

## ارزیابی مصرف انرژی طول عمر یک ساختمان مسکونی واقعی در شهر تهران \*

فاطمه یوسفی<sup>۱</sup>، یعقوب قلی پور<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دکتری مدیریت ساخت، دانشکده عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> استاد گروه پژوهشی بهینه‌سازی مهندسی، دانشکده عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۹/۲۹، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۷/۲/۱۹)

### چکیده

در میان ملاک‌های موجود برای تشخیص ساختمان‌های کم انرژی، مصرف انرژی طول عمر ساختمان یکی از جامع‌ترین معیارها می‌باشد که می‌تواند برآورد درستی از کل انرژی مصرفی ساختمان را در اختیار مهندسان قرار دهد. با توجه به عدم وجود پیشینه مناسب در خصوص بررسی وضعیت انرژی طول عمر ساختمان‌ها در ایران، در این مطالعه سعی شده است که مصرف انرژی طول عمر یک ساختمان واقعی با جزییات کامل برآورد گردد تا ضمن ارائه پارامترهای موثر و چالش‌های موجود در هر بخش، روند محاسبه به عنوان یک الگو قابل استفاده باشد. بدین منظور، یک ساختمان واقعی با اسکلت بتنی و پلان متداول که اخیراً در شهر تهران ساخته شده، به عنوان نمونه انتخاب گردید و ضمن تشریح روند محاسبه مصرف انرژی طول عمر، انرژی مراحل مختلف چرخه حیات آن برآورد شد. دستاوردهای این مطالعه حاکی از آن است که سهم انرژی نهفته اولیه ساختمان معادل ۱۳٪ از کل انرژی طول عمر آن می‌باشد و در محدوده متداول ارقام جهانی قرار دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که ۸۵٪ مصرف انرژی طول عمر ساختمان نمونه بتنی مربوط به دوره بهره‌برداری است که با توجه به طول عمر نسبتاً کم ساختمان‌ها در ایران نسبت به مقادیر جهانی، رقم بالایی محسوب می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

انرژی طول عمر، ساختمان مسکونی، انرژی نهفته، اسکلت بتنی، ایران.

\* این مقاله برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان: "کمینه‌سازی مصرف انرژی طول عمر ساختمان‌های مسکونی متداول ایران با توجه به پارامترهای طراحی و روش ساخت" است که با راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره جناب آقای دکتر یداله سبوحی به انجام رسیده است.  
\* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۳۲۷۷۰۲۳، شماره: ۰۲۱-۶۶۴۰۳۸۰۸، E-mail: ygholipour@ut.ac.ir

## مقدمه

مرحله تولید افزایش یابد. بدین ترتیب طی دو مکانیزم مختلف یعنی افزایش مصرف انرژی دوره تولید و همچنین کاهش مصرف انرژی دوره بهره‌برداری، سهم مرحله تولید افزایش می‌یابد. سهم مرحله تولید برای ساختمان‌های کم انرژی در حدود ۶۰-۴۰٪ است که نشان از اهمیت این مرحله از چرخه عمر سازه دارد (Praseeda et al., 2016, 213; Thormark, 2002, 432) و نکاتاراما ردی و جاگادیش (Venkatarama Reddy & Jagadish, 2003) میزان انرژی نهفته تولید ساختمان مسکونی ساخته شده با روش‌های ساخت متنوع و مصالح کم مصرف را برآورد نموده و پس از مقایسه با ساختمان‌های معمول نشان دادند که با اعمال تمهیداتی در رابطه با روش ساخت و انتخاب مصالح مناسب می‌توان سهم انرژی نهفته تولید را به مقدار ۴۰-۳۰٪ کاهش داد. اگرچه غالباً بخش تولید مصالح، بیشترین سهم از انرژی نهفته اولیه را به خود اختصاص می‌دهد، ولی بخش‌های حمل و نقل و برپایی ساختمان نیز در برخی مواقع نقش قابل توجهی در تعیین مقدار انرژی نهفته اولیه ایفا می‌کنند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که برخی از محققین همچون دنگ و همکاران (Deng et al., 2011, 105) مقدار جزئی ۰٫۰۲ گیگاژول بر متر مربع (معادل ۰٫۵٪ از انرژی تولید مصالح ساختمان) را برای مصرف انرژی برپایی اسکلت بتنی ارائه کرده‌اند؛ در حالی که برخی دیگر از محققین نظیر جونبلا و همکاران (Junnila et al., 2006, 15) ارقامی به مراتب بزرگ‌تر (حدود ۱٫۱۸ گیگاژول بر متر مربع که معادل ۲۳٪ از انرژی تولید مصالح ساختمان است) را گزارش نموده‌اند. این وسعت نتایج در خصوص انرژی حمل و نقل نیز مشاهده می‌شود. به طوریکه رامش و همکاران (Ra-mesh et al., 2013, 39) سهم انرژی حمل و نقل را ۴٪ از انرژی نهفته تولید مصالح ساختمان (معادل ۰٫۶۵ گیگاژول بر متر مربع) بیان می‌کنند، در حالیکه ناسن و همکاران (Nassen et al., 2007, 1602) این سهم را در حدود ۲۱٪ (معادل ۰٫۲۷ گیگاژول بر متر مربع) گزارش کرده‌اند. پراسیدا و همکاران (Praseeda et al., 2016, 212) با اشاره به پژوهش‌های گذشته، در مجموع محدوده ۸٫۳۵-۱ گیگاژول بر متر مربع را برای انرژی نهفته اولیه و محدوده ۱٫۲-۰٫۰۸ گیگاژول بر متر مربع (در هر سال) را برای انرژی بهره‌برداری سالانه عنوان کرده‌اند. شرایط آب و هوایی و الگوهای رفتاری متفاوت، مصالح و طراحی‌های مختلف ساختمان در کنار محدوده‌های متفاوت در نظر گرفته برای چرخه عمر ساختمان‌ها در مطالعات گذشته سبب شده است که این پژوهش‌ها، نتایج کاملاً متفاوتی را برای انرژی در مراحل مختلف عمر ساختمان ارائه نمایند. بعلاوه فرضیات پژوهشگران در خصوص طول عمر ساختمان نیز تاثیر قابل توجهی در تعیین سهم انرژی بهره‌برداری از کل انرژی ساختمان دارد که غالباً بین ۳۰ سال (همچون Kua & Wong, 2012, 9-10) تا ۱۰۰ سال (همچون Nassen et al., 2012, 363)؛ (Mithraratne & Vale, 2004, 486-487) در نظر گرفته می‌شود.

بیش از سه دهه است که صنعت ساختمان‌های مسکونی در دنیا سیر تحولی خود را از ساختمان‌های سنتی به سمت ساختمان‌های کم انرژی شروع کرده است. اغلب وقتی صحبت از مصرف انرژی ساختمان می‌شود، مقصود میزانی از انرژی است که به طور مستقیم در دوره بهره‌برداری ساختمان‌ها تقاضا می‌شود. این در حالی است که ساختمان‌ها علاوه بر انرژی مورد نیاز در دوره بهره‌برداری، به طور غیرمستقیم نیز انرژی زیادی در طول عمر خود مصرف می‌کنند.

انرژی طول عمر ساختمان در واقع مجموع انرژی نهفته (EE) و انرژی بهره‌برداری (OE) از آن است. انرژی نهفته ساختمان، ماهیتی متفاوت از انرژی بهره‌برداری دارد و از تجمیع سه انرژی نهفته اولیه، تعمیر و تخریب حاصل می‌شود (Vukotic et al., 2010, 148; Dixit et al., 2013, 153). انرژی مورد نیاز برای ساخت مصالح و تجهیزات به همراه مقدار انرژی مصرفی در مرحله احداث بنا طی فرآیند برپایی، حمل و اجرا، در مجموع انرژی نهفته اولیه ساختمان را تشکیل می‌دهند. مقداری از انرژی نیز که در مرحله بهره‌برداری برای موارد تعویض و تعمیر تاسیسات و اجزای ساختمان صرف می‌شود، انرژی نهفته تعمیر ساختمان (EER) نام دارد و آن سهم از انرژی که پس از اتمام دوره سرویس تاسیسات، اجزا یا مصالح ساختمان برای استفاده مجدد، بازیافت یا دیوی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد، به نام انرژی نهفته تخریب (EED) شناخته می‌شود (Dixit et al., 2013, 156; Dixit et al., 2010, 1239).

