Journal of Urban Environmental Management

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.4, No.1; 2026.pp: 106-132

Research paper

(Received 14 Feb. 2026 Accepted 6 May 2026)

A Systematic Analysis of Urban Simulation Studies in Estimating Energy Demand: Lessons for Iran's Four Climate Zones

Amin Amini kashani*[1], Reyhaneh Ashtiyani [2]

[1] *PhD in Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Iran.*
[2] *PhD in Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Science and Technology, Iran*

Abstract

The rapid growth of urban populations and energy consumption, coupled with the limitations of fossil fuel resources and environmental crises, has highlighted the necessity of managing energy use in cities. Urban energy simulation using semantic 3D models, due to cost reduction, time efficiency, and the ability to evaluate diverse scenarios, is an effective tool for predicting and optimizing energy consumption in existing urban fabrics as well as designing new neighborhoods and cities. This study reviews urban simulation research over the past decade in estimating energy demand. The findings indicate that semantic 3D models enable precise calculation of energy demand, consumption simulation, analysis of renewable energy potential, and assessment of building renovation scenarios. Optimal use of roof space, simplification of building components, and integration of spatial, energy, and climate data enhance simulation accuracy while reducing computation time. Considering the climatic diversity of Iran, it was found that energy simulation parameters must be adjusted according to each climate: in hot-dry and hot-humid regions, the focus should be on cooling load management and solar energy utilization; in cold and mountainous climates, reducing heating loads and improving building insulation are essential; and in temperate-humid climates, combined consumption patterns and humidity and heating–cooling control must be accounted for. Accordingly, developing semantic 3D city models, establishing building energy databases, generating urban energy maps, and performing dynamic energy simulations can serve as effective tools for energy management, efficiency enhancement, sustainable planning, and supporting strategic decision-making in Iran's architecture and urban planning sectors.

Keywords: Urban simulation, modeling approaches, energy demand, Iran climate

* Corresponding Author: Amin Amini Kashani
Email: *am.aminikashani@tabriziau.ac.ir*
Phone:09376484443

Doi: 10.48306/juem.2026.575734.1145

نشریه علمی مدیریت محیط زیست شهری

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال چهارم/شماره اول/ بهار ۱۴۰۵/صفحه ۱۰۶-۱۳۲

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۶

تحلیل نظام‌مند مطالعات شبیه‌سازی شهری در برآورد تقاضای انرژی: درس‌آموخته‌هایی برای اقلیم‌های چهارگانه ایران

امین امینی کاشانی*[۱]، ریحانه آشتیانی[۲]

[۱] دکترای شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

[۲] دکترای شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

افزایش جمعیت شهری و رشد مصرف انرژی، همراه با محدودیت منابع سوخت فسیلی و بحران‌های زیست‌محیطی، ضرورت توجه به مدیریت مصرف انرژی در شهرها را برجسته نموده است. شبیه‌سازی انرژی شهری با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی معنایی، به دلیل کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در زمان و امکان ارزیابی سناریوهای متنوع، ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در بافت‌های شهری موجود و طراحی محله‌ها و شهرهای جدید محسوب می‌شود. این پژوهش مطالعات ده سال اخیر شبیه‌سازی شهری در برآورد تقاضای انرژی را بررسی نموده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های سه‌بعدی معنایی، امکان محاسبه دقیق تقاضای انرژی، شبیه‌سازی مصرف، تحلیل پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر و ارزیابی سناریوهای نوسازی ساختمان‌ها را فراهم می‌کنند. استفاده بهینه از فضای سقف‌ها، ساده‌سازی اجزای ساختمانی و یکپارچه‌سازی داده‌های کالبدی، انرژی و آب‌وهوا موجب افزایش دقت و کاهش زمان شبیه‌سازی می‌شود. با لحاظ نمودن تنوع اقلیمی ایران، مشخص شد که پارامترهای شبیه‌سازی انرژی باید متناسب با ویژگی‌های هر اقلیم تنظیم شوند: در مناطق گرم و خشک و گرم و مرطوب، تمرکز بر مدیریت بار سرمایشی و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است؛ در اقلیم سرد و کوهستانی، کاهش بار گرمایشی و عایق‌کاری ساختمان‌ها اهمیت دارد و در اقلیم معتدل و مرطوب، الگوهای مصرف ترکیبی و کنترل رطوبت و گرمایش-سرمایش باید لحاظ شوند. بر این اساس، توسعه مدل‌های سه‌بعدی شهری، ایجاد بانک داده انرژی ساختمان‌ها، تهیه نقشه‌های انرژی شهری و شبیه‌سازی دینامیک انرژی می‌تواند ابزار مؤثری برای مدیریت مصرف انرژی، ارتقاء بهره‌وری، برنامه‌ریزی پایدار و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های کلان در حوزه معماری و شهرسازی ایران فراهم نماید.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی شهری، رویکردهای مدلسازی، تقاضای انرژی، اقلیم ایران

* نویسنده مسئول: امین امینی کاشانی

ایمیل: *am.aminikashani@tabriziau.ac.ir*

شماره تماس: ۰۹۳۷۶۴۸۴۴۴۳

Doi: 10.48306/juem.2026.575734.1145

۱-مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر موجب افزایش قابل‌توجه مصرف انرژی شده است، به‌گونه‌ای که ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی، نقش مهمی در تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند (EU, 2010). وابستگی شدید استانداردهای زندگی معاصر به انرژی، در کنار محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و تشدید بحران‌های زیست‌محیطی، شهرها را با چالش‌های جدی در کاهش مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن مواجه ساخته است. به‌عنوان نمونه، اتحادیه اروپا کاهش ۲۷ درصدی مصرف انرژی اولیه تا سال ۲۰۳۰ را هدف‌گذاری کرده و اقدامات گسترده‌ای را در تمام مراحل زنجیره انرژی، به‌ویژه در بخش ساختمان، پیشنهاد داده است؛ بخشی که حدود ۴۰ درصد مصرف کل انرژی را به خود اختصاص می‌دهد (Agugiaro, 2016).

در این چارچوب، برنامه‌ریزی انرژی شهری نیازمند رویکردی کل‌نگر است که بتواند تعامل پیچیده میان فرم شهری، ویژگی‌های ساختمان و سیستم‌های انرژی را درک و تحلیل کند. دستیابی به اطلاعات دقیق تقاضای انرژی در مقیاس ساختمان و شهر، پیش‌نیاز تصمیم‌گیری مؤثر در این حوزه است؛ امری که در عمل با محدودیت‌های داده‌ای و پیچیدگی‌های محاسباتی همراه است. اگرچه مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) امکان سازماندهی اطلاعات فیزیکی و عملکردی بنا را فراهم می‌کند و ابزارهایی برای برآورد مصرف انرژی ارائه شده‌اند (Kumar, 2008; Kim & Anderson, 2013)، تعمیم این رویکرد به مقیاس شهری همچنان چالش‌برانگیز است.

در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی انرژی در مقیاس شهری به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل الگوهای مصرف انرژی، پیش‌بینی تقاضای گرمایش و ارزیابی سناریوهای کاهش کربن مورد توجه قرار گرفته است (Shan et al., 2021; Wang & Cao, 2021). این رویکرد امکان آزمون راهبردهای بهبود بهره‌وری انرژی و خودکفایی مناطق شهری را فراهم می‌سازد (Rossert et al., 2019) و به‌ویژه در مراحل اولیه طراحی، نقش مهمی در توسعه راهکارهای پایدار ایفا می‌کند (Buzatu et al., 2021; Chippagiri et al., 2021). با این حال، شبیه‌سازی دقیق انرژی مستلزم مدل‌های ورودی جامع و داده‌های مکانی قابل اعتماد است (Seyedzadeh et al., 2018; Chou, 2014; Kamel, 2019).

در این میان، استاندارد CityGML به‌عنوان یک قالب باز مبتنی بر XML، بستری مناسب برای نمایش هندسی و معنایی مدل‌های سه‌بعدی شهری فراهم می‌کند و با پشتیبانی از سطوح مختلف جزئیات (LoD0–LoD4)، امکان یکپارچه‌سازی داده‌های شهری و انرژی را مهیا می‌سازد (Benner et al., 2013; Gröger et al., 2019). این ویژگی‌ها CityGML را به یکی از ابزارهای کلیدی در مدل‌سازی انرژی شهری تبدیل کرده است. با وجود این، مطالعات موجود همچنان با چالش‌هایی نظیر دسترسی محدود به داده‌های واقعی مصرف انرژی و دشواری اتصال برنامه‌ریزی شهری به تحلیل‌های انرژی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مواجه‌اند.

در سال‌های اخیر، CityGML به‌عنوان بستری استاندارد و قدرتمند برای مدل‌سازی سه‌بعدی شهری، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌هایی نظیر تحلیل مخاطرات طبیعی، مطالعات ریزاقلیم شهری و بهینه‌سازی انرژی ساختمان داشته است. با این حال، پژوهش‌هایی که به‌صورت نظام‌مند و متمرکز به شبیه‌سازی انرژی در مقیاس شهری مبتنی بر CityGML پرداخته باشند، همچنان محدود است. افزون بر این، بخش عمده مطالعات موجود در کشورهای توسعه‌یافته انجام شده و چارچوب‌ها و راهبردهای پیشنهادی آن‌ها به‌دلیل تفاوت‌های ساختاری، اقتصادی و اقلیمی، به‌طور مستقیم قابل تعمیم به کشورهای در حال توسعه نیست.

در ایران، این مسئله با تنوع گسترده اقلیمی پیچیده‌تر می‌شود. کشور به چهار پهنه اصلی شامل اقلیم گرم و خشک، گرم و مرطوب، معتدل و مرطوب و سرد و کوهستانی تقسیم می‌شود که هر یک الگوهای متفاوتی از بار گرمایشی و سرمایشی، شدت تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و رفتار مصرف انرژی را شکل می‌دهند. این تفاوت‌ها مستقیماً بر پارامترهای ورودی مدل‌های شبیه‌سازی انرژی شهری، از جمله داده‌های آب‌وهوایی، ویژگی‌های پوسته ساختمان، الگوهای بهره‌برداری و پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر اثرگذار است. ازاین‌رو، هرگونه چارچوب مدل‌سازی تقاضای انرژی در ایران نیازمند رویکردی اقلیم‌محور و بومی‌سازی‌شده است.

بر این اساس، خلأ پژوهشی مشخصی در پیوند میان برنامه‌ریزی شهری، شبیه‌سازی انرژی و استاندارد CityGML، به‌ویژه در بستر کشوری با رشد سریع شهرنشینی و ناترازی میان عرضه و تقاضای انرژی مانند ایران، مشاهده می‌شود. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف، به مرور نظام‌مند مطالعات ده سال اخیر پرداخته و می‌کوشد با بازخوانی و تحلیل تطبیقی یافته‌های جهانی، درس‌آموخته‌هایی متناسب با اقلیم‌های چهارگانه ایران استخراج کرده و راهبردهایی کاربردی و اقلیم‌محور برای مدیریت تقاضای انرژی شهری ارائه دهد.

۲- شبیه‌سازی شهری

افزایش روزافزون جمعیت جهان به ویژه در مناطق شهری بر اهمیت شبیه‌سازی شهری برای مدیریت هرچه بهتر رشد شهرها بیش از پیش تاکید دارد. به سبب سه بعدی بودن محیط زندگی افراد و سازگاری طبیعی مغز انسان با تفسیر سه بعدی اشیاء، وجود اینگونه مدل‌ها به درک بهتر پدیده‌های شهری کمک شایانی می‌کنند. از سوی دیگر، وجود داده‌های رقومی سه بعدی سبب افزایش دقت، کارایی و بهبود نتایج بسیاری از تحلیل‌های مکانی می‌گردد(Goetz, 2013). این مدل‌ها در زمینه‌های متعددی همچون ناوبری و مسیریابی(Coors & Zipf, 2007)، شبیه‌سازی‌های محیطی یا مدیریت تاسیسات(Kolbe, 2009)، واکنش اضطراری یا عملیات نجات(Kolbe et al, 2008)، برنامه‌ریزی شهری(Shiode, 2000) و تقاضای انرژی(Malhotra et al, 2022) استفاده شده است.

