P., Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, Vol. 161(2), pp. 87-98. DOI: 10.1680/ener.2008.161.2.87.

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.

Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., & Acquaye, A. (2012). Optimal Ranking of Retrofit Options for Emissions Reduction in Non-Domestic Buildings-A Review.

Kavanaugh, S., Rafferty, K. (1997). Ground source heat pumps. *Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*. American Society of heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA: USA.

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

Miller, A. (2001). Embodied Energy—A life-cycle of transportation energy embodied in construction materials. In COBRA 2001, *Proceedings of the RICS Foundation Construction and Building Research Conference*.

Newton, J., & Westaway, N. (2001). *Sustainable Homes: Embodied energy in residential property development: A guide for registered social landlords*. Hastoe Housing Association.

Praseeda, K. I., Reddy, B. V., & Mani, M. (2016). Embodied and operational energy of urban residential buildings in India. *Energy and Buildings*, 110, 211-219.

Praseeda, K. I., Venkatarama Reddy, B. V., Mani, M. (2016). Embodied and operational energy of urban residential buildings in India. *Energy and Buildings*, Vol. 110, pp. 211-219.

Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K. K. (2010). Life Cycle Energy Analysis of Buildings: An Overview. *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 1592-1600.

Rawlinson, S., & Weight, D. (2007). Sustainability: embodied carbon. *Building Magazine*, 12, 88-91.

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

Riazi, M., Hoseini, S. M. (2011). A look to the policies of optimizing energy production and consumption in the construction sector of Iran, the first International Conference on Emerging Trends in Maintaining Energy, Tehran, Amirkabir Industrial University.

Shadram, F., Mukkavaara, J. (2018). An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy. *Energy and Buildings*, Vol. 158, pp. 1189-1205.

Slavković, K., Radivojević, A. (2015). Evaluation of energy embodied in the external wall of single-family buildings in the process of energy performance optimization. *Energy Efficiency*, Vol. 8, pp. 239-253.

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

Statistical Center of Iran, (2016). *General population and housing census*. Sanandaj: Statistical Center of Iran. [https://amar.sci.org.ir/index\\_e.aspx](https://amar.sci.org.ir/index_e.aspx).



Steele, J. (1997). Sustainable architecture: principles, paradigms, and case studies. New York: McGraw-Hill Inc.

Tiwari, P. (2001). Energy efficiency and building construction in India. *Building and Environment*, 36(10), 1127-1135.

Treloar, G. J., Love, P. E., & Holt, G. D. (2001). Using national input/output data for embodied energy analysis of individual residential buildings. *Construction Management and Economics*, 19(1), 49-61.

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, (2001). World urbanization project: the 1999 revision. New York: The United Nations Population Division.

Vilches, A., Garcia-Martinez, A., Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy and Buildings*, Vol. 135(15), pp. 286-301.

Windle, P. E. (2004). Delphi technique: assessing component needs. *Journal of PeriAnesthesia Nursing*, Vol. 19(1), pp. 46-47.