مطالعات پیشین در خصوص ارزیابی چرخه عمر (LCA) ساختمان‌های مسکونی، بر اهمیت مرحله بهره‌برداری تاکید دارند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که در خانه‌های معمول، مرحله بهره‌برداری بیشترین سهم را از کل مصرف انرژی ساختمان دارا می‌باشد و می‌تواند بر انرژی صرف شده در مرحله تولید سیطره یابد. به همین دلیل بخش کثیری از تحقیقات مربوط به بهینه‌سازی مصرف انرژی بر مرحله بهره‌برداری متمرکز شده‌اند. اغلب مطالعاتی که در سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۹۰ انجام شده، سهم مرحله تولید از کل انرژی مصرفی ساختمان‌های معمولی را حدود ۲۰-۱۰٪ برآورد کرده‌اند (Peuportier, 2001, 449; Crowther 1999; Winter & Hestnes, 1999; Adalbert, 1997)؛ در حالی که مطالعاتی که بعدتر انجام شده است، عموماً دامنه بزرگ‌تری را به مرحله تولید ساختمان‌های معمول اختصاص داده‌اند که تا ۳۸٪ نیز رسیده است (Praseeda et al., 2016, 213). مصرف انرژی مرحله تولید، به شدت به تلاش‌هایی که برای کاهش مصرف انرژی دوره بهره‌برداری انجام می‌شود، وابسته است. راهکارهایی همچون به کار بردن عایق‌های حرارتی در عناصر پوسته ساختمان، استفاده از سایه بان‌های داخلی و یا خارجی برای موقعیت‌های مختلف نما، و یا استفاده از سیستم‌های خورشیدی، بادی و یا ترکیبی، سبب می‌شود که مصالح بیشتری برای ساخت مصرف شود و بالطبع مصرف انرژی

در آسیا (و ۳۵٪ در اروپا) انجام گردیده، منظور شده است. علیرغم مطالعات متعددی که در دنیا برای محاسبه مصرف انرژی طول عمر ساختمان‌های مسکونی انجام گردیده، جستجوی انجام شده توسط نویسندگان حاکی از آن است که مطالعات اندکی در ایران در این حوزه انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش فروزان و همکاران (۱۳۹۵) اشاره نمود که در آن، مصرف انرژی نهفته الگوهای مختلف ساختمانی در بافت مسکونی شهر شیراز مورد توجه قرار گرفت و اسکلت‌های ساختمانی از منظر میزان مصرف سرانه انرژی نهفته رده‌بندی شدند. نتایج مطالعات فروزان و همکاران نشان می‌دهد که اسکلت فلزی آجری (اسکلت فلزی با سقف تیرچه بلوک و دیوار چینی آجری) بیشترین سرانه مصرف انرژی نهفته، و اسکلت آجر و چوب (سقف چوب سبک و دیوار چینی آجری) کمترین سرانه مصرف انرژی نهفته را دارا می‌باشد. مقصود از انرژی نهفته در این تحقیق، انرژی تولید مصالح ساختمانی می‌باشد که با برآورد مقدار مصالح مورد نیاز برای برپایی یک ساختمان و بهره‌گیری از مقادیر ارائه شده توسط مرجع بٹ (Hammond & Jones, 2008)، محاسبه گردید. براساس محاسبات فروزان (فروزان و همکاران، ۱۳۹۵، ۴۲)، خانه‌های حیاط مرکزی با ۳٫۶ گیگاژول بر متر مربع کمترین سرانه انرژی تولید مصالح را در بین الگوهای مسکن (ویلا، آپارتمانی چند طبقه و ...) دارا هستند.

طول عمر ساختمان، علاوه بر اثرگذاری مستقیم بر انرژی بهره‌برداری، در بزرگی انرژی تعمیر نیز بسیار موثر است. دیکسیت و همکاران (Dixit et al., 2014, 167 & 171-173) با بررسی نتایج ارائه شده توسط مطالعات پیش از خود که روی ۶۴ ساختمان مسکونی آپارتمانی انجام شده بود، نشان دادند که همبستگی مثبت و متوسطی بین انرژی تعمیر و نگهداری ساختمان با طول عمر آن وجود دارد. انرژی تعمیر و نگهداری ساختمان‌های بررسی شده در محدوده بسیار وسیع ۸ تا ۲۱۳ مگاژول بر متر مربع در سال قرار دارد که چیزی در حدود ۶۰٪-۲٪ از کل انرژی نهفته ساختمان (منهای انرژی تخریب) می‌باشد. بجز پارامتر طول عمر ساختمان، گستردگی مقادیر انرژی تعمیر و نگهداری به محدوده تحقیق نیز بستگی تام دارد.

تولید مصالح، حمل و نقل و برپایی، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری اصلی‌ترین بخش‌های یک مطالعه چرخه عمر ساختمان هستند. مرحله تخریب به دلیل پیچیدگی‌های مربوطه و سهم اندکی که در انرژی طول عمر ساختمان (حدود ۱٪) دارد (Ramesh et al., 2010, 1594)، کمتر در مطالعات طول عمر لحاظ می‌شود. این مرحله از چرخه‌ی حیات ساختمان، حتی در مطالعاتی که صرفاً به بررسی انرژی نهفته ساختمان پرداخته‌اند، نیز غالباً بررسی نمی‌شود. براساس مقاله‌ای از دیکسیت (Dixit, 2017, 397) مرحله تخریب تنها در ۲۲٪ از مطالعاتی که در حوزه انرژی نهفته ساختمان‌ها

## ۱- محدوده مطالعه

### ۱-۱- ساختمان نمونه

ساختمان در نظر گرفته شده در این مطالعه، یک ساختمان مسکونی ۴ طبقه می‌باشد که در هر طبقه آن، دو واحد مسکونی با زیربنای تقریبی ۱۲۰ متر مربع برای هر واحد، واقع شده است. طبقه همکف این ساختمان از سمت حیاط با فضای بیرون در ارتباط است و بعنوان پارکینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. موقعیت و طرح نمای این بنا که یک نمونه متداول از آپارتمان‌های موجود در کلان شهر تهران می‌باشد، در تصویر ارائه شده است. این ساختمان از سمت شرق و غرب با دو ساختمان مسکونی دیگر مجاور بوده و در جبهه شمالی و جنوبی دارای پنجره است. اسکلت ساختمان نیز بتنی با سقف تیرچه بلوک می‌باشد. جزئیات بیشتر در خصوص این ساختمان در مقاله پیشین مولفین (Yousefi et al., 2017) که طی آن انرژی دوره بهره‌برداری این ساختمان محاسبه شده، قابل مشاهده است. ساختمان در نظر گرفته شده در کلان شهر تهران قرار دارد که بیشترین سهم ساخت و ساز واحدهای مسکونی در کشور را دارا می‌باشد. براساس آمار منتشر شده از سوی مرکز آمار ایران (۱۳۹۱- تابستان ۱۳۹۵)، شهر تهران بالغ بر ۲۰٪ درصد از کل



تصویر ۱- نمای کلی ساختمان (دید شمال شرقی).

اهمیت هستند که در محاسبات مورد توجه قرار می‌گیرند. روند کلی محاسبه مصرف انرژی طول عمر ساختمان نمونه براساس محدوده در نظر گرفته شده، مطابق تصویر ۲ می‌باشد. بدین ترتیب که ابتدا هندسه ساختمان در نرم‌افزار SketchUp طراحی گردید و سپس مدل انرژی براساس مشخصات واقعی ساختمان و ساکنین آن در نرم‌افزار EnergyPlus تهیه شد. مصرف انرژی بهره‌برداری ساختمان در دوره یکساله با استفاده از مدل انرژی و داده‌های آب و هوایی به فرمت TMY2، بدست آمد و با توجه به طول عمر ساختمان برای کل دوره بهره‌برداری تخمین زده شد. در ادامه با توجه به حجم مصالح محاسبه شده به کمک مدل سه بعدی ساختمان، انرژی تولید مصالح بدست آمد و با در نظر گرفتن قبوض منتشر شده در دوره ساخت در کنار نظرات پیمانکاران و همچنین نتایج تحقیقات پیشین، انرژی حمل و نقل مصالح، انرژی برپایی و در نهایت انرژی تعمیر و نگهداری ساختمان برآورد گردید. در انتها نیز با جمع انرژی‌های محاسبه شده، انرژی طول عمر آپارتمان حاصل شد. نتایج بدست آمده طی محاسبات هریک از بخش‌های طول عمر ساختمان در ادامه ارائه شده است.