نمایش محیط شهری به همراه اشیا و سازه‌های موجود در آن به صورت سه بعدی، مدل سه بعدی شهر نامیده می‌شود. ساختمان‌ها مهم‌ترین عوارض موجود در این نوع مدل‌ها هستند. مدل‌های سه بعدی شهری علاوه بر نمایش شهر، امکان اندازه‌گیری و تحلیل‌های هندسی را نیز فراهم می‌سازند؛ بنابراین همواره مورد توجه بوده‌اند(کزازی و حسینعلی، ۱۳۹۹: ۲-۳). مدل‌های سه بعدی شهر برای تعداد فزاینده‌ای از شهرها، مناطق، ایالت‌ها و حتی کشورها ارائه می‌شوند. آنها توسط مقامات دولتی مانند آژانس‌های نقشه برداری ملی و دولتی و همچنین توسط مؤسسات کاداستر و شرکت‌های خصوصی ایجاد و نگهداری می‌شوند. توپوگرافی سه بعدی نواحی شهری و روستایی هم برای اکتشاف بصری و هم برای طیف وسیعی از تحلیل‌های مختلف در بخش‌های برنامه‌ریزی شهری، محیط زیست، انرژی، حمل و نقل و مدیریت تسهیلات ضروری است(Kolbe,2019: 26). در واقع مدلسازی سه بعدی شهر انتزاع رایانه‌ای یا نمایش جنبه‌های فضایی- معنایی از اشیاء شهری مانند ساختمان، پوشش گیاهی، مبلمان شهری و سایر موارد مشابه، در سیستم تحلیلی سه‌بعدی است که سناریوهای شبیه‌سازی متنی را نشان می‌دهد. این مدل‌ها در قالب فایل دیجیتال مربوطه نرم افزار مدل‌سازی ذخیره می‌شوند(Saran et al, 2015).

درگذشته، مدل‌های سه بعدی شهری صرفاً گرافیکی و هندسی بودند و جنبه‌های معنایی شهر و اجزای آنها نادیده گرفته شده بود. بنابراین برای جستجو، تحلیل و داده کاوی مکانی مناسب نبودند. اما امروزه با پررنگ شدن اهمیت و جایگاه مدلسازی سه بعدی در برنامه‌ریزی‌های شهری، استانداردهای مرتبط با این نوع مدل‌ها نیز گسترش یافته‌اند. با توجه به اهمیت و کاربردهای فراوان مدل‌های سه بعدی شهری در حوزه‌های مختلف، تهیه و استفاده از این‌گونه مدل‌ها برای مدیریت و برنامه‌ریزی فعالیت‌های شهری ضروری و اجتناب ناپذیر است؛ اما از یک سو با توجه به وجود اشیای متنوع و فراوان در شهر و از سوی دیگر پیچیدگی روابط بین اشیای شهری و دستیابی به اطلاعات لازم برای تهیهٔ مدل‌های سه بعدی به سختی و با صرف هزینه و زمان زیاد امکان‌پذیر است(کزازی و حسینعلی، ۱۳۹۹: ۳-۲). در ادامه به معرفی استانداردهای رایج در مدلسازی سه‌بعدی شهری پرداخته شده است.

۲-۱- قالب‌ها و استانداردهای رایج در شبیه‌سازی شهری

برای نمایش اطلاعات سه‌بعدی قالب‌های بسیاری از قبیل VRML, X3D, COLLADA, KML, GML3 و CityGML ایجاد شده‌اند که هرکدام به تفکیک در جدول شماره ۱ به اختصار توضیح داده شده‌اند.

جدول ۱- قالب‌ها و استانداردهای رایج در شبیه‌سازی سه بعدی شهری

قالب‌ها	توضیحات	منبع
VRML	این قالب با پشتیبانی از هندسه‌ای ساده، نورپردازی و امکان تعریف رنگ، مدلی استاتیک با قابلیت تغییر زوایای دید ارائه می‌دهد. اگرچه VRML قابلیت‌های مختلفی در نمایش گرافیکی دارد ولی مسائلی از قبیل پیچیده بودن ساختار، سرعت پایین نمایش و ذخیره‌سازی اشیای پیچیده و نبود استاندارد برای توسعه مدل داده جزو محدودیت‌های آن به شمار می‌رود.	میروهابی و عباسپور، ۱۳۹۵: ۱۸۹

X3D	کارگروه X3D در سال ۱۹۹۹ برای به روز رسانی و رفع کاستی‌های VRML تشکیل شد. در اصل X3D فرمت XML شده‌ای از VRML است که تگ‌های باز و بسته آن از پیش تعریف شده‌اند.	نگارندگان، ۱۴۰۱
COLLADA	این قالب از دیگر استانداردهای گرافیکی نمایش سه بعدی مبتنی بر XML بوده که نسبت به X3D از قابلیت‌های بیشتری برخوردار می‌باشد و پس از آن مطرح گردید. برنامه‌های بسیاری چون برنامه‌های GIS و CAD مبنا و همچنین بازی‌های رایانه‌ای و تحت وب از این قالب داده پشتیبانی می‌کنند.	Barnes & Finch, 2008
KML	این قالب، استانداردی برای نمایش سه بعدی، دارای محتوای چندرسانه‌ای و همچنین مدل داده‌ای برای تبادل در پروژه Google Earth می‌باشد. استاندارد KML نیز از استانداردهای مبتنی بر XML می‌باشد.	میروهابی و عباسپور، ۱۳۹۵:
GML3	استاندارد GML3 که براساس مدل داده GML توسعه یافته، مدل داده‌ای است که به منظور جدا نمودن محتوا از نمایش و مدلسازی، ذخیره و تبادل داده‌های خام مکانی ایجاد گردیده است. این زبان مدلسازی، به دلیل تبعیت از ساختار XML و در نتیجه برخورداری از سطح بالای تعامل‌پذیری در تبادل داده‌های مکانی، به سرعت مورد توجه پایگاه‌های داده و سایر برنامه‌های تحلیلگر و نمایشگر سه بعدی مکانی قرار گرفت.	میروهابی و عباسپور، ۱۳۹۵: ۱۸۹
CityGML	تفاوت اصلی این قالب با دیگر قالب‌های سه بعدی موجود از قبیل VRML و X3D وجود اطلاعات معنایی متفاوت همچون نام، آدرس و اطلاعات جزئی مربوط به ساختمان و قابلیت ذخیره‌سازی آنها در کنار اطلاعات هندسی ساختمان می‌باشد. حفظ ساختار توپولوژیک و روابط توپولوژی بین عوارض از دیگر نقاط قوت این ساختار داده به شمار می‌رود.	Goetz, 2013

با توجه به موضوع مورد مطالعه در ادامه به تبیین بیشتر قالب CityGML پرداخته شده است. در بین قالب‌های موجود این قالب از پتانسیل بیشتری برای نمایش اطلاعات سه بعدی، به خصوص اطلاعات سه بعدی شهری برخوردار می‌باشد و در اکثر ویژگی‌های مذکور دارای پشتیبانی کامل و توسعه یافته است. قالب‌های دیگر غالبا بر جنبه نمایشی داده‌های سه بعدی تمرکز داشته و کمتر به اطلاعات معنایی پرداخته‌اند.

۲-۲- قالب CityGML

شناخته‌شده‌ترین استاندارد در زمینه مدلسازی سه بعدی در برنامه‌ریزی‌های شهری، استاندارد CityGML است که شهر را از لحاظ مکانی و معنایی، تعریف می‌کند. مدل داده باز معروف به زبان نشانه‌گذاری جغرافیای شهر[1] به دلیل ارائه نمایش خوبی از اشیاء شهری، رابطه بین اشیاء، دسترسی به داده‌های مدل(باز بودن) و مقیاس پذیری اطلاعات، برای مدل‌سازی شهری بسیار سودمند است. CityGML یک طرح داده باز است که می تواند برای نمایش، ذخیره و تبادل اطلاعات شهری استفاده شود و توسط کنسرسیوم فضایی باز[2] استاندارد شده است. از آنجایی که CityGML می‌تواند بر محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر دوبعدی غلبه کند، به طور گسترده‌ای برای تولید مدل‌ها در مطالعات شبیه سازی شهری استفاده شده است(Jang et al, 2021).

CityGML طبقات و روابط مرتبط‌ترین اشیاء توپوگرافی را در شهرها و مدل‌های منطقه‌ای با توجه به ویژگی‌های هندسی، توپولوژیکی، معنایی و ظاهری آنها تعریف می‌کند و به این دلیل تعریف شده است که مدل‌های سه بعدی گرافیکی یا هندسی خالص، در صورت مناسب بودن برای اهداف تجسمی، برای کاربردهایی مانند برنامه‌ریزی شهری و منظر، طراحی معماری، فعالیت‌های گردشگری و اوقات فراغت، کاداسترهای سه بعدی، شبیه‌سازی‌های محیطی، مخابرات سیار، مدیریت بلایا، امنیت داخلی، ناوبری وسایل نقلیه و عابر پیاده، شبیه سازهای آموزشی یا روباتیک متحرک کافی نیستند(Metral et al, 2015). تفاوت اصلی CityGML با دیگر قالب‌های سه بعدی موجود از قبیل VRML و X3D وجود اطلاعات معنایی متفاوت همچون نام، آدرس و اطلاعات جزئی مربوط به

[1] Geography Markup Language (CityGML)
[2] Open Geospatial Consortium (OGC)

ساختمان و قابلیت ذخیره‌سازی آنها در کنار اطلاعات هندسی ساختمان می‌باشد(Goetz, 2013). حفظ ساختار توپولوژیک و روابط توپولوژی بین عوارض از دیگر نقاط قوت این ساختار داده به شمار می‌رود.

CityGML پنج سطح متوالی از جزئیات را تعریف می‌کند. از زمین به تنهایی گرفته تا مدل‌های معماری. با افزایش LOD اشیاء، هم در سطح هندسی و هم در سطح موضوعی جزئیات بیشتری پیدا می‌کنند. علاوه بر ویژگی‌هایشان، اشیاء در CityGML می‌توانند ارجاعات خارجی به اشیاء مربوطه در پایگاه‌های داده یا مجموعه‌های داده دیگر داشته باشند(Zhu et al, 2016). برای نمایش عوارض به ویژه عوارض ساختمانی ۵ سطح جزئیات تعریف شده است. در واقع یک عارضه امکان نمایش در ۵ مقیاس مختلف را داراست(میروهابی و عباسپور، ۱۳۹۵: ۱۹۰):

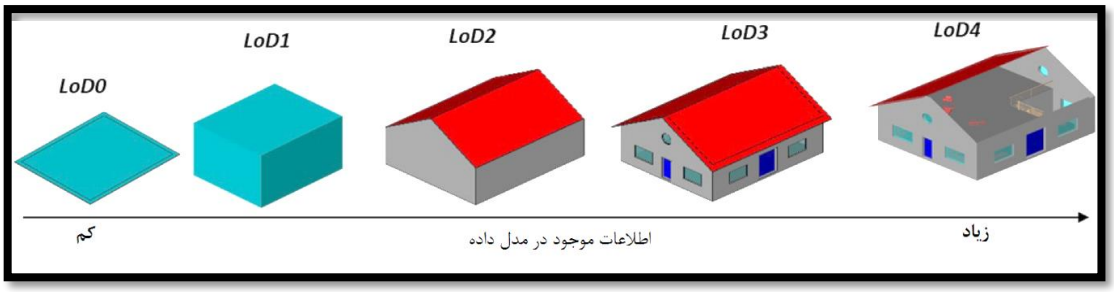
سطح صفر جزئیات(LOD0): عبارت است از نمایش ۲/۵ بعدی مدل رقومی ارتفاعی(DTM).