## ۲- انرژی طول عمر ساختمان

### ۲-۱- انرژی نهفته دوره پیش از ساخت

انرژی نهفته دوره پیش از ساخت با در اختیار داشتن حجم مصالح و انرژی نهفته هر واحد مصالح از رابطه (۲) (Ramesh et al., 2010, 1593) محاسبه می‌شود که در آن  $E_{mi}$  انرژی نهفته تولید مصالح  $i$  بر حسب مگاژول بر کیلوگرم، و  $V_{mi}$  وزن مصالح  $i$  بر حسب کیلوگرم و  $n$  تعداد مصالح است. در این رابطه برای تبدیل واحد MEE از مگاژول به گیگاژول، از ضریب  $10^{-3}$  استفاده شده است.

$$MEE = \sum_{i=1}^n (E_{M_i} * V_{M_i}) * 10^{-3} \quad (2)$$

پروانه‌های احداث واحد مسکونی که از سوی شهرداری‌های کشور در سال‌های مذکور صادر شد را به خود اختصاص داده بود.

### ۲-۲- محدوده چرخه عمر

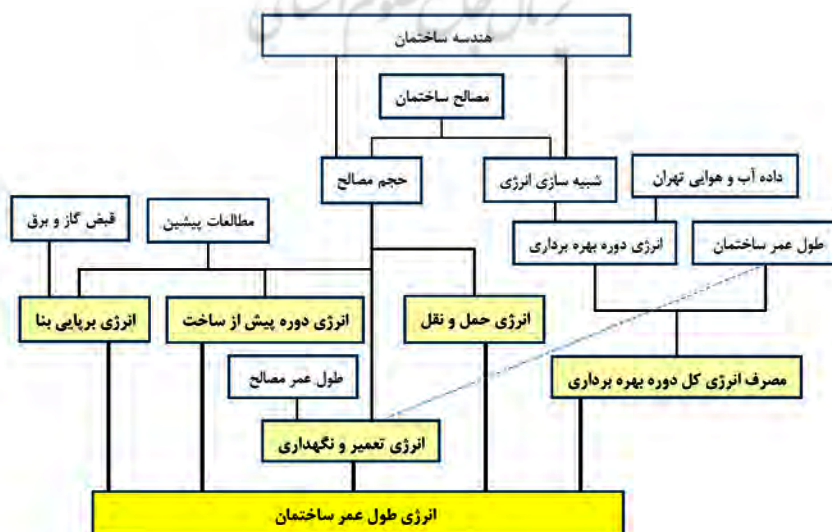
در این تحقیق، محدوده‌ی در نظر گرفته شده برای چرخه عمر ساختمان عبارت است از: دوره پیش از ساخت، دوره احداث، دوره بهره‌برداری و دوره تعمیر و نگهداری. از آنجایی که براساس تحقیقات پیشین، کمتر از ۱٪ انرژی کل چرخه عمر ساختمان مربوط به مرحله پایانی (تخریب و بازیافت) است (Ramesh et al., 2003; Kotajji et al., 2010, 1594) و بخش قابل توجهی از مصالح یا بازیافت می‌شوند و یا مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند و با توجه به اینکه فرآیند/ استاندارد مشخص و اطلاعات کافی و قابل اتکایی در خصوص بازیافت مصالح در ایران وجود ندارد، در این مطالعه، اثرات این مرحله از چرخه عمر در نظر گرفته نشده است. بدین ترتیب برای محاسبه انرژی چرخه عمر (LCE) ساختمان نمونه، از رابطه (۱) استفاده شده است.

(۱)

$$LCE = EE + OE = MEE + CE + EER + OE$$

که در آن MEE انرژی مصرفی برای ساخت مصالح، CE انرژی مصرفی برای احداث ساختمان (مشمول بر انرژی برپایی و حمل و نقل)، EER انرژی مصرفی برای تعمیر و نگهداری ساختمان در دوره بهره‌برداری، EE انرژی نهفته، و OE انرژی مصرفی ساختمان توسط ساکنین در کل دوره بهره‌برداری می‌باشد. برای انرژی، واحدهای مختلفی وجود دارد که در حوزه ساختمانی، اغلب از واحدهای مگاژول (MJ) یا گیگاژول (GJ) بهره گرفته می‌شود.

محاسبه هریک از این انرژی‌ها به عوامل متعددی بستگی دارد که مهم‌ترین آنها هندسه ساختمان و حجم مصالح مصرفی است که در همه مراحل محاسبات انرژی ساختمان حضور فعال و تعیین‌کننده‌ای دارند. البته در محاسبه انرژی دوره بهره‌برداری بجز دو عامل مذکور، شرایط اقلیمی و رفتار ساکنین نیز بسیار حائز



تصویر ۲- روش محاسبه مصرف انرژی طول عمر ساختمان مورد بررسی.

در خصوص انرژی نهفته تولید واحد مصالح ساختمانی در ایران وجود ندارد، از مقادیر گزارش شده توسط هموند و جونز (Hammond & Jones, 2008) در مطالعه حاضر بهره گرفته شد. این مرجع در مطالعات متعددی که برای شرایط ایران انجام گرفته (همچون فروزان، ۱۳۹۵)، مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. محاسبات انجام شده مطابق رابطه (۲) حاکی از آن است که مصرف انرژی ساختمان نمونه در دوره پیش از ساخت، ۴۹۹۸ گیگاژول است که معادل ۳/۸۱ گیگاژول بر متر مربع کل زیربنای ساختمان می باشد. اگرچه مبنای برآورد انرژی تولید مصالح مربوط به ایران نمی باشد، ولی با فرض بهبود پروسه تولید مصالح در ایران و توجه به اختلاف زمانی بین اطلاعات مندرج در مرجع (Hammond & Jones, 2008) و زمان ساخت بنای ساختمان نمونه، به نظر می رسد که نتایج بدست آمده با قبول درصدی خطا قابل استفاده می باشد.

برای محاسبه احجام مربوط به عناصر مختلف ساختمان، از مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار SketchUp کمک گرفته شد. مصالح به کار رفته در ساختمان نمونه و احجام بدست آمده از متره ساختمان برای هر یک از این مصالح در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد. با توجه به اینکه انرژی نهفته مصالح غالباً بر حسب وزن مصالح ارائه می شود، در این جدول صرفاً وزن مصالح درج شده است (ارقام به نزدیکترین عدد صحیح گرد شده اند). از شیرآلات، پریزها، دستگیره ها، سیم برق، خورده مصالح مصرفی و پرت مصالح صرف نظر شده است. همچنین از محاسبات مربوط به سقف کاذب که صرفاً در بخش کوچکی از سقف اتاق نشیمن و سرویس های بهداشتی استفاده گردیده، به دلیل حجم کم آن در مقایسه با سایر مصالح صرف نظر شده است. علاوه انرژی نهفته مربوط به آب مصرفی و دستگاه های تاسیساتی نیز در نظر گرفته نشده است. از آنجایی که در حال حاضر اطلاعات معتبر

جدول ۱- محاسبات مربوط به انرژی نهفته تولید مصالح ساختمان نمونه.

مصالح	عناصر ساختمان	وزن (kg)	انرژی نهفته واحد مصالح مطابق (MJ/kg) , (Hammond & Jones, 2008)
بتن	بتن ستون ها، تیرها، دال روی سقف تیرچه بلوک، پی، پله و پاگرد، تیرچه و دیوار برشی	۱۱۷۱۷۰۳	۱،۱۱
فوم بتن	فوم بتن روی ۵ سانت دال بتنی	۳۳۲۱۱	۲،۵
میله گرد	میله گرد ستون ها، تیرها، دیوار برشی، تیرچه، پی و خاموت	۶۲۲۵۹	۳۰،۹
بلوک بتنی	دیوارهای خارجی، دیوار بین واحدهای ساختمانی، دیوار پیرامونی راه پله و آسانسور	۱۴۲۰۵۸	۰،۸۱
بلوک سفالی	بلوک سفالی دیوارهای داخلی	۱۹۳۸۱	۳
کاشی	کاشی سرویس بهداشتی	۳۱۱۳	۹
سرامیک	سرامیک کف واحدهای مسکونی	۳۹۷۸۷	۱۰
سنگ	سنگ نما، دیوار راه پله، پله و ...	۲۹۷۲۵	۳
ملات سیمان	ملات آجرکاری، سرامیک کاری، سنگ کاری و کاشی کاری	۱۸۶۴۸۴	۱،۵۴
پلاستوفوم	یونولیت های سقف و دیوار	۲۶۵۲	۸۸،۶
پشم شیشه	پشم شیشه پشت کانال تاسیسات سرمایشی	۴۹	۲۸
قیر	قیر و گونی سرویس بهداشتی و سقف اصلی	۲۸۳۷	۵۱
گچ سفیدکاری	سفیدکاری بخش داخلی دیوار خارجی، دیوارهای داخلی، سقف ها	۱۰۴۷۳	۱،۸
گچ و خاک	گچ و خاک بخش داخلی دیوار خارجی، دیوارهای داخلی و سقف ها	۷۱۶۲۱	۱،۶
چوب کاری	کمد ها و درها	۲۵۲۳	۷،۸
MDF	کابینت	۳۴۵۶	۲۳
شیشه	پنجره ها	۲۵۶۲	۱۵
پروفیل UPVC	پنجره ها	۸۷۱	۶۹،۴
پروفیل فولادی	چارچوب درها	۵۷۹	۳۶،۸
لوله ۵ لایه	لوله آب گرم و سرد	۹۳	۸۴،۴
لوله PVC	لوله فاضلاب	۱۷۰	۶۷،۵
لوله فلزی سیاه	لوله گاز	۴۲۵	۳۴،۴
ورق گالوانیزه	کانال کشی تاسیسات سرمایشی	۴۷۴	۳۹،۴

## ۲-۲- انرژی دوره ساخت

در دوره احداث ساختمان، انرژی به طور عمده طی حمل و نقل مصالح به محل سایت (کارگاه ساختمانی) و عملیات برپایی ساختمان مصرف می‌شود. اگرچه عوامل دیگری همچون نیروی انسانی نیز در میزان انرژی دوره احداث دخیل هستند، غالباً سهم کمی از مصارف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. براساس تحقیق پولن (Pullen, 2000, 91)، تنها ۳٪ از انرژی دوره برپایی مربوط به نیروی انسانی است. هر چند در مناطقی که ساختمان‌های سنتی با اتکا بر نیروی انسانی ساخته می‌شوند، سهم نیروی انسانی، رقم بزرگ‌تری خواهد بود. در هر حال گائو و همکاران (Gao et al., 2001, 555) متذکر می‌شوند که انرژی نیروی انسانی بسیار کمتر از انرژی مکانیکی است. طبق مطالعه این محققین، کارکرد یک لیتر سوخت دیزل (۳۳٫۶ MJ) می‌تواند معادل دو کارگر باشد که به مدت ۶ روز کار می‌کنند. بنابراین، در تحقیق حاضر از انرژی مصرفی نیروی انسانی (برای حمل و نقل نیروی انسانی و خورد و خوراک) صرف نظر شده و محاسبه انرژی دوره ساخت در دو بخش مجزا شامل برپایی ساختمان و حمل و نقل مصالح انجام گرفته است.

سوخت مصرفی وسیله نقلیه برای حمل محصول  $F_{vehiclemi}$  بر حسب گیگاژول در هر کیلومتر می‌باشد. ضرایب تبدیل سوخت بنزین و گازوئیل به انرژی به صورت زیر منظور شده است:

- یک لیتر دیزل معادل ۰٫۰۳۸ گیگاژول انرژی  
- یک لیتر بنزین معادل ۰٫۰۳۵ گیگاژول انرژی

اطلاعات مورد نیاز برای محاسبات مربوط به این بخش در جدول ۲ ارائه شده است. محاسبات انجام شده براساس رابطه (۳)، حاکی از آن است که انرژی حمل و نقل ساختمان نمونه  $(CE_T)$  برابر با ۳۵۳ گیگاژول معادل ۰٫۲۷ گیگاژول بر متر مربع زیربنای کل ساختمان می‌باشد.

$$CE_T = 353.04 \text{ GJ } (0.27 \text{ GJ/m}^2)$$

## ۲-۲-۲- انرژی برپایی ساختمان

انرژی برپایی ساختمان نمونه در دو بخش برپایی اسکلت و تکمیل سایر بخش‌های بنا (شامل احداث دیوارها، نازک‌کاری، گچ‌کاری و ...) به صورت مجزا محاسبه می‌شود. برای محاسبه انرژی برپایی اسکلت از نتایج مطالعات قبلی و برای محاسبه انرژی بخش دوم از قبوض صادر شده در دوره تکمیل ساختمان بهره گرفته می‌شود.

## انرژی برپایی اسکلت ساختمان

برای محاسبه انرژی برپایی از نتایج مطالعه هروی و همکاران (Heravi et al., 2016) بهره گرفته شده است. براساس نتایج این تحقیق در حالت محتمل، برای برپایی اسکلت بتنی (بدون لحاظ کردن انرژی تولید و حمل مصالح به سایت) به طور متوسط ۰٫۰۳ گیگاژول بر متر مربع انرژی صرف می‌شود. با توجه به اینکه مقدار ارائه شده توسط هروی و همکاران به طور خالص برای برپایی اسکلت ساختمان در تهران می‌باشد و براساس میانگین ارقام به دست آمده از به شش ساختمان با اسکلت بتنی که اخیراً ساخته شده‌اند بوده است، از نتایج این تحقیق برای برآورد انرژی برپایی اسکلت بتنی ساختمان نمونه استفاده شده است. همچنین لازم به ذکر است که این مقدار متوسط برابر است با مقدار انرژی مورد نیاز برای برپایی یکی از نمونه‌های بررسی شده در (Heravi et al., 2016, 248) که یک ساختمان با اسکلت بتنی، سقف تیرچه بلوک و زیربنای ۱۰۰۰ متر مربع است و شرایطی نزدیک به ساختمان نمونه دارد. با در نظر گرفتن مقدار بدست آمده در (Heravi et al., 2016, 248) و منظور کردن زیربنای ساختمان نمونه، مقدار انرژی برپایی اسکلت ساختمان نمونه با استفاده از رابطه (۴) برابر با ۳۹ گیگاژول خواهد بود.

$$CE_S = A * 0.03$$

که در آن  $CE_S$  انرژی برپایی واحد متر از اسکلت بتنی ساختمان بر حسب گیگاژول و  $A$  متر از زیربنای ساختمان بر حسب متر مربع با احتساب پارکینگ می‌باشد.

## ۲-۲-۱- انرژی حمل و نقل

برای محاسبه انرژی حمل و نقل مصالح، سه نوع اطلاعات مورد نیاز است: تعداد سفر، فاصله حمل مصالح و میزان سوخت مورد نیاز برای انتقال مصالح در هر کیلومتر با در نظر گرفتن ماشین‌آلات مربوطه. با در اختیار داشتن این اطلاعات و استفاده از رابطه (۳)، می‌توان مصرف انرژی حمل و نقل در دوره احداث ساختمان را برآورد نمود. از آنجایی که انرژی نهفته مصالحی که در بخش پیشین در نظر گرفته شدند، شامل انرژی حمل مصالح تا سایت کارگاه (یا خورده فروشی مصالح) نبوده است، لذا برای برآورد انرژی حمل در این قسمت، محل کارخانه تولید مصالح به عنوان مبدا و سایت کارگاه بعنوان مقصد در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به اینکه نوع وسیله نقلیه در اغلب موارد کامیون / تریلی می‌باشد که مسیر برگشت را خالی برمی‌گردند، مسافت برگشت نیز در محاسبه انرژی حمل و نقل منظور شده است. همچنین از تفاوت سوخت مصرفی وسایل نقلیه پر و خالی در محاسبه انرژی حمل و نقل نیز صرف نظر شده است. بعلاوه (جز در مواردی که با \* مشخص شده‌اند)، فرض شده است که وسیله نقلیه با ظرفیت کامل مصالح را حمل می‌کند.

(۳)

$$CE_T = \sum_{i=1}^n \left( \text{int} \left( 1 + \frac{V_{M_i}}{V_{Vehicle_{M_i}}} \right) * D_{M_i} * F_{Vehicle_{M_i}} * 2 \right)$$

در این رابطه،  $CE_T$  انرژی حمل و نقل مصالح در دوره ساخت بر حسب گیگاژول،  $V_{mi}$  حجم / وزن مصالح  $i$ ،  $V_{vehiclemi}$  حجم / وزن قابل حمل وسیله نقلیه‌ای که مصالح  $i$  را حمل می‌کند،  $D_{mi}$  فاصله کارخانه محصول  $i$  تا سایت کارگاه بر حسب کیلومتر، و

جدول ۲ - اطلاعات مربوط به حمل مصالح ساختمان نمونه از کارخانه به کارگاه.