سطح یک جزئیات(LoD1): مدل بلوک ساختمان (به شکل چندوجهی) با سقف مسطح می‌باشد.

سطح دو جزئیات(LoD2): نمایش سقف‌های مختلف و سطوح متفاوت.

سطح سه جزئیات(LoD3): نمایش مدل مهندسی شامل دیوارها، درها، پنجره‌ها، بالکن و جزئیات بیشترنمای ساختمان

سطح چهار جزئیات(LoD4): تکمیل کننده سطح ۳ و شامل عوارض داخلی ساختمان شامل اتاق‌ها، راهروها، پله‌ها و اثاثیه منزل.



شکل ۱- پنج سطح متفاوت از جزئیات(LoD) در CityGML (Malhotra et al, 2022)

در واقع CityGML استاندارد و مدل داده‌ای باز مبتنی بر XML برای نمایش، ذخیره‌سازی و تبادل مدل‌های سه بعدی شهری است. این استاندارد مدل داده برداری با قابلیت حفظ اطلاعات معنایی و شمای مورد استفاده در آن براساس GML3 می‌باشد. CityGML دو بخشی مدل مرکزی هندسی و مدل‌های موضوعی دارد. مدل هندسی به عنوان core model و بقیه مدل‌های موجود به عنوان مدل موضوعی شناخته می‌شوند. مدل‌های موضوعی شامل مدل نمایشی، توپوگرافی، پوشش گیاهی، عوارض شهری، ساختمان‌ها و کاربری زمین می‌باشد(میروهابی و عباسپور، ۱۳۹۵: ۱۸۹-۱۹۰). مدل موضوعی شامل تعاریف کلاس برای مهم‌ترین اشیاء در مدل‌های شهر سه بعدی مجازی است. در ادامه و در جدول شماره ۲ به معرفی چند مدل موضوعی درCityGML پرداخته شده است.

جدول ۲- معرفی برخی مدل‌های موضوعی مهم درCityGML

مدل	ویژگی‌ها
ساختمان	ساختمان‌ها را می‌توان در پنج سطح از جزئیات (LoD0 تا LoD4) نشان داد. مدل ساختمان امکان نمایش ساختمان‌های ساده‌ای که فقط از یک جزء تشکیل شده‌اند و همچنین روابط پیچیده بین بخش‌های یک ساختمان را نمایش می‌دهد؛ به عنوان مثال ساختمانی متشکل از سه قسمت خانه اصلی، گاراژ و یک الحاقیه.
مبلمان شهری	اشیاء مبلمان شهری اشیای ثابت مانند فانوس‌ها، چراغ‌های راهنمایی، علائم راهنمایی و رانندگی، سطل‌های گل، ستون‌های تبلیغاتی، نیمکت‌ها، پایه‌های تعیین حدود یا ایستگاه‌های اتوبوس هستند. کلاس City Furniture ممکن است دارای ویژگی‌های کلاس، عملکرد و کاربرد باشد.
حمل و نقل	مدل حمل و نقل CityGML یک مدل چند منظوره و چند مقیاسی است که بر جنبه‌های موضوعی و عملکردی و همچنین هندسی / توپولوژیکی تمرکز دارد. ویژگی‌های حمل و نقل به صورت یک شبکه خطی در LoD0 نشان داده می‌شوند. با شروع از LoD1 ، تمام ویژگی‌های حمل و نقل به صورت هندسی توسط سطوح سه بعدی توصیف می‌شوند.

کاربری زمین	مدل کاربری زمین، مناطقی از سطح زمین را توصیف می‌کند که به یک کاربری خاص اختصاص داده شده است. آنها می‌توانند برای نشان دادن قطعات به صورت سه بعدی استفاده شوند. هر شی کاربری زمین ممکن است دارای کلاس ویژگی‌ها(مثلاً منطقه سکونت، منطقه صنعتی، زمین کشاورزی)، تابع(هدف، به عنوان مثال، مزرعه ذرت) و کاربرد باشد، اگر نحوه استفاده از شی با تابع متفاوت باشد. شی کاربری زمین برای همه LoD 0-4 تعریف شده است و ممکن است هندسه‌های متفاوتی برای هر LoD داشته باشد.
پوشش گیاهی	مدل پوشش گیاهی CityGML بین اشیاء پوشش گیاهی منفرد مانند درختان و مناطق پوشش گیاهی، که نمایانگر بیوتوپ‌هایی مانند جنگل‌ها یا سایر جوامع گیاهی هستند، تمایز قائل می‌شود. اشیاء گیاهی منفرد توسط کلاس "Solitary Vegetation Object" مدل‌سازی می‌شوند، در حالی که برای مناطق پر از پوشش گیاهی خاص از کلاس "Plant Cover" استفاده می‌شود.
بدنه‌های آبی	مدل بدنه‌های آبی جنبه‌های موضوعی و هندسه سه بعدی رودخانه‌ها، کانال‌ها، دریاچه‌ها و حوضه‌ها را نشان می‌دهد. در LoD 2-4 بدنه‌های آبی با سطوح موضوعی مجزا محدود شده‌اند. این سطوح عبارتند از Water Surface که به عنوان مرز بین آب و هوا تعریف می‌شود، Water Ground Surface که به عنوان مرز بین آب و زیرزمین تعریف می‌شود(به عنوان مثال DTM یا کف یک شی حوضه سه‌بعدی) و صفر یا بیشتر Water Closure Surface که به عنوان مرزهای مجازی تعریف می‌شود.

منبع:(Kolbe, 2019: 28)

۲-۲-۱- توسعه دامنه برنامه CityGML[1]

مدل‌های شهری سه‌بعدی معنایی برای بسیاری از حوزه‌های مختلف مانند شبیه‌سازی‌های انرژی، محیط زیست، رانندگی و ترافیک، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، مدیریت دارایی، و ادغام اطلاعات شهری استفاده می‌شوند. به منظور ذخیره و مبادله داده‌های خاص برنامه که با اشیاء شهر سه بعدی تراز و یکپارچه شده‌اند، مدل داده CityGML را می‌توان با انواع ویژگی‌ها و روابط جدید با استفاده از مکانیسم توسعه دامنه برنامه CityGML گسترش داد. توسعه‌های دامنه برنامه(ADEs) به عنوان الگوهای کاربردی GML با استفاده از زبان مدل‌سازی XML مشخص می‌شوند. لذا پایگاه داده شهر سه بعدی می‌تواند به صورت پویا توسط توسعه‌های دامنه برنامه CityGML به صورت دلخواه گسترش یابد(Kolbe, 2019: 28). یکی از این توسعه‌ها در حوزه برنامه CityGML که زمینه اصلی پژوهش حاضر نیز محسوب می‌شود مدلسازی تقاضای انرژی است که در ادامه به تبیین ویژگی‌های آن پرداخته شده است.

۲-۲- مدلسازی تقاضای انرژی

شهرها نقش مهمی در دستیابی به اهداف محلی و جهانی برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. به منظور تعیین پتانسیل بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان، ابزارهای برنامه‌ریزی جدیدی مورد نیاز است که از یک سو امکان به تصویر کشیدن کل ساختمان را می‌دهد و از سوی دیگر اقدامات دقیق را بررسی می‌کند. در این راستا، مدل‌های سه‌بعدی شهر می‌توانند هندسه و فرم‌های واقعی‌تر ساختمان‌ها و همچنین پارامترهای ورودی مختلف مانند گونه‌شناسی ساختمان و ویژگی‌های انرژی مرتبط با داده‌های سه‌بعدی را ارائه دهند. مطالعات مدلسازی انرژی ساختمان[2] و اجرای آنها در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف برای چندین سال انجام شده است. مدل‌های آماری و مهندسی برای بسیاری از کاربردها استفاده می‌شوند، به عنوان مثال، در استراتژی‌های انرژی کم کربن یا افزایش بازده انرژی برای طرح‌های نوسازی ساختمان. مدل‌های آماری به شدت به داده‌های تاریخی مصرف انرژی وابسته هستند، در حالی که مدل‌های مهندسی بر اساس خواص فیزیکی ساختمان‌ها و محاسبات انتقال حرارت برنامه‌ریزی می‌شوند(Murshed et al, 2018).

لذا شبیه‌سازی عملکرد انرژی در مقیاس شهری اغلب به عنوان شیوه‌ای کارآمد جهت مدیریت انرژی شهری محسوب می‌شود. پرداختن به مسائل مربوط به تغییرات آب و هوا و افزایش تقاضای انرژی، پیش‌بینی دقیق تقاضای گرمایش گام مهمی به سوی هدف کاهش تولید و انتشار کربن است. علاوه بر این، شبیه‌سازی انرژی ساختمان‌های شهری یک رویکرد امیدوارکننده برای درک استفاده از انرژی و برنامه‌های آزمایشی برای بهبود کارایی املاک مسکونی ارائه می‌دهد. محاسبات مبتنی بر تقاضا بر تازگی و کارایی پیشرفت‌های

[1] Application Domain Extensions (ADE)
[2] Building Energy Modelling (BEM)

فنی جدید و یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر در شهرهای برنامه‌ریزی‌شده فعلی و آینده تأثیر می‌گذارد. یک برآورد خوب از تقاضای انرژی در مقیاس شهری به متخصصان شبیه‌سازی و برنامه‌ریزان شهری اجازه می‌دهد تا خودکفایی مناطق شهری را آزمایش و تأیید کنند(Malhotra et al, 2022). در واقع هدف EnergyADE ذخیره و مدیریت داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی مدل‌های پیچیده انرژی شهری است که مشخصات ساختمان و داده‌های انرژی را در نظر می‌گیرد. یکی از ویژگی‌های مهم این ADE امکان مدیریت کیفیت داده‌های مختلف از نظر سطح جزئیات و پیچیدگی مدل‌های انرژی است(Zhu et al, 2016).

در اجلاس آب و هوای سازمان ملل در سپتامبر ۲۰۱۹، ۷۷ کشور و بیش از ۱۰۰ شهر متعهد به انتشار خالص کربن صفر تا سال ۲۰۵۰ شدند. در این برنامه به طور مشخص ساختمان‌ها به عنوان عامل اصلی انتشار دی اکسید کربن در شهرها شناسایی شده و در نتیجه فرصت‌های کاهش قابل توجهی را ارائه می‌دهند. در سرتاسر جهان، ساختمان‌ها بین ۲۰ تا ۴۰ درصد از مصرف نهایی برق و ۴۰ درصد از مجموع انتشار مستقیم و غیرمستقیم دی اکسید کربن را موجب می‌گردند. لذا باید بهتر درک شود که هر ساختمان در یک منطقه جغرافیایی چقدر انرژی مصرف کرده و هزینه‌ها و روش‌های به روزرسانی مورد نیاز برای کاهش مصرف انرژی آن چقدر و چگونه است. به طور خلاصه این مسئله به یک چارچوب حمایتی تصمیم‌گیری جدید و موثر برای ساختمان‌ها، به ویژه در مقیاس شهری نیاز دارد. مدل‌سازی انرژی ساختمان شهری[1] یک رویکرد از پایین به بالا برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌های متعدد است که به عنوان ستون فقرات تحلیل برای فرآیندهای تصمیم‌گیری توسعه داده شده است(Ang et al, 2020). در واقع این مدل‌سازی به پیش‌بینی مصرف انرژی و همچنین شرایط محیطی داخلی و خارجی، برای گروه‌های ساختمان در بافت شهری اشاره دارد. مدل‌سازی انرژی ساختمان شهری ابزاری عالی برای کشف فرصت‌ها برای اقدامات حفاظت از انرژی[2] در هنگام استفاده از گروه بزرگی از ساختمان‌ها در بافت شهری است. این مدلسازی همچنین در حال تبدیل شدن به یک ابزار اثبات شده برای پشتیبانی از برنامه‌های بهره‌وری انرژی برای ساختمان‌های شهری می‌باشد. در مجموع می‌توان گفت که توسعه یک مجموعه داده در مقیاس شهر از ساختمان‌های موجود، یک گام مهم در مدل‌سازی برای تولید خودکار مدل‌های انرژی ساختمان‌های شهری و شبیه‌سازی عملکرد آنها است (Chen et al, 2019).