مصالح	محل قرضه	فاصله حمل (km)	دفعات حمل	ماشین حمل	مصرف سوخت ماشین (Lit/100km)
بتن	کیلومتر ۲۰ جاده قدیم کرج	۴۰	۵۹	تراک میکسر	۴۴
فوم بتن	کیلومتر ۲۰ جاده قدیم کرج	۴۰	۲	تراک میکسر	۴۴
میله گرد	اصفهان	۴۵۰	۳	تریلی ۱۸ چرخ	۴۹
بلوک بتنی	فیروزکوه	۱۴۵	۱۲	خاور	۲۲,۵
بلوک سفالی	شهریار	۶۰	۳	خاور	۲۲,۵
کاشی	شهریار	۵۵	۱	نیسان	۱۵
سرامیک کف	یزد	۶۷۰	۳	کامیون ۱۴ تن	۴۰
سنگ	محلات	۳۰۵	۳	کامیون ۱۴ تن	۴۰
شن و ماسه	شهریار	۵۵	۱۴	کامیون ۱۰ تن	۳۰
سیمان	فیروزکوه	۱۴۰	۲	کامیون ۱۰ چرخ (۱۴ تن)	۴
پلاستوفوم	تهران	۱۰	۲۱	خاور	۲۲,۵
پشم شیشه	اصفهان	۴۵۰	۱	نیسان	۱۵
قبر	تهران	۱۰	۱	نیسان	۱۵
گچ	ساوه	۱۵۵	۲	کامیون ۱۰ چرخ	۴۰
خاک رس	تهران	۴۰	۳	خاور	۲۲,۵
چوب	مازندران	۲۷۰	۲	خاور	۲۲,۵
MDF	خرید از تهران (کارخانه اصلی: عزیزیه ترکیه)	۱۲۶۰	۱	کامیون + نیسان	* ۱۴,۴
شیشه	قزوین	۱۶۰	۲	خاور	۲۲,۵
پروفیل UPVC	قزوین	۱۶۰	۳	خاور	۲۲,۵
پروفیل فولادی	اصفهان	۴۵۰	۱	خاور	۲۲,۵
لوله ۵ لایه	خرید از تهران (کارخانه اصلی: اهواز) بجز ۱۵ کیلومتر در تهران سایر مسیر با کامیون حمل شد	۸۵۰	۱	کامیون + نیسان	* ۱,۴
لوله PVC		۸۵۰	۱	کامیون + نیسان	* ۹,۹
لوله فلزی		۸۵۰	۱	کامیون + نیسان	* ۱,۷
ورق فولادی گالوانیزه	اصفهان	۴۵۰	۱	کامیون + نیسان	* ۲,۳

### انرژی مصرفی برای تکمیل بنا پس از برپایی اسکلت

در محاسبه انرژی مصرفی مربوط به این بخش، میزان برق شهری ثبت شده توسط کنتور موقت برق ملاک عمل بوده و از سوخت مصرفی توسط تجهیزات احتمالی صرف نظر شده است. لازم به ذکر است که ساختمان در دوران برپایی از گاز شهری استفاده نکرده و گرمایش فضا بوسیله المنت های برقی انجام شده است. مدت زمان تکمیل ساختمان نمونه پس از برپایی اسکلت آن تقریباً هفت ماه بوده است که طی آن بر اساس قبوض برق صادر شده، معادل ۶۳۰۰ کیلووات ساعت از برق شهری استفاده شده است (به طور متوسط ۹۰۰ کیلووات ساعت در هر ماه). چنانچه از ضریب ۳,۱۶۷ برای تبدیل انرژی برق (انرژی ثانویه) به اولیه استفاده شود، و هر گیگاژول معادل ۲۷۸ کیلووات ساعت در نظر گرفته شود،

مصرف انرژی اولیه برای تکمیل ساختمان پس از برپایی اسکلت مطابق رابطه (۵) عبارت خواهد بود از ۷۱,۸ گیگاژول.

$$CE_b = E_w * t_w * \frac{3.167}{278} \quad (5)$$

در این رابطه،  $CE_b$  انرژی مصرفی برای تکمیل ساختمان پس از برپایی اسکلت (بر حسب گیگاژول)،  $t_w$  مدت زمان تکمیل ساختمان پس از برپایی اسکلت (بر حسب ماه)، و  $E_w$  متوسط برق مصرفی طی دوره  $t_w$  (بر حسب کیلووات ساعت در هر ماه) است. با توجه به اینکه اغلب ساختمان ها در دوران ساخت از سوخت گاز استفاده نمی کنند، می توان برای ساختمان های مسکونی از این رابطه استفاده نمود.

(۸)

$$OE_{yearly} = OE_{yearly}^{Gas} * 1.084 + OE_{yearly}^{Electricity} + 3.167$$

در این رابطه،  $OE_{yearly}$ ، مصرف سالانه انرژی بهره‌برداري ساختمان به شکل انرژی اولیه (بر حسب گیگاژول)،  $OE_{yearly}^{Gas}$  و  $OE_{yearly}^{Electricity}$  به ترتیب میزان گاز و برق مصرفی (بر حسب گیگاژول) طی یک سال بهره‌برداري از ساختمان می‌باشد که غالباً از مدلسازی ساختمان در نرم افزارهای شبیه سازی انرژی بدست می‌آید.

مقدار انرژی بهره‌برداري بدست آمده، بدون در نظر گرفتن افزایش دمای کره زمین و تغییرات اقلیمی در سال‌های آتی محاسبه شده است. با توجه به اینکه پرداختن به تغییرات اقلیمی به صورت تخصصی در حوزه این تحقیق نمی‌باشد و نویسندگان دانش کافی در این خصوص ندارند، صرفاً اثرات ناشی از افزایش دمای کره زمین که بعنوان مهم‌ترین نماینده تغییرات اقلیمی مورد توافق است، در محاسبه انرژی بهره‌برداري مد نظر قرار می‌گیرد. مطالعه کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2006)، ۲۵۰ (۲۰۲۵ الی ۲۰۵۰) به طور متوسط حدود ۰٫۷ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد که تقریباً معادل ۱٫۰ درجه سانتیگراد افزایش دما طی ۳۵ سال است. لیلیولد و همکاران (Lelieveld et al., 2012, 678) نیز طی پژوهش دیگری، افزایش دمای ۰٫۳۷ درجه سانتیگراد در هر دهه را برای تهران پیش بینی کرده‌اند که معادل ۱٫۳ درجه سانتیگراد افزایش دما طی ۳۵ سال می‌باشد. از طرف دیگر، روشن و همکاران (Roshan et al., 2010, 576) با بهره‌گیری از ۴ مدل مختلف نشان دادند که دمای هوای تهران طی این مدت ۰٫۷-۰٫۹ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت. اگرچه این ارقام اندکی با یکدیگر تفاوت دارند ولی در محدوده معرفی شده توسط قربانی برای تغییرات دمایی شهر تهران قرار دارند. پژوهش قربانی (۱۳۹۲، ۲۶۵) نشان می‌دهد که هوای تهران در ۳۵ سال آتی به طور متوسط ۱٫۴-۰٫۷ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. از آنجایی که این محدوده مشتمل بر نتایج تحقیقات پیشین نیز می‌باشد، از متوسط آن (۱٫۱ درجه سانتیگراد) در پژوهش حاضر استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این رقم هماهنگ با متوسط جهانی افزایش دمای زمین است که در نمودارهای تصویر ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

اگر فرض شود که داده آب و هوایی تهران در بازه ۳۵ ساله آتی تغییرات رفتاری مشابه داده آب و هوایی موجود از خود نشان دهد (که با توجه به اینکه داده های آب و هوایی فعلی بر اساس سابقه ۳۰-۴۰ سال گذشته بدست آمده است، فرضی منطقی به نظر می‌رسد)، می‌توان برای انتهای سال ۳۵ ام دوره بهره‌برداري به جای استفاده از داده آب و هوایی به روز شده، محدوده دمای آسایش ۱٫۱ را درجه سانتیگراد کاهش داد. ولی باید توجه نمود که با افزایش دمای هوا، محدوده دمای آسایش نیز اندکی بیشتر خواهد شد. مطالعه روشن و همکاران (Roshan et al., 2010, 576) حاکی از آن است که افزایش دمای هوای تهران طی ۳۵

با محاسبه هر یک از دو بخش فوق، انرژی برپایی ساختمان  $CE_e$  و سپس انرژی دوره ساخت (CE) بر اساس روابط (۶) و (۷) به ترتیب برابر با ۱۱۱ و ۴۶۴ گیگاژول بدست می‌آید.

$$CE_e = CE_S + CE_b \quad (۶)$$

$$CE = CE_e + CE_T \quad (۷)$$

### ۳-۲- انرژی دوره بهره‌برداري

برای محاسبه انرژی بهره‌برداري ساختمان، نیاز به اطلاع از طول عمر و مصرف سالانه انرژی آن می‌باشد. در خصوص طول عمر ساختمان، بر اساس پیشینه صنعت ساخت بناهای مسکونی و نظرات اخذ شده از پیمانکاران متعدد این حوزه و همچنین نظریه گزارشات منتشر شده در این خصوص، عمر ۳۵ ساله برای ساختمان نمونه مشابه بسیاری از ساختمان‌های مسکونی نسبتاً جدید در ایران در نظر گرفته شد. برای مصرف انرژی سالانه ساختمان نمونه نیز طبق نتایج بدست آمده از تحقیق پیشین مولفین (Yousefi et al., 2017, 191)، ۴۸۵ گیگاژول گاز طبیعی و ۱۶۸ گیگاژول برق منظور گردید. این نتایج، از شبیه‌سازی ساختمان نمونه در انرژی پلاس بدست آمده که طی چندین مرحله صحت آنها سنجیده شده است. در شبیه‌سازی انجام گرفته، علاوه بر ثبت مشخصات فیزیکی ساختمان، تلاش گردید رفتار ساکنین به طور ساده و تا حد امکان مطابق واقعیت در مدل انرژی ساختمان اعمال شود. از میان همه عواملی که رفتار ساکنین را شکل می‌دهند، در این مطالعه، برنامه حضور افراد؛ شدت فعالیت آنها؛ وسایل و تجهیزات الکتریکی، گازی و روشنایی به همراه نحوه استفاده از آنها؛ و همچنین نرخ تعویض هوای خواسته لحاظ شده‌اند.

در هر یک از واحدهای ساختمان نمونه، به طور کلی ۴-۲ نفر ساکن هستند که وسایل الکتریکی مختلفی با مجموع توان ۸۰۰۰-۶۰۰۰ وات را مورد استفاده قرار می‌دهند. الگوهای مختلفی که این ساکنین برای حضور و فعالیت در منزل خود دارند سبب شده است که المان‌های رفتار ساکنین برای کل ساختمان در محدوده نسبتاً وسیعی در شبیه‌سازی انرژی تعریف شوند. به طوری که در ساعات مختلف روز در کل ساختمان، تعداد افراد حاضر بین ۲۴-۰ نفر؛ شدت فعالیت افراد به میزان ۳۲۰۰-۶۰۰ وات؛ مصرف روشنایی بین ۴۰۰-۱۰۰ وات؛ و مصرف وسایل الکتریکی بین ۵۱۰۰-۶۰۰ وات متغیر می‌باشد. پیش فرض‌های محاسبات انرژی دوره بهره‌برداري ساختمان نمونه و جزئیات بیشتر در خصوص رفتار ساکنین آن در منبع (Yousefi et al., 2016, 188-189) قابل دستیابی می‌باشد.

با توجه به اینکه انرژی نهفته به صورت انرژی اولیه محاسبه گردید، ضروری است انرژی بهره‌برداري نیز به صورت اولیه تعیین شود. با در نظر گرفتن ضرایب تبدیل انرژی ثانویه به اولیه در محاسبات انرژی (معادل ۱٫۰۸۴ برای گاز طبیعی و ۳٫۱۶۷ برای برق)، مصرف سالانه انرژی اولیه ساختمان نمونه، رقمی معادل ۱۰۵۹ گیگاژول انرژی محاسبه می‌شود.



نگهداری ساختمان بر اساس تعداد دفعات تعویض مصالح به کمک رابطه (۱۰) بر مبنای انرژی نهفته اولیه مصالح و انرژی حمل مصالح تا کارگاه ساختمانی محاسبه می‌شود. در این رابطه از یک ضریب نیز استفاده شده است که معرف روند رو به کاهش مصرف انرژی در صنعت تولید مصالح است. این ضریب نشان می‌دهد که راندمان صنعت تولید مصالح به طور متوسط در هر سال به چه میزان بهبود یافته است. ما و همکاران (Ma et al., 2017, 41) در تحقیقی که روی ساختمان‌های عمومی چین انجام دادند، این ضریب را مورد استفاده قرار داده و مقدار ۰.۳٪ را برای آن در بازه زمانی قبل سال ۲۰۳۰ میلادی و ۱٪ را مطابق صنعت اروپا برای بعد از ۲۰۳۰ منظور کرده‌اند. با توجه به تحقیق ما و همکاران (Ma et al., 2017, 41)، در این مقاله نیز رقم متوسط ۲٪ برای این ضریب در نظر گرفته شده است تا روند رو به کاهش شدت مصرف انرژی در ایران نیز در محاسبات انرژی دوره تعمیر و نگهداری لحاظ شود.

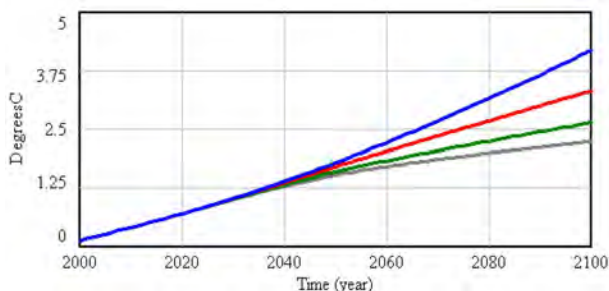
(۱۰)

$$EE_R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_{M_i}} (P_{M_i} * E_{M_i} * V_{M_i} + T_{M_i}) * (1 - \alpha)^{L_{M_i}} \quad k_{M_i} = \text{int} \left( \frac{L_a}{L_{M_i}} \right)$$

در این رابطه، n تعداد کل مصالح، k فاکتور تعویض (تعداد دفعات تعویض) مصالح،  $P_{mi}$ ، نسبتی از حجم مصالح i که در هر بار نیاز به تعویض دارد (عددی بین ۱ تا ۱۰)،  $V_{mi}$  مقدار مصالح i (به کیلوگرم)،  $T_{mi}$  انرژی حمل مقدار مورد نیاز مصالح i از کارخانه تا سایت (به گیگاژول)، a نرخ متوسط کاهش سالانه انرژی نهفته مصالح معادل ۲٪، و  $L_{mi}$  طول عمر مصالح i (به سال) است. بدین ترتیب انرژی تعمیر و نگهداری ساختمان نمونه با استفاده از رابطه (۱۰) و مقادیر ارائه شده در جدول ۳ که بر اساس میانگین‌گیری از نظرات چندین پیمانکار ساختمان‌های مسکونی (۹ نفر از افراد باتجربه که طی ۱۰ سال اخیر در تهران مشغول به فعالیت بوده‌اند) حاصل شده است، بدست آمد که برابر با ۷۷۸ گیگاژول (معادل ۰.۶ گیگاژول بر متر مربع) می‌باشد.

### ۳- بررسی نتایج

پس از محاسبه انرژی همه زیربخش‌های چرخه عمر، انرژی نهفته ساختمان (EE) با تجمیع انرژی‌های تولید مصالح، انرژی ساخت و انرژی تعمیر و نگهداری معادل ۴.۷۶ گیگاژول بر متر



سال آتی سبب می‌شود که محدوده دمای آسایش ساکنین آن حدود ۰.۶ درجه سانتیگراد افزایش یابد. با در نظر گرفتن این افزایش و کاهش در کنار هم در مجموع می‌توان ۰.۵ درجه کاهش را برای محدوده دمای آسایش ساکنین تهران در انتهای سال ۱۳۵م در نظر گرفت.

مطالعات پیشین مولفین (Yousefi et al., 2017, 193) نشان می‌دهد که چنانچه دمای آسایش از ۲۷.۵-۲۲.۵ (دمای خنثی در شهر تهران بر اساس مطالعه حیدری (۱۱،۱۳۸۸)) به ۲۷-۲۲ تغییر کند، مصرف انرژی حرارتی اولیه ساختمان در تهران ۱.۱٪ کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن مصرف انرژی روشنایی و تجهیزات موجود در ساختمان، تغییرات مصرف انرژی اولیه ساختمان در انتهای بازه به ۰.۷٪- محدود می‌شود که در نهایت رقمی معادل ۱۰۵۱ گیگاژول (۰.۹۹۳ \* ۱۰۵۹) را بدست خواهد داد.

با متوسط‌گیری از ارقام بدست آمده و در اختیار داشتن طول عمر ساختمان، مصرف انرژی کل دوره بهره‌برداری مطابق رابطه (۹) معادل ۳۶۹۳۰ گیگاژول بدست می‌آید.