اقدامات متعددی برای افزایش کارایی در تمام مراحل زنجیره مصرف انرژی در رابطه با تولید، تبدیل، توزیع و مصرف نهایی پیشنهاد شده است. برخی از این اقدامات بر بخش ساختمان متمرکز است، جایی که پتانسیل صرفه‌جویی در آن بیشتر است. امروزه می‌توان اطلاعات دقیقی در مورد تمامی مشخصات فیزیکی و عملکردی یک ساختمان در یک مدل اطلاعات ساختمان[3] سازماندهی کرد. این مدل به عنوان منبعی برای حمایت از تصمیم‌گیری در مورد تأسیسات از اولین مراحل مفهومی آن، از طریق طراحی و ساخت، عمر عملیاتی و تخریب نهایی آن در نظر گرفته می‌شود. امروزه تعدادی ابزار برای مدل‌های اطلاعات ساختمان وجود دارد تا تقاضای انرژی جهانی را تخمین زده و کارایی انرژی ساختمان را افزایش دهند(Agugiaro, 2015). الگوریتم‌هایی مانند فراگیری ماشین، هوش مصنوعی یا پردازش تصویر برای ارزیابی انرژی ساختمان‌ها استفاده می‌شوند (Malhotra et al, 2022).

به طور کلی تکنیک‌های مدلسازی مصرف انرژی در یک گروه از ساختمان‌ها را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم نمود(یکتا و گل‌افشان، ۱۳۹۴):

- مدل‌های بالا به پایین

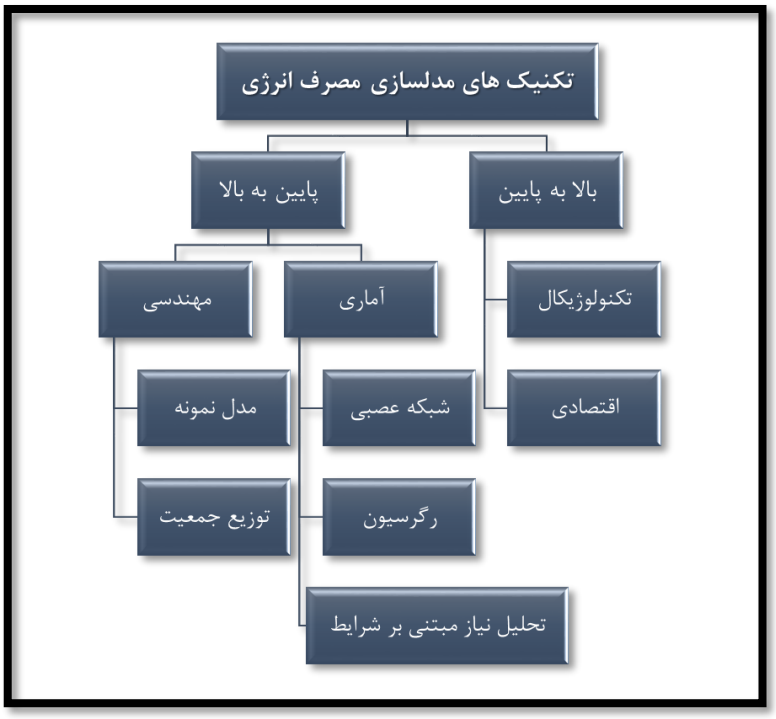
مصرف انرژی و دیگر خصوصیات مرتبط را برای یک بخش مسکونی یا یک گروه از ساختمان‌ها محاسبه می‌کنند. رویکرد بالا به پایین، شامل دو گروه اصلی اقتصادی و تکنولوژیکال می‌باشد. مدل‌های اقتصادی بر پایه هزینه(از جمله انرژی و تجهیزات) و درآمد هستند. مدل‌های تکنولوژیکال مصرف انرژی را به خصوصیات کلان یک مجموعه ساختمان ازجمله بهره‌مندی از تجهیزات آسایش حرارتی مرتبط می‌سازند.

- مدل‌های پایین به بالا

مصرف انرژی تک تک ساختمان‌ها را محاسبه می‌کنند و آن را به کل بخش مورد مطالعه تعمیم می‌دهند. رویکرد بالا به پایین، شامل دو گروه مدل‌های آماری و مهندسی می‌باشد. پایه مدل‌های آماری بر اطلاعات تاریخی و انواع آنالیز رگرسیون‌های خطی مورد استفاده برای مشخص کردن مصرف انرژی ساختمان یک کاربری خاص می‌باشد. زمانی که ارتباط میان کاربری‌ها و مصارف انرژی

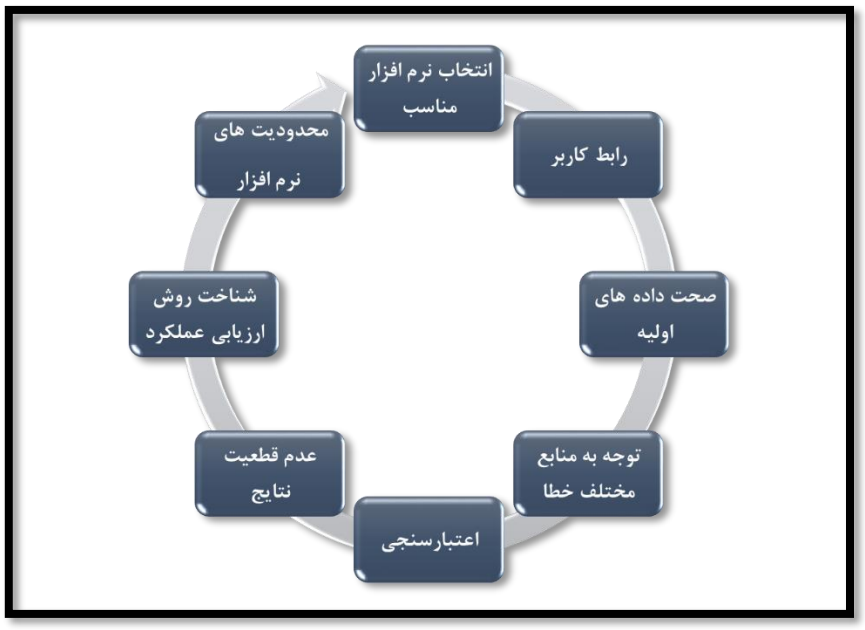
[1] Urban building energy modeling (UBEM)
[2] Energy conservation measures (ECMs)
[3] Building Information Model (BIM)

مشخص شد، مدل می‌تواند برای تخمین انرژی مصرفی کاربران که نماینده منطقه مورد بررسی هستند، مورد استفاده قرار بگیرد. مدل‌های مهندسی میزان مصرف انرژی یک کاربری خاص را بر پایه برق مصرفی و میزان استفاده از تجهیزات و سیستم‌ها و یا انتقال حرارت و ارتباطات حرارتی، محاسبه می‌کند.



شکل ۲- تکنیک‌های مدلسازی مصرف انرژی

در حال حاضر، با توجه بـه صرفه جویی‌های زیاد در هزینه و زمان، از استفاده از شبیه‌سازی انرژی گریزی نیست، اما کاربرد صحیح ابزارهای شبیه‌ساز پیش نیازهایی را می‌طلبد که نشـان دهنده بینش کاربر به ابزار مورد استفاده است. در ادامه عوامل و پارامترهای مهم که در شبیه‌سازی انرژی باید مورد توجه قرار گیرند، در شکل شماره ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۳- عوامل موثر در در کیفیت شبیه‌سازی انرژی(Clarke, 2001)

یکی از عوامل مؤثر بر کیفیت شبیه‌سازی، تناسب نرم‌افزار شبیه‌ساز با هدف شبیه‌سازی و میزان اعتبار آن است. در سال‌های اخیر، در برخی از پژوهش‌ها قابلیت‌های نرم‌افزارهای مختلف شبیه‌ساز انرژی در حوزه ساختمان مقایسه و با بررسی ویژگی‌های آنها در تقابل با یکدیگر، مزایا و معایب هر یک مشخص شده است. با این همه، تولید نرم‌افزارهای جدید و گسترش روزافزون قابلیت‌های نرم‌افزارها اجرای پژوهش‌های جدید را در این زمینه ضروری می‌سازد(وکیلی‌نژاد، ۱۳۹۸: ۸۵). تعداد نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مرتبط با انرژی برای مدلسازی ساختمان‌ها و یا اجزای آنها به قدری در دنیای مدرن توسعه یافته که تقریبا برای انجام هر محاسبه‌ای می‌توان یک نرم افزار مدلسازی مناسب یافت. این نرم افزارها می‌توانند در مقیاس‌های متفاوت ساختمانی، از مقیاس شهر، تا محله، واحد همسایگی، ساختمان تا اجزای ساختمان به کار روند. جز نرم افزارهایی که کل ساختمان را شبیه‌سازی می‌نمایند و می‌توانند مصرف انرژی ساختمان، شاخص‌های شرایط آسایش حرارتی فضاهای داخلی و کیفیت هوا را مدلسازی کنند، نرم‌افزارهای دیگری تنها به مدلسازی اجزاء و عناصر ساختمان همچون اجزای پوسته حرارتی، سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی، آب گرم مصرفی و تهویه مکانیکی (سیستم های تاسیساتی) تا سیستم روشنایی مصنوعی، مدلسازی نور روز، سیستم انرژی‌های نو و مبدل‌های حرارتی زیرزمینی می‌پردازند. تعدادی از این نرم‌افزارها به همراه کاربرد هریک در مقیاس شهری و ساختمان در جدول شماره ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳- معرفی برخی نرم‌افزارهای مدلسازی انرژی از مقیاس شهری تا جزئیات

نرم‌افزار	مقیاس	کاربرد
Envi Met	شهر	* گسترش تمرکز از سطح یک ساختمان تا سطوح بزرگ شهری از طریق تحلیل‌های این نرم افزار * شبیه‌سازی‌های پیشرفته و در بر گرفتن آخرین تکنولوژی برای مناطق مسکونی از جمله تکنولوژی آبی و دیوارهای سبز * شبیه‌سازی با نگاهی عمیق بر پروژه‌ها از ایده اولیه تا طرح نهایی و بررسی شرایط آسایش، فضای سبز و عملکرد بنا از نظر انرژی.
CitySim	شهر	* پشتیبانی از کاربران نرم‌افزار برای توصیف ساختمان‌های هندسی سه‌بعدی در مقیاس یک منطقه شهری(شامل چند صد ساختمان) و نسبت دادن خواص حرارتی-فیزیکی این ساختمان‌ها به روشی کارآمد با استفاده از یک فایل اختصاصی با فرمت XML. * شبیه‌سازی تقاضای انرژی ساختمان‌ها، با توجه به ماهیت تصادفی حضور و رفتار ساکنان و در نظر گرفتن طیف وسیعی از سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع رایج. * برای ارسال فایل‌های متنی استاندارد به کاربران نرم‌افزار برای پشتیبانی از تجزیه و تحلیل داده‌های عملکرد انرژی به منظور شناسایی محدوده بهبود عملکرد ساختمان‌ها با استفاده از ابزار گرافیکی مورد علاقه‌شان.
DesignBuilder	ساختمان	* مدلسازی نور روز * تجزیه و تحلیل هزینه‌های اجرا و جاری پروژه‌های ساختمانی برای مصارف انرژی از نظر اقتصادی * مدلسازی سیستم‌های انرژی نو مانند کلکتورهای گرمایی خورشیدی، سلول‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی * محاسبه مصارف انرژی ساختمان، بارهای حرارتی، مصرف برق برای روشنایی و آب گرم مصرفی.
TRNSYS	ساختمان	* این نرم‌افزار از کتابخانه‌های غنی از کامپوننت‌ها تشکیل شده که شامل طیف گسترده‌ای از سیستم‌ها و تکنولوژی‌ها، از قبیل: انواع کلکتورهای خورشیدی(SolarCollector)، سیستم‌های فتوولتائیک(Photovoltaics System)، ساختمان‌ها و بارهای گرمایشی-سرمایشی، انواع سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه‌مطبوع، انرژی بادی و ژئوترمال(Geothermal) و سیستم‌های CHP[1] است.