(۹)

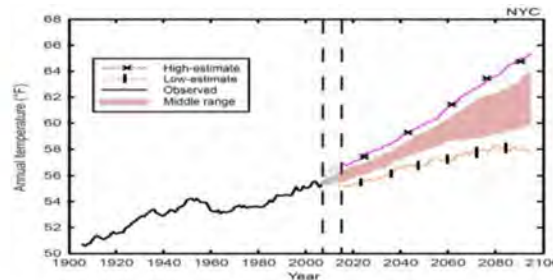
$$OE = \frac{OE_{\text{yearly}} + OE_{\text{yearly}}^*}{\gamma} * L_a$$

در این رابطه،  $L_a$  مدت زمان بهره‌برداری (به سال) و  $OE_{\text{yearly}}^*$  مقدار مصرف انرژی به شکل انرژی اولیه (بر حسب گیگاژول) در سال آخر بهره‌برداری از ساختمان است.

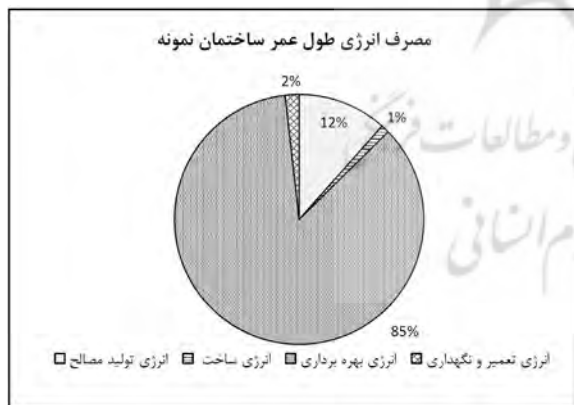
بدیهی است که طول عمر ساختمان، یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر مصرف انرژی بهره‌برداری ساختمان است که به مراتب بیش از تغییرات اقلیمی بر مصرف انرژی ساختمان تاثیر می‌گذارد. اگر از تاثیر تغییرات اقلیمی بر مصرف انرژی ساختمان در تهران (که مطابق نتایج بدست آمده از (Yousefi et al., 2017, 193)) زیر ۲٪ است) صرف نظر کنیم، می‌توان انرژی دوره بهره‌برداری ساختمان در تهران را مستقیماً متأثر از طول عمر ساختمان دانست که با یک رابطه خطی قابل تبیین است.

### ۴-۲- انرژی دوره تعمیر و نگهداری

ساختمان‌های مسکونی دوره عمر نسبتاً طولانی دارند و در احداث آنها از مصالح متعددی استفاده می‌شود که طول عمر برخی از آن کمتر از عمر ساختمان است به طوری که اغلب به دفعات نیاز به تعمیر یا تعویض کلی دارند. انرژی دوره تعمیر و



تولید مصالح در ایران به طور متوسط ۳۰٪ انرژی بیشتری نسبت به متوسط جهانی مورد استفاده در این مطالعه مصرف نماید، سهم انرژی نهفته تولید مصالح از کل انرژی چرخه عمر ساختمان ۳٪ افزایش و سهم انرژی بهره برداری حدود ۲٪ کاهش می باید. لازم به ذکر است که درصدهای محاسبه شده در سطور فوق با توجه به طول عمر در نظر گرفته شده برای ساختمان نمونه است و با تغییر آن دچار تغییر خواهد شد. بدیهی است که با افزایش طول عمر ساختمان، سهم انرژی بهره برداری و انرژی تعمیر و نگهداری افزایش و با کاهش طول عمر، سهم آنها کاهش خواهد یافت. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که علیرغم اینکه ساختمان در نظر گرفته شده ساختمان نسبتاً جدیدی است که طی ۴-۵ سال اخیر ساخته شده، انرژی دوره بهره برداری آن در مقایسه با ارقام جهانی رقم قابل توجهی است. انرژی ساختمان در دوره بهره برداری معادل ۰٫۸۱ گیگاژول بر مترمربع در هر سال بدست آمده که اگرچه در بازه ارائه شده توسط پرسیدا و همکاران (Praseeda et al., 2016, 212) (۰٫۸-۱٫۲) گیگاژول بر مترمربع در هر سال) قرار دارد، ولی با توجه به طول عمر در نظر گرفته شده برای ساختمان نمونه که کمتر از طول عمر متوسط ساختمان های جهانی است، رقم زیادی است. همچنین بر اساس محاسبات انجام شده، انرژی نهفته اولیه ساختمان نمونه (انرژی نهفته تولید مصالح، حمل به سایت و برپایی ساختمان) معادل ۴٫۱۷ گیگاژول بر مترمربع بدست آمده است که تقریباً در وسط بازه (۱-۸٫۳۵) گیگاژول بر مترمربع ارائه شده توسط پرسیدا و همکاران (Praseeda et al., 2016, 212) قرار دارد. انرژی دوره ساخت نیز با توجه به سهم ۱٪ آن، مشابه اغلب گزارشات مربوط به مطالعات طول عمر می باشد.



تصویر ۴- سهم دوره های چرخه عمر ساختمان از انرژی طول عمر ساختمان نمونه.

مربع بدست می آید و انرژی طول عمر ساختمان (LCE) از رابطه (۱) برابر با ۳۲٫۹ گیگاژول بر مترمربع حاصل می شود. نتایج بدست آمده در بخش های پیشین به اختصار بدین شرح می باشد: در نمودار تصویر ۴، سهم هر یک از زیربخش های چرخه عمر از انرژی طول عمر ساختمان نمونه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، دوره بهره برداری با ۸۵٪ بیشترین سهم از انرژی چرخه عمر ساختمان را به خود اختصاص داده است. سهم انرژی نهفته ساختمان نیز در کل ۱۵٪ است که شامل ۱۲٪ انرژی تولید مصالح، ۲٪ انرژی تعمیر و نگهداری و ۱٪ انرژی ساخت است. کم اثرترین دوره در محاسبات انرژی طول عمر ساختمان نمونه، دوره برپایی ساختمان می باشد که بخشی از انرژی دوره ساخت بوده و سهمی در حدود ۰٫۲٪ از انرژی طول عمر ساختمان را تشکیل می دهد. ارقام بدست آمده برای انرژی تولید مصالح و انرژی تعمیر و نگهداری ماحصل استفاده از منابع بین المللی در برآورد محتوای انرژی مصالح می باشد که در صورت وجود منابع قابل اعتماد در ایران ممکن است اندکی تغییر کند. چنانچه صنعت

جدول ۳- جزئیات محاسبه انرژی تعمیر و نگهداری (شامل طول عمر و دفعات تعویض مصالح).

مصالح	$P_{Mi}$	$L_{Mi \text{ year}}$
شیشه پنجره	۵۰٪	۲۰
نقاشی لایه داخلی	۱۰۰٪	۷
سنگ کاری ساختمان	۵۰٪	۲۵
گچ و خاک داخلی	۲۰٪	۲۵
لایه خارجی کف آپارتمان	۱۰۰٪	۲۰
عایق رطوبتی بام	۱۰۰٪	۱۵
کارهای چوبی	۱۰۰٪	۲۵
کابینت ها	۱۰۰٪	۱۵
کاشی	۱۰۰٪	۲۰
آجر کاری داخلی	۵۰٪	۲۵
ملات	متناسب با سنگ کاری و ...	۱۴
لوله ۵ لایه	۲۰٪	۲۰
لوله PVC	۲۰٪	۲۵
لوله فلزی	۲۰٪	۲۵

جدول ۴- خلاصه نتایج بدست آمده از محاسبات مصرف انرژی چرخه عمر ساختمان نمونه.

مراحل مختلف چرخه عمر	کل چرخه عمر
$MEE = 4998 \text{ GJ} \quad (3.82 \text{ GJ/m}^2)$	$EE = 6239.9 \text{ GJ} \quad (4.76 \text{ GJ/m}^2)$
$CE = 463.84 \text{ GJ} \quad (0.35 \text{ GJ/m}^2)$	$LCE = 43169.5 \text{ GJ} \quad (32.95 \text{ GJ/m}^2)$
$OE = 36929.6 \text{ GJ} \quad (28.19 \text{ GJ/m}^2)$	
$EE_R = 778.3 \text{ GJ} \quad (0.6 \text{ GJ/m}^2)$	

## نتیجه

سهم انرژی نهفته اولیه ساختمان (مجموع انرژی تولید مصالح، حمل و نقل و برپایی ساختمان) حدود ۱۳٪ از کل انرژی طول عمر آن برآورد شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده، کم اثرترین دوره در محاسبات انرژی طول عمر ساختمان نمونه بتنی، دوره برپایی ساختمان است که بخشی از انرژی دوره ساخت بوده و سهمی در حدود ۰٫۲٪ از انرژی طول عمر ساختمان را تشکیل می‌دهد.