[1] مخفف Combined Heat and Power ؛ یکی از روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی است که در آن برق و حرارت به طور همزمان تولید می‌شوند.

IDA-ICE	ساختمان	* این نرم‌افزار با هدف طراحی بهینه ساختمان با رویکرد دست‌یابی به Concept خانه‌های کم انرژی برای پروسه طراحی و پیش از ساخت و همچنین ساختمان‌های در حال ساخت و همچنین با رویکرد ممیزی و بهینه‌سازی انرژی برای ساختمان‌های ساخته شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.
EnergyPlus	ساختمان	* این برنامه آنالیز را در زمان‌های کوتاه‌تر از یک ساعت انجام می‌دهد و بر اساس یک تعادل حرارتی از کل ناحیه شبیه‌سازی استوار است.
T*SOL	ساختمان	* شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیک حرارتی خورشیدی * ارائه ابعاد مناسب برای ایجاد سیستم حرارتی خورشیدی بر روی پشت بام * فراهم آوردن امکان ارائه یا نمایش آنی سیستم خورشیدی مربوطه از جمله پیش‌بینی‌های درآمدی و سودآوری * محاسبه میزان صحت و دقت یک سیستم حرارتی خورشیدی برای یک دوره یکساله و به صورت کاملاً پویا.
eQUEST	ساختمان	* شبیه‌سازی مصرف انرژی یک ساختمان و تعیین بار حرارتی ساختمان برای گستره‌ای از پارامترهای مهم از قبیل عایق دیواره‌ها، عایق بام و کف، میزان نفوذ هوا، نوع شیشه و اندازه پنجره.

اما مهم‌ترین مسئله در شبیه‌سازی، تعامل و پیچیدگی‌های پارامترهای مختلف با روابط غیرخطی و عدم قطعیت است که خود بر میزان اطمینان از نتایج اثر می‌گذارد. عدم قطعیت می‌تواند در پارامترهای فیزیکی، طراحی، سناریوها و بسیاری دیگر از پارامترها وجود داشته باشد(Hopfe, 2009). از آنجا که همه پارامترهای طراحی شامل عدم قطعیت می‌شوند، ضروری است که نرم‌افزارها توانایی اعمال شرایط عدم قطعیت را به داده‌های ورودی خود داشته باشند(Clarke, 2001).

امروزه مدل‌های شهری سه بعدی معنایی استاندارد شده با فرمت CityGML در سطوح مختلف جزئیات در بسیاری از شهرهای جهان موجود است. این امر محققان و متخصصان را قادر می‌سازد تا رفتار فیزیکی ساختمان‌ها را با رویکردهای مدل‌سازی، شبیه‌سازی کنند تا بتوانند محاسبات نیاز انرژی ساختمان را در سطح شهر انجام دهند(Murshed et al, 2018).

۲-۳- تأثیر تنوع اقلیمی بر مدل‌سازی تقاضای انرژی شهری

تنوع اقلیمی یکی از عوامل کلیدی و تعیین‌کننده در مدل‌سازی تقاضای انرژی شهری است. ایران با داشتن گستره وسیع جغرافیایی، تفاوت‌های قابل‌توجه دمایی، رطوبتی و بارش، به چهار اقلیم اصلی تقسیم می‌شود: گرم و خشک، گرم و مرطوب، معتدل و مرطوب و سرد و کوهستانی. هر یک از این اقلیم‌ها، الگوهای مصرف انرژی متفاوتی ایجاد می‌نمایند که مستقیماً بر پارامترهای ورودی و نتایج شبیه‌سازی انرژی تأثیرگذار است.

در اقلیم‌های گرم و خشک، مانند فلات مرکزی، تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد، همراه با رطوبت پایین، نیاز عمده انرژی به سرمایش و تهویه طبیعی است و بهره‌گیری از تابش خورشیدی برای تولید انرژی تجدیدپذیر بسیار مؤثر است. در این مناطق، جرم حرارتی ساختمان‌ها، طراحی سایه‌اندازی و استفاده از مصالح با ظرفیت ذخیره حرارت بالا نقش حیاتی در کاهش مصرف انرژی دارند. اقلیم‌های گرم و مرطوب، همانند سواحل جنوبی کشور، با دمای بالا و رطوبت نسبی زیاد مشخص می‌شوند. در این مناطق، نه تنها نیاز به سرمایش غالب است، بلکه رطوبت‌زدایی نیز بخش مهمی از مصرف انرژی ساختمان را تشکیل می‌دهد. شبیه‌سازی انرژی در چنین اقلیم‌هایی باید اثرات رطوبت محیطی بر بار سرمایشی و کارایی سیستم‌های تهویه را در نظر گیرد تا نتایج دقیق و قابل اتکا ارائه شود. اقلیم معتدل و مرطوب، مانند سواحل دریای خزر، با تابستان‌های معتدل و بارندگی زیاد، تقاضای انرژی متعادل برای گرمایش و سرمایش ایجاد می‌کند. در این اقلیم، مدیریت تهویه و کنترل رطوبت در ساختمان‌ها اهمیت بیشتری دارد و شبیه‌سازی انرژی باید توانایی مدل‌سازی شرایط آب‌وهوایی متغیر و تأثیر بارش و رطوبت را داشته باشد. در اقلیم سرد و کوهستانی، همانند مناطق غرب و شمال‌غرب، بار گرمایشی غالب است و زمستان‌های طولانی و سرد باعث افزایش چشمگیر مصرف انرژی می‌شوند. مدل‌سازی انرژی در این مناطق نیازمند داده‌های دقیق حرارتی پوسته ساختمان، الگوهای استفاده از سیستم‌های گرمایشی و بهره‌گیری از تابش خورشید در زمستان است.

به‌طور کلی، توجه به تنوع اقلیمی در فرایند شبیه‌سازی انرژی شهری، به‌ویژه در استانداردهای مبتنی بر مدل‌های سه‌بعدی معنایی مانند CityGML، موجب افزایش دقت برآورد بارهای انرژی، بهینه‌سازی راهکارهای طراحی و ارائه سناریوهای قابل‌اعتماد برای سیاست‌گذاری می‌شود. بی‌توجهی به تفاوت‌های اقلیمی می‌تواند به خطاهای قابل‌توجه در پیش‌بینی نیازهای انرژی منجر گردد، زیرا بارهای گرمایشی و سرمایشی هر اقلیم در پاسخ به ورودی‌های زیست‌محیطی رفتار بسیار متفاوتی دارند. بنابراین، توسعه مدل‌های شبیه‌سازی انرژی شهری برای کشورهای با تنوع اقلیمی مانند ایران می‌بایست مبتنی بر داده‌های اقلیمی دقیق و رویکردهای تطبیقی باشد تا به نتایج قابل اتکا در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت انرژی منجر گردد.

۲-۳-۱- تأثیر تنوع اقلیمی بر پارامترهای ورودی UBEM

در شبیه‌سازی انرژی شهری، دقت نتایج به شدت به کیفیت و انطباق پارامترهای ورودی با شرایط اقلیمی بستگی دارد. در کشوری مانند ایران، که تنوع گسترده اقلیمی وجود دارد، پارامترهای کلیدی UBEM از جمله داده‌های آب‌وهوایی، ضرایب انتقال حرارت ساختمان و الگوهای مصرف انرژی، باید با ویژگی‌های هر اقلیم تطبیق داده شوند. داده‌های آب‌وهوایی شامل دمای هوا، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد، نقش مهمی در پیش‌بینی بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌ها دارند. در اقلیم گرم و خشک، تابستان‌های بسیار داغ و زمستان‌های سرد همراه با رطوبت پایین باعث افزایش بار سرمایشی می‌شود و در نتیجه داده‌های دقیق تابش و پروفیل دمایی شبانه‌روزی برای شبیه‌سازی ضروری است. در اقلیم گرم و مرطوب، علاوه بر سرمایش، بار رطوبت‌زدایی نیز اهمیت دارد و شبیه‌سازی انرژی باید اثر رطوبت بالا بر عملکرد سیستم‌های تهویه و بار سرمایشی را مدلسازی نماید. در اقلیم معتدل و مرطوب، با تابستان‌های معتدل و زمستان‌های خنک، مدل‌سازی باید کنترل تهویه، رطوبت و بار حرارتی متعادل را به‌طور همزمان لحاظ کند، در حالی‌که در اقلیم سرد و کوهستانی، زمستان‌های طولانی و سرد موجب افزایش بار گرمایشی می‌شوند و داده‌های دمای پایین و طول دوره‌های سرد باید دقیق وارد UBEM شوند.

ضرایب انتقال حرارت ساختمان(دیوار و پنجره، جرم حرارتی و سایه‌اندازی) نیز بسته به اقلیم تغییر می‌کنند. در مناطق گرم و خشک، جرم حرارتی بالا و سایه‌اندازی مؤثر برای کاهش بار سرمایشی اهمیت دارد، در حالی‌که در اقلیم سرد، عایق‌کاری قوی پوسته ساختمان و کاهش اتلاف حرارت برای کاهش بار گرمایشی حیاتی است. در مناطق مرطوب، کنترل رطوبت و نفوذ حرارت متوسط مورد توجه است تا عملکرد سیستم‌های تهویه بهینه شود.

الگوهای مصرف انرژی نیز با اقلیم تغییر می‌کند. در اقلیم‌های گرم و خشک و مرطوب، بار سرمایشی غالب است و در مناطق مرطوب بار رطوبت‌زدایی نیز بالا است. در اقلیم سرد، بار گرمایشی غالب بوده و فعالیت‌ها و استفاده از سیستم‌های گرمایش شب‌ها و در طول زمستان افزایش می‌یابد. در اقلیم معتدل، مصرف انرژی بین گرمایش و سرمایش تعادل دارد و شبیه‌سازی باید منعکس‌کننده این الگوهای ترکیبی باشد.

به‌طور خلاصه، برای دستیابی به شبیه‌سازی انرژی شهری دقیق و کاربردی در ایران، پارامترهای UBEM باید اقلیم‌محور و بومی‌سازی‌شده باشند؛ داده‌های آب‌وهوایی، ضرایب حرارتی و الگوهای مصرف انرژی باید با ویژگی‌های خاص هر اقلیم تطبیق داده شوند تا پیش‌بینی بارهای انرژی، طراحی راهکارهای بهینه و تصمیم‌گیری شهری دقیق و قابل اعتماد باشد.

۳- مواد و روش‌ها

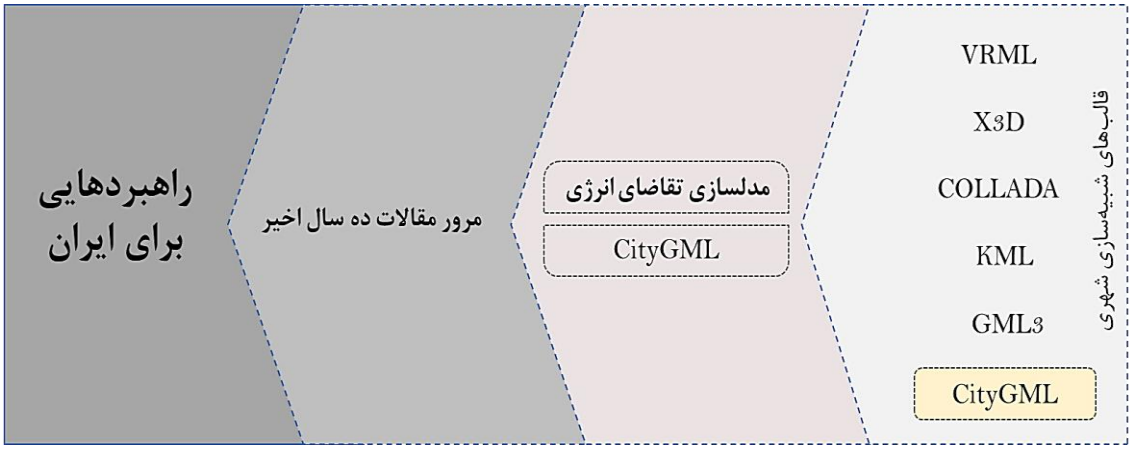
پژوهش حاضر به روش مرور نظام‌مند انجام شده و تمرکز آن بر مطالعات مرتبط با شبیه‌سازی شهری مبتنی بر CityGML در مدل‌سازی تقاضای انرژی، با تأکید ویژه بر انرژی خورشیدی در مقیاس شهری است. فرآیند گردآوری مقالات بر اساس جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های علمی معتبر شامل Scopus و ScienceDirect انجام گرفت. کلیدواژه‌های اصلی مورد استفاده شامل «Urban Simulation»، «Energy Demand Modeling»، «CityGML»، «Urban Energy» و «Solar Energy» و ترکیب‌های مختلف آن‌ها بود.

در مرحله نخست، حدود ۱۲۰ مقاله مرتبط شناسایی شد. سپس با اعمال معیارهای ورود شامل: (۱) انتشار در بازه زمانی ده سال اخیر، (۲) تمرکز بر شبیه‌سازی شهری یا مدل‌سازی انرژی ساختمان در مقیاس شهری، (۳) استفاده مستقیم یا غیرمستقیم از CityGML یا مدل‌های سه‌بعدی شهری سازگار با آن و (۴) نمایه‌شدن در پایگاه‌های معتبر علمی، تعداد مقالات به مجموعه نهایی

کاهش یافت. مقالاتی که صرفاً به مدل‌سازی تک‌بنا بدون ارتباط با ساختار شهری می‌پرداختند یا فاقد مؤلفه‌های مکانی و سه‌بعدی بودند، از فرآیند بررسی حذف شدند.

با توجه به فقدان پژوهش‌های داخلی در این حوزه، تمامی منابع مورد استفاده از مقالات انگلیسی زبان انتخاب شدند. در مرحله بعد، محتوای مقالات منتخب به‌صورت کیفی تحلیل شد و اطلاعات کلیدی شامل هدف پژوهش، مقیاس مطالعه، سطح جزئیات مدل سه‌بعدی (LoD)، نوع داده‌های ورودی، روش شبیه‌سازی انرژی و خروجی‌های اصلی استخراج گردید. بر اساس این داده‌ها، مطالعات در قالب دسته‌بندی‌های موضوعی (مدل‌سازی انرژی شهری، تولید مدل CityGML، تحلیل پتانسیل انرژی خورشیدی و کاربردهای برنامه‌ریزی شهری) سازمان‌دهی و در قالب جدول مقایسه‌ای خلاصه شدند.

در ادامه، با تحلیل تطبیقی نتایج، روندهای غالب پژوهشی، خلأهای موجود و قابلیت‌های عملیاتی CityGML در شبیه‌سازی انرژی شهری شناسایی شد. نهایتاً، با توجه به شرایط اقلیمی، ساختاری و محدودیت‌های داده‌ای ایران، درس‌آموخته‌های حاصل از مرور مطالعات به راهبردهایی بومی برای مدیریت تقاضای انرژی شهری تبدیل گردید.



شکل ۴- مدل مفهومی پژوهش

۴- نتایج و بحث

در بخش یافته‌های پژوهش، ابتدا به مرور مطالعات منتخب که در شکل شماره ۵ معرفی شده‌اند، پرداخته شده و در ادامه، خلاصه‌ای از اهداف، کاربردها و نتایج این مقالات در جدول شماره ۴ ارائه شده است تا جمع‌بندی جامع و فشرده‌ای از مرور نظام‌مند مطالعات در دسترس قرار گیرد.

شکل ۵- مطالعات منتخب مرتبط با شبیه‌سازی شهری به منظور مدلسازی تقاضای انرژی با استفاده از CityGML

استژالکا و همکاران(۲۰۱۲) نشان می‌دهند که ادغام مدل‌های شهر سه‌بعدی با شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک، امکان تحلیل یکپارچه پتانسیل تولید انرژی خورشیدی و الگوی مصرف برق در مقیاس شهری را فراهم می‌سازد. این رویکرد برای شهرهای ایران، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک و نیمه‌خشک که از تابش خورشیدی بالایی برخوردارند، قابلیت اقتباس بالایی دارد؛ با این حال، مطالعات داخلی عمدتاً به تحلیل‌های منفرد در مقیاس ساختمان محدود مانده و کمتر به شبیه‌سازی یکپارچه در سطح محله و شهر پرداخته‌اند.

استفاده از مدل بلوکی ساده با سطح جزئیات LOD1 برای تحلیل سایه‌اندازی و برآورد تولید انرژی فتوولتائیک نشان می‌دهد که حتی با داده‌های نسبتاً ساده نیز می‌توان به نتایج قابل اتکا دست یافت. این موضوع برای ایران اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا در بسیاری از شهرهای کشور دسترسی به مدل‌های دقیق سه‌بعدی شهری محدود است و استفاده از مدل‌های ساده‌تر می‌تواند مسیر عملی‌تری برای توسعه شبیه‌سازی انرژی شهری فراهم کند.

همچنین، طبقه‌بندی سقف‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و بر پایه داده‌های اسکنر لیزری، الگویی مؤثر برای شناسایی بام‌های مناسب و نامناسب جهت نصب سیستم‌های فتوولتائیک ارائه می‌دهد. به‌کارگیری این رویکرد در شهرهای ایران می‌تواند به عنوان ابزاری پشتیبان برای تصمیم‌گیری مدیریت شهری و تدوین سیاست‌های تشویقی هدفمند در زمینه توسعه انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد، هرچند محدودیت دسترسی به داده‌های LiDAR در بسیاری از شهرها، ضرورت بهره‌گیری از داده‌های جایگزین را برجسته می‌سازد.

در نهایت، معرفی مفهوم استفاده از مدل‌های شهر سه‌بعدی برای محاسبه اثرات سایه در تحلیل پتانسیل خورشیدی، چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی استقرار فتوولتائیک در مقیاس شهری ارائه می‌نماید. این تجربه نشان می‌دهد که گذار از نگاه پروژه‌محور به

رویکردی فضامحور و سیستمی در برنامه‌ریزی انرژی شهری، می‌تواند برای ایران نیز الهام‌بخش باشد و زمینه تدوین سیاست‌های مکانی‌محور انرژی و حرکت به سوی توسعه پایدار شهری را فراهم آورد.

پژوهش آگوگیارو(۲۰۱۵) به توسعه و پیاده‌سازی ابزارهای تخمین عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی در مقیاس شهری پرداخته است. پروژه BEnerCity بر دو هدف اصلی استوار است: نخست، ایجاد یک مدل شهر سه‌بعدی معنایی مطابق با استاندارد CityGML با استفاده از داده‌های نیمه‌بهینه، و دوم، توسعه یک ابزار محاسباتی برای برآورد تقاضای انرژی تمامی ساختمان‌های مسکونی به منظور تولید نقشه انرژی شهری. بخشی از شهر ترنتو به عنوان منطقه مطالعه انتخاب شد و نتایج نشان داد که استخراج مدل‌های سه‌بعدی نسبتاً دقیق ساختمان‌ها از داده‌های موجود امکان‌پذیر است، هرچند محدودیت‌هایی نظیر وضوح پایین مدل سطح دیجیتال (DSM) و ناهماهنگی داده‌های کاداستر نیاز به ویرایش دستی داشته است. با این حال، استفاده از تصاویر هوایی با وضوح بالا و تولید ابرنقاط فتوگرامتری، امکان بهبود کیفیت مدل‌ها را فراهم ساخته است. گردش‌کار پروژه به گونه‌ای طراحی شده که قابلیت تعمیم به کل شهر را داشته باشد و بر داده‌های در دسترس عموم تکیه دارد. فرآیند ادغام داده‌های ناهمگن شامل کاداستر، آمار و منابع مکانی، افزونگی را کاهش داده و کیفیت داده‌ها را بهبود می‌بخشد. مدل شهر سه‌بعدی معنایی به عنوان ورودی اصلی برای برآورد تقاضای انرژی گرمایش فضا و تولید آب گرم خانگی استفاده شد. ساختمان‌ها بر اساس معیارهای BTabula طبقه‌بندی شده و شاخص‌های عملکرد انرژی مطابق استانداردهای ملی ایتالیا محاسبه شدند. امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف بازسازی، چه در مقیاس ساختمان منفرد و چه در سطح کل شهر، به صورت عددی و گرافیکی فراهم شد.

این پژوهش نشان می‌دهد که حتی با داده‌های نیمه‌بهینه و پراکنده، می‌توان چارچوب عملی برای تخمین انرژی ساختمان‌ها در مقیاس شهری ایجاد نمود. برای ایران، به‌ویژه شهرهای واقع در اقلیم‌های سرد و معتدل که بخش قابل توجهی از مصرف انرژی ساختمان‌ها به گرمایش فضا و آب گرم خانگی اختصاص دارد، این رویکرد می‌تواند مبنایی برای تعریف سناریوهای بازسازی انرژی‌محور و سیاست‌گذاری هدفمند در سطح محله و شهر فراهم آورد. استفاده از مدل‌های سه‌بعدی معنایی مبتنی بر CityGML، علاوه بر یکپارچه‌سازی داده‌های پراکنده، امکان تولید نقشه‌های انرژی شهری و پشتیبانی از تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی شهری و مدیریت تقاضای انرژی را فراهم می‌کند.

ساران و همکاران(۲۰۱۵) چارچوبی مبتنی بر مدل‌سازی شهر سه‌بعدی ارائه کردند که هدف آن ارزیابی پتانسیل تولید انرژی خورشیدی حرارتی و فتوولتائیک در سطح ساختمان است و قابلیت تعمیم به مقیاس محله و شهر را دارد. این رویکرد به‌ویژه برای شهرهای ایران که ارزیابی نظام‌مند انرژی فراتر از ساختمان منفرد کمتر انجام شده، اهمیت دارد. پژوهش مذکور نمایه CityGML را معرفی می‌کند که امکان غنی‌سازی با داده‌های شبیه‌سازی انرژی شهری و توسعه افزونه Energy ADE را فراهم می‌آورد. تبدیل مدل‌های سه‌بعدی اولیه به مدل‌های معنایی و تعاملی، پیوند میان مدل‌سازی هندسی و تحلیل عملکرد انرژی را تقویت می‌کند و می‌تواند خلأ موجود در برنامه‌ریزی انرژی شهری ایران را کاهش دهد.