بدیهی است که طول عمر ساختمان، پارامتر اساسی در برآورد انرژی ساختمان بوده و با تغییر آن، سهم انرژی بهره‌برداری و انرژی تعمیر و نگهداری تغییر خواهد کرد؛ به طوری که با افزایش طول عمر ساختمان از ۳۵ سال به ۶۰ سال، سهم دوره بهره‌برداری به حدود ۹۱٪ افزایش خواهد یافت. ارقام بدست آمده برای انرژی بهره‌برداری و انرژی نهفته اولیه حاکی از آن است که وضعیت مصرف انرژی ساختمان‌های جدیدی که در ایران احداث می‌شود فاصله قابل توجهی با ساختمان‌های کم انرژی در دنیا دارد و می‌بایست راهکارهای موثرتری در این جهت اندیشه شود تا از اتلاف سرمایه‌های ملی جلوگیری شود.

در این پژوهش، روش محاسبه مصرف انرژی طول عمر یک ساختمان نمونه واقعی در شهر تهران ارائه و جزئیات آن تشریح گردید. در محاسبه انرژی چرخه‌ی عمر، مراحل تولید مصالح، حمل و نقل، برپایی ساختمان، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری در نظر گرفته و از مرحله تخریب و بازیافت صرف نظر شد. علاوه، در برآورد انرژی بهره‌برداری از مدل انرژی که بر اساس مشخصات واقعی ساختمان و ساکنین آن در نرم‌افزار انرژی پلاس تهیه شد، استفاده گردید و افزایش دمای کره زمین طی دوره عمر ساختمان در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج بدست آمده، ۸۵٪ از انرژی طول عمر ساختمان نمونه بتنی مربوط به دوره بهره‌برداری از ساختمان است. علیرغم آنکه انرژی بهره‌برداری بدست آمده در محدوده متداول ارقام جهانی قرار دارد، مقدار آن برای ایران رقم قابل توجهی است؛ زیرا طول عمر ساختمان‌ها در ایران عمدتاً کمتر از مقادیر جهانی می‌باشد. نتایج همچنین حاکی از آن است که انرژی نهفته ساختمان ۴٫۷۶ گیگاژول بر متر مربع معادل ۱۵٪ از کل انرژی ساختمان است و شامل ۱۲٪ انرژی تولید مصالح، ۲٪ انرژی تعمیر و نگهداری و ۱٪ انرژی ساخت می‌باشد. بدین ترتیب

## فهرست منابع

- حیدری، شاهین (۱۳۸۸)، دمای آسایش حرارتی مردم شهر تهران، نشریه هنرهای زیبا-معماری و شهرسازی، شماره ۳۸، صص ۱۴-۵.
- فروزان نرجس؛ حاجی پور، خلیل و سلطانی، علی (۱۳۹۵)، بررسی مصرف انرژی نهفته در بافت‌های مسکونی: نمونه موردی شهر شیراز، فصلنامه علمی پژوهشی نقش جهان، فصل ۶، شماره ۱، صص ۵۲-۴۲.
- قربانی، خلیل (۱۳۹۳)، الگوی فصلی و مکانی تغییر اقلیم دمای هوا در ایران، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۵، صص ۲۷۰-۲۵۷.
- مرکز آمار ایران (۱۳۹۱-۱۳۹۵)، اطلاعات پروانه‌های ساختمانی صادرشده توسط شهرداری‌های کشور، تهران، دفتر ریاست، روابط عمومی و همکاری‌های بین‌الملل.
- Adalbert, K (1997), Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples, *Building and Environment*, Vol. 32, No. 4, pp. 321-329.
- Crowther, P (1999), *Design for disassembly to recover embodied energy*, in The 16th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Melbourne-Brisbane-Cairns.
- Deng, W; Prasad, D; Osmond P & Li, F (2011), Quantifying life cycle energy and carbon footprints of China's residential small district, *Journal of Green Building*, Vol. 6, No. 4, pp. 96-111.
- Dixit, M; Fernández-Solís, J; Lavy, S & Culp C (2010), Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 8, pp. 1238-1247.
- Dixit, M; Culp, C & Fernández-Solís, J (2013), System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 153-164.
- Dixit, M; Culp, C; Lavy S & Fernández-Solís, J (2014), Recurrent embodied energy and its relationship with service life and life cycle
- energy: A review paper, *Facilities*, Vol. 32, No. 3/4, pp. 160-181.
- Dixit, M (2017), Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, pp. 390-413.
- Gao, W; Ariyama, T; Ojima, T & Meier, A (2001), Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 33, pp. 553-562.
- Hammond G & Jones, C (2008), *Inventory of Carbon and Energy (ICE)*, Sustainable Energy Research Team, Dept. of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, United Kingdom.
- Heravi, G; Nafisi, T & Mousavi, R (2016), Evaluation of energy consumption during production and construction of concrete and steel frames of residential buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 130, pp. 244-252.
- Junnila, S; Horvath, A & Guggemos, A (2006), Life-cycle assessment of office buildings in Europe and the United States, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 10-17.
- Koocheki, A; Nasiri, M; Kamali, G. A; & Shahandeh, H (2006), Potential Impacts of Climate Change on Agroclimatic Indicators in Iran, *Arid Land Research and Management*, Vol. 20, No. 3, pp. 245-259.
- Kotaji, S; Schuurmans, A & Edwards, S (2003), *Life cycle assessment in building and construction*, A state-of-the-Art report, SE-TAC press, ISBN 1880611597, 9781880611593.
- Kua, H & Wong, C (2012), Analysing the life cycle greenhouse gas emission and energy consumption of a multi-storied commercial building in Singapore from an extended system boundary perspective, *Energy and buildings*, Vol. 51, pp. 6-14.

Pullen, S (2000), Energy used in the construction and operation of houses, *Architectural Science Review*, Vol. 43, No. 2, pp. 87-94.

Ramesh, T; Prakash R & Shukla, K. K (2010), Life cycle energy analysis of buildings: an overview, *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 1592-1600.

Ramesh, T; Prakash R & Shukla, K. K (2013), Life cycle energy analysis of a multifamily residential house: a case study in Indian context, *Journal of Energy Efficiency*, Vol. 2, pp. 34-41.

Roshan, Gh. R; Ranjbar, F & Orosa, A (2010), Simulation of global warming effect on outdoor thermal comfort conditions, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 571-580.

Thormark, C (2002), A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential, *Building and Environment*, Vol. 37, pp. 429-435.

Venkatarama Reddy, B & Jagadish, K (2003), Embodied energy of common and alternative building materials and technologies, *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 129-137.

Vukotic, L; Fenner, R & Symons, K (2010), Assessing embodied energy of building structural elements, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, Vol. 163, No. 3, pp. 147-158, Thomas Telford Ltd.

Winter, B & Hestnes, A (1999), Solar versus green: The analysis of a Norwegian row house, *Solar Energy*, Vol. 66, No. 6, pp. 387-393.

Yousefi, F; Gholipour Y & Yan, W (2017), A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants' data, *Energy & Buildings*, Vol. 148, pp. 182-198.

Lelieveld, J; Hadjinicolaou, P; Kostopoulou, E; Chenoweth, J; Maayar, M. El; Giannakopoulos, C; Hannides, C; Lange, M. A; Tanarhte, M; Tyrlis, E & Xoplaki, E (2012), Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East, *Climatic Change*, Vol 114, pp. 667-687.

Ma, J; Du, G; Zhang, Z; Wang P & Xie, B (2017), Life cycle analysis of energy consumption and CO2 emissions from a typical large office building in Tianjin, China, *Building and Environment*, Vol. 117, pp. 36-48.

Metasd (2008), [Online]. Available: <http://metas.com/2008/08/climate-war-game-is-2050-temperature-locked-in/>. [Accessed 22 10 2017].

Mithraratne, N & Vale, B (2004), Life cycle analysis model for New Zealand houses, *Building and Environment*, Vol. 39, pp. 483-492.

Nassen, 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*, Vol. 32, No. 9, pp. 1593-1602.

Nassen, J; Hedenus, F; Karlsson S & Holmberg, J (2012), Concrete vs. wood in buildings— an energy system approach, *Building and Environment*, Vol. 51, pp. 361-369.

Peuportier, B (2001), Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context, *Energy and Buildings*, Vol. 33, No. 5, pp. 443-450.

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