یافته‌ها نشان می‌دهد که داده‌های برداشت میدانی دقیق، به‌ویژه اندازه‌گیری ابعاد و موقعیت عناصر ساختمانی، امکان تحلیل‌های انرژی با دقت بالا را فراهم می‌کند. این سطح از دقت برای شهرهای متراکم، تاریخی و ناهمگون ایران در تحلیل تابش خورشیدی و سایه‌اندازی بسیار مؤثر است. همچنین، ارائه نتایج در محیط‌های مبتنی بر وب، دسترسی آسان مدیران شهری و ذی‌نفعان به داده‌ها را فراهم می‌آورد و می‌تواند شفافیت و هماهنگی میان نهادها را ارتقا دهد. در ادامه، استفاده از زبان محیط شبیه‌سازی یکپارچه INSEL به‌عنوان بستری برای مدل‌سازی دینامیک انرژی ساختمان معرفی شد که امکان شبیه‌سازی سناریوهای خورشیدی و حرارتی پیچیده و برآورد دقیق عرضه و تقاضای انرژی را فراهم می‌کند. اعتبارسنجی نتایج با داده‌های میدانی، اطمینان علمی لازم برای تصمیم‌گیری کلان برنامه‌ریزی انرژی شهری را تأمین می‌کند.

به طور کلی، این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌های شهر سه‌بعدی معنایی مبتنی بر CityGML با شبیه‌سازی‌های دینامیک انرژی و ارائه نتایج تعاملی، چارچوبی کارآمد و قابل اقتباس برای توسعه استراتژی‌های حفاظت و مدیریت انرژی شهری در ایران ایجاد می‌کند. این رویکرد، در شرایط ایران که فاصله معناداری میان مطالعات نظری و داده‌های واقعی مصرف انرژی وجود دارد، می‌تواند به افزایش قابلیت اتکای مدل‌های شبیه‌سازی انرژی شهری منجر شود.

رودریگز و همکاران(۲۰۱۷) امکان کمی‌سازی هم‌زمان تقاضای انرژی و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را برای مجموعه بزرگی از ساختمان‌ها با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی شهری و شبیه‌سازی انرژی بررسی کردند. هدف اصلی، تعیین پتانسیل فتوولتائیک شهری

و منطقه‌ای بر اساس استاندارد CityGML است؛ رویکردی که برای شهرهای با ساختار کالبدی پیچیده، از جمله شهرهای ایران، کاربردی است.

در این مطالعه، پلتفرم SimStadt برای محاسبه پتانسیل فتوولتائیک شهرستان لودویگزبورگ در آلمان به کار گرفته شد؛ هر ساختمان جداگانه شبیه‌سازی شد و پتانسیل فنی و اقتصادی سیستم‌های PV با در نظر گرفتن مساحت سقف‌ها، تابش خورشیدی و سناریوهای بازده محاسبه شد. این فرآیند امکان تعیین سهم قابل پوشش از تقاضای برق، شناسایی مکان‌های بهینه نصب و ارزیابی سودآوری سرمایه‌گذاری را فراهم کرد. استفاده از مدل‌های سه‌بعدی CityGML، تحلیل دقیق سقف‌ها، شبیه‌سازی تابش خورشیدی و اعمال ضرایب کاهش ویژه هر ساختمان، دقت بالایی در برآورد بازده انرژی ارائه می‌دهد. توسعه سناریوها و محاسبات اقتصادی نیز امکان برنامه‌ریزی و مدیریت انرژی شهری و منطقه‌ای را به‌طور واقعی فراهم می‌سازد.

نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های فتوولتائیک، به عنوان راهبردی کلیدی برای پایداری زیست‌محیطی و بهره‌وری اقتصادی، با حمایت مدل‌های سه‌بعدی شهری، قابلیت شناسایی ظرفیت‌های مغفول و برنامه‌ریزی دقیق توسعه در مقیاس شهری و منطقه‌ای را دارند. این چارچوب برای ایران، با توجه به افزایش تقاضای انرژی و ضرورت گذار به انرژی‌های پاک، الگویی قابل اقتباس برای طراحی سیاست‌ها و ابزارهای شبیه‌سازی انرژی فراهم می‌آورد.

دِ یاگر و همکاران (۲۰۱۸) قابلیت استفاده از داده‌های GIS برای شبیه‌سازی انرژی ناحیه‌ای و تأثیر سطح جزئیات هندسی ساختمان‌ها بر نتایج را بررسی نمودند. پنج مدل با سطوح جزئیات LOD1 و LOD2 مورد مطالعه قرار گرفت و با مدل مرجع LOD2 مقایسه شد. نتایج نشان داد که داده‌های GIS، حتی با محدودیت‌های ارتفاعی و ناهمگنی، امکان نمایش دقیق ابعاد فضایی و لحاظ کردن تنوع ساختمان‌ها را فراهم می‌کنند، به طوری که تغییرات شاخص‌های انرژی برای گرمایش فضا حدود ۲۸ درصد بود.

برای کاهش زمان شبیه‌سازی، ساده‌سازی هندسه ساختمان‌ها از طریق گروه‌بندی دیوارها و سقف‌ها در چند جهت پیشنهادی شد. این روش زمان محاسبات را تا بیش از ۷۰ درصد کاهش داد، در حالی که دقت برآورد تقاضای انرژی تقریباً حفظ شد و منحنی‌های مدت بار مشابه مدل مرجع بود. در میان مدل‌های LOD1، مدل‌های نیمه‌سقف نسبت به مدل‌های رج، با توجه به دسترسی به داده‌های ارتفاعی محدود و دقت مناسب‌تر، گزینه عملی‌تری هستند، اگرچه تمایل به دست‌کم‌گرفتن مساحت سقف و بیش‌برآورد دیوارها وجود دارد.

به طور کلی، تجمیع اجزای دیوار و سقف در جهت‌های محدود، کاهش قابل توجه زمان شبیه‌سازی را بدون افت دقت فراهم می‌نماید. با این حال، خطاهای ناشی از سطح جزئیات هندسی باید هنگام تفسیر نتایج شبیه‌سازی انرژی ناحیه‌ای مورد توجه قرار گیرد. این یافته‌ها برای شهرهای ایران، با محدودیت داده‌های سه‌بعدی دقیق، اهمیت عملی بالایی دارد و بر ضرورت انتخاب آگاهانه سطح جزئیات متناسب با کیفیت داده‌ها تأکید می‌کند.

اگوسکیزا و همکاران(۲۰۱۸) روشی را توصیف می‌کنند که از تصمیم‌گیری در مورد مناسب بودن اقدامات حفاظت از انرژی در مناطق تاریخی در مراحل اولیه پشتیبانی می‌کند. این روش بهبود عملکرد انرژی ساختمان ها را به عنوان یک تاثیر مثبت، متعادل با اثرات منفی که اجرای اقدامات حفاظت از انرژی می‌تواند ایجاد کند، در نظر می‌گیرد. یک مدل شهری مبتنی بر CityGML امکان اتوماسیون ارزیابی چند مقیاسی را برای اقدامات حفاظت از انرژی مختلف و کاهش احتمالی تقاضای انرژی جهانی را فراهم می‌کند. هدف نویسندگان توسعه یک روش ارزیابی متناسب در مراحل اولیه (ESSA) است که امکان‌سنجی و ارزیابی مناسب اقدامات حفاظت از انرژی را در سطح شهری در مناطق شهری تاریخی با استفاده از داده‌های باز یا منابع عمومی تسهیل می‌کند. یک مدل چند مقیاسی مبتنی بر CityGML برای ساختار دادن اطلاعات لازم برای ارزیابی اثرات منفی و مثبت در سطح شهری هر اقدام حفاظت از انرژی و کاربرد آن‌ها استفاده می‌شود.

در این روش عناصر دارای ارزش میراثی شهرها به هفت دسته تقسیم بندی می‌شوند و فرآیند آن در سه مرحله‌ی اصلی انجام می‌شود: اول محاسبه اهمیت میراث و اثرات مثبت و منفی در سطوح اجزا و ساختمان، دوم محاسبه ارزیابی تأثیر میراث برای همه موارد ساختمان‌ها در منطقه، سوم ارزیابی نهایی مناسب بودن هر اقدام حفاظت از انرژی که در آن شاخص ارزیابی تأثیر میراث متعادل با قابلیت کاربردی و امکان‌سنجی اقتصادی مقایسه می‌شود.

لزوم ارتقاء عملکرد انرژی در ساختمان‌های قرارگرفته در محله‌های با ارزش تاریخی و میراثی، مصرف بهینه، پایداری اقتصادی و زیست محیطی، و تأمین آسایش ساکنان، نیازمند اتخاذ تصمیمات کلان در مقیاس محله‌های تاریخی است. اهداف اقتصادی کلان، با

کنار گذاشتن فرآیندهای طولانی و پرهزینه، از طریق مدل‌های سه بعدی شهری، ابزارهای تصمیم‌گیری سریع و تحلیل‌های عمیق‌تر را جایگزین روش‌های قدیمی می‌کند. به این ترتیب از طرفی نیازهای اجتماعی و فرهنگی شهر، با حفظ بناهای تاریخی و از طرف دیگر، نیازهای زیست‌محیطی با مصرف بهینه‌ی انرژی به خوبی پاسخ داده می‌شوند.

بر این اساس، روش پیشنهادی اگوسکیزا و همکاران، الگویی قابل‌توجه برای مدیریت هم‌زمان ملاحظات فرهنگی، اجتماعی و زیست‌محیطی در بافت‌های تاریخی ارائه می‌دهد. این رویکرد نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با بهره‌گیری از مدل‌های شهری سه‌بعدی، از یک‌سو حفاظت از بناها و ارزش‌های میراثی را تضمین کرد و از سوی دیگر، به بهبود عملکرد انرژی و کاهش مصرف در مقیاس شهری دست یافت؛ مسأله‌ای که در بافت‌های تاریخی شهرهای ایران، با توجه به فشارهای فزاینده انرژی و حساسیت بالای ارزش‌های کالبدی و فرهنگی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پایهو و همکاران(۲۰۱۹) روشی منطقه‌ای برای تحلیل نوسازی ساختمان‌ها از نظر انرژی معرفی نمودند که شبیه‌سازی انرژی، مدل‌سازی سه‌بعدی و تجسم داده‌ها را به‌صورت یکپارچه ترکیب می‌کند. استاندارد CityGML به‌عنوان چارچوب ذخیره داده‌های ساختمان‌ها، شامل هندسه، سال ساخت، نوع ساختمان و مشخصات تجهیزات گرمایشی، به‌همراه داده‌های آب و هوا، استفاده شد. داده‌ها از طریق واردکننده جاوا پردازش شده و برای ایجاد مدل انرژی، شبیه‌سازی و بلوک‌های سه‌بعدی معنایی آماده می‌شوند، به‌طوری که امکان تحلیل و تجسم همزمان نتایج برای تصمیم‌گیرندگان فراهم گردد.

موتور شبیه‌سازی انرژی این روش، نرم‌افزار Apros است و ویژگی‌های ساختمان مانند مقادیر U، بهره تهویه و بازده بازیابی گرما، همراه با پروفایل مصرف برق و آب گرم، در پایگاه داده ذخیره و برای تحلیل‌ها استفاده می‌شوند. روش در یک منطقه شهری فنلاند آزمایش شد و شش سناریوی واقعی بازسازی با شاخص‌های هزینه عملیاتی، مصرف انرژی و انتشار CO_2 مقایسه گردید؛ نتایج نشان داد که سناریوهای متفاوت اثرات گوناگون دارند و امکان بررسی جایگزین‌ها را فراهم می‌کنند.

این چارچوب، با قابلیت بازتولید و گسترش تحلیل، برای ایران نیز کاربردی است؛ با توجه به محدودیت داده‌های ساختمانی و نیاز به بهینه‌سازی مصرف انرژی در شهرهای متوسط و بزرگ، استفاده از مدل‌های CityGML و شبیه‌سازی انرژی منطقه‌ای می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان امکان پیش‌بینی اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و مصرف انرژی نوسازی‌ها را بدون نیاز به بازدید میدانی گسترده فراهم آورد.

انگ و همکاران(۲۰۲۰) اشاره می‌کنند که در سال‌های اخیر، تحقیقات در زمینه انواع مختلف مدل‌های انرژی ساختمان‌های شهری به شدت افزایش یافته است و این روند منجر به ظهور مجموعه‌ای گسترده از ابزارها و تکنیک‌ها برای طراحی، ارزیابی و تغییر تعامل بین ساختمان‌ها و زیرساخت‌های انرژی در مقیاس بزرگ شده است. این پژوهش، نمای اجمالی از نقش‌های بالقوه فناوری‌های شبیه‌سازی انرژی شهری و ارتباط آن‌ها با برنامه‌های کاربردی مختلف و گروه‌های مختلف کاربران ارائه می‌دهد. افزون بر این، گسترش داده‌های باز و تمایل روزافزون شهرها به اشتراک‌گذاری داده‌ها، به‌عنوان عامل توانمندکننده‌ای برای توسعه این فناوری‌ها عمل می‌کند. بر این اساس، شهرداری‌ها، شرکت‌ها و مالکان ساختمان‌های آینده‌نگر در موقعیتی قرار دارند که می‌توانند از مزایای این روش‌ها به‌عنوان اولین ذینفعان بهره‌مند شوند.

در این زمینه، مدل‌سازی انرژی ساختمان شهری (UBEM) به‌عنوان یک رویکرد مبتنی بر فیزیک و از پایین به بالا برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی محله‌ها و شهرهای جدید یا موجود معرفی می‌شود. توسعه جریان‌های داده‌ای شهری قوی، که شامل داده‌های GIS، CityGML، تشخیص نور و محدوده، و پایگاه‌های داده ارزیاب مالیاتی است، امکان تولید پروفایل‌های مصنوعی تقاضای انرژی ساعتی برای ساختمان‌ها را در شرایط فعلی و سناریوهای آینده فراهم کرده است. بسته به دسترسی به داده‌های مصرف انرژی ساختمان‌های تاریخی و موجود، روش‌های مختلف مدل‌سازی، شبیه‌سازی و کالیبراسیون قابل اجرا هستند. این مقاله یک گردش کار تلفیقی UBEM را با تأکید بر داده‌ها و الزامات فرآیند کار ارائه می‌دهد و کاربردهای UBEM را در چهار دسته اصلی سازماندهی می‌کند: ۱) برنامه‌ریزی شهری و طراحی محله‌های جدید، ۲) استراتژی‌های کاهش کربن در سطح انبوه ساختمان‌ها، ۳) توصیه‌های فردی در سطح ساختمان، و ۴) ادغام ساختمان‌ها با شبکه انرژی. برای هر یک از این دسته‌ها، حداقل یک نمونه UBEM عملیاتی معرفی شده است که قابلیت استفاده در سناریوهای واقعی را دارد.

پیوند این پژوهش با شرایط ایران واضح است. با توجه به رشد سریع شهرنشینی، افزایش مصرف انرژی در ساختمان‌ها و فشار به کاهش انتشار کربن، اجرای رویکردهای UBEM می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران انرژی در ایران کمک کند تا:

برنامه‌های توسعه شهری و محله‌ای را با در نظر گرفتن مصرف انرژی بهینه طراحی کنند، سناریوهای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن را در مقیاس منطقه‌ای تحلیل کنند، توصیه‌های بهینه‌سازی انرژی را در سطح ساختمان ارائه دهند، و ادغام ساختمان‌ها با شبکه انرژی شهری را به صورت کارآمدتر مدیریت کنند. استفاده از داده‌های موجود GIS و CityGML، حتی در صورت محدودیت داده‌ای، امکان ایجاد مدل‌های کاربردی و شبیه‌سازی‌های دقیق برای تصمیم‌گیری استراتژیک و عملی در شهرهای ایرانی را فراهم می‌آورد.

مالهوترا و همکاران (۲۰۲۲) شبیه‌سازی انرژی ۵۰۰ ساختمان شهری را با استفاده از داده‌های منبع باز CityGML برای محاسبه تقاضای گرمایش انجام دادند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از ابزارهای TEASER و Dymola مبتنی بر Modelica و با رویکرد کهن‌الگو و غنی‌سازی آماری اجرا شد. نویسندگان اهمیت ویژگی‌های ساختمان مانند سال ساخت، کاربری و وضعیت نوسازی را در دقت شبیه‌سازی تحلیل کردند و نتایج را با داده‌های اندازه‌گیری و استاندارد TABULA مقایسه نمودند.

این مطالعه نشان داد که دسترسی به داده‌های دقیق ساختمان برای کاهش انحراف شبیه‌سازی‌ها از مقادیر واقعی و افزایش اعتبار مدل‌ها ضروری است. با داده‌های ناقص یا عمومی، انحراف‌ها قابل توجه است، اما استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری جزئی و پارامترهای ساختمانی (سال ساخت، نوسازی، کاربری) می‌تواند دقت شبیه‌سازی را بهبود بخشد و امکان بررسی سناریوهای مختلف نوسازی را فراهم کند. نویسندگان بر اهمیت گنجاندن این پارامترها در مجموعه‌های داده‌های باز تأکید کرده‌اند تا قابلیت کاربرد مدل‌های CityGML در شبیه‌سازی انرژی شهری ارتقاء یابد. نتایج نشان می‌دهد که حتی با داده‌های باز، شبیه‌سازی انرژی می‌تواند چارچوبی عملی ارائه دهد، اما افزودن اطلاعات جزئی و ویژگی‌های دقیق ساختمان، نقش کلیدی در افزایش دقت و اعتبار تحلیل‌های انرژی شهری دارد، موضوعی که برای برنامه‌ریزی انرژی در شهرهای ایران با محدودیت داده‌های واقعی بسیار مرتبط است.

جدول ۴- جمع‌بندی از مرور اهداف، کاربردها و نتایج مقالات منتخب

ردیف	عنوان مقاله	هدف	کاربرد CityGML	نتایج پژوهش	نویسندگان
۱	ادغام در مقیاس بزرگ فتوولتائیک در شهرها	شبیه سازی پتانسیل انرژی فتوولتائیک و مقایسه آن با مقادیر مصرف اندازه گیری شده برای به دست آوردن نسبت های مصرف خود در مناطق شهری	ارزیابی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک در محیط‌های شهری و مقایسه آن با مصرف برق کاربر ساختمان، از طریق مدل‌سازی هندسه سه‌بعدی به کمک CityGML و ترکیب آن با شبیه‌سازی سیستم فتوولتائیک	سیستم‌های فتوولتائیک می توانند ۳۵ درصد از کل برق مصرفی سه ماهه را تولیدکنند و نیمی از این برق تولیدی مستقیماً در ساختمان‌ها استفاده می‌شود.	Strzalka et al (2012)
۲	ابزارهای برنامه‌ریزی انرژی و مدل‌های شهر مجازی سه‌بعدی مبتنی بر CityGML تجربیات ترنتو ایتالیا	* ایجاد یک مدل شهری سه بعدی معنایی مطابق با استاندارد CityGML و شروع از مجموعه‌ای از داده‌های نیمه بهینه * توسعه برنامه‌ای برای تخمین عملکرد انرژی تمام ساختمان‌های مسکونی به منظور به دست آوردن نقشه انرژی در سطح شهر از محیط ساخته شده (مسکونی).	توسعه و اجرای ابزار تخمین عملکرد انرژی برای ساختمان‌های مسکونی در مقیاس شهر	مناسب بودن مدل‌های شهر سه بعدی معنایی را به عنوان مبنایی برای محاسبات تقاضای انرژی در سطح شهر از مقیاس ساختمان تا مقیاس های بزرگتر را ثابت کرده است.	Agugiaro (2015)

۳	CityGML در سطح معنایی برای استراتژی‌های حفاظت از انرژی شهری	ارائه چارچوبی برای ارزیابی پتانسیل تولید انرژی خورشیدی حرارتی و سیستم‌های فتوولتائیک در سطح ساختمان	غنی نمودن CityGML با داده‌های شبیه‌سازی انرژی شهری برای توسعه CityGMLEnergyADE. شبیه‌سازی سناریوهای پیچیده‌تر خورشیدی و حرارتی ساختمان برای ارائه مقادیر تقاضا و عرضه دقیق‌تر انرژی.	ارائه تکنیکی برای تبدیل Native3Dmodel به مدل سه‌بعدی معنایی تعاملی.	Saran et al (2015)
۴	ارزیابی پتانسیل فتوولتائیک در سطح شهری بر اساس مدل‌های شهر سه‌بعدی: مطالعه‌موردی و رویکرد روش‌شناختی جدید	تعیین پتانسیل فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس شهری و منطقه‌ای با استفاده از توضیحات هندسه CityGML هر ساختمان	کمّی کردن تقاضای انرژی و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را برای مجموعه بسیار بزرگی از ساختمان‌ها، با استفاده از مدل‌های سه بعدی شهری در CityGML.	می‌توان برای برخی از سناریوهای در نظر گرفته شده به نرخ‌های بالای سالانه تقاضای برق تحت پوشش در چندین شهرداری دست یافت که در برخی موارد به بیش از ۱۰۰ درصد می‌رسد. استفاده از تمام فضای سقف موجود (پتانسیل فنی) می تواند ۷۷ درصد از برق مصرفی منطقه و ۵۶ درصد را به عنوان یک پتانسیل اقتصادی با در نظر گرفتن سقف‌های تابش بالا پوشش دهد.	Rodríguez et al (2017)
۵	تأثیر توصیف هندسه ساختمان در شبیه‌سازی انرژی منطقه	ارزیابی قابلیت استفاده از GIS به عنوان منبع داده ورودی و افزایش آگاهی از خطای ناشی از یک نمایش هندسی و تأثیر این خطا بر نتایج شبیه‌سازی انرژی ناحیه	شبیه‌سازی انرژی منطقه با استفاده از مدل اطلاعات جغرافیایی	* تجمع اجزای دیوار و سقف در جهت‌های محدود، زمان شبیه سازی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و در عین حال دقت را حفظ می‌کند. * مدل‌های اطلاعات جغرافیایی حاوی مقدار قابل توجهی از داده‌های مفید هستند، اما خطای ناشی از سطح جزئیات مستقر شده باید هنگام ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در نظر گرفته شود.	De Jaeger et al (2018)
۶	مدل‌های داده شهری چند مقیاسی برای ارزیابی تناسب	توصیف روشی که از تصمیم‌گیری در مورد مناسب بودن اقدامات حفاظت از انرژی	پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مورد مناسب بودن اقدامات حفاظت از انرژی (ECM) در مناطق تاریخی در مراحل	معرفی روش ESSA برای ارزیابی مناسب بودن مراحل اولیه اقدامات حفاظت از انرژی در سطح	Egusquiza et al (2018)

	مراحل اولیه اقدامات حفاظت از انرژی در مناطق شهری تاریخی	(ECM) در مناطق تاریخی در مراحل اولیه پشتیبانی کند	اولیه با کمک یک مدل چند مقیاسی مبتنی بر CityGML برای ساختار دادن اطلاعات.	شهری تاریخی بر اساس اجرای چند مقیاسی مفهوم ارزیابی تأثیر میراث؛ در منطقه مورد مطالعه سانتیاگو د کامپوستلا نتایج عددی را نشان می‌دهد که امکان مقایسه استراتژی‌های مختلف نوسازی قابل اجرا در منطقه شهری تاریخی را فراهم می‌کند.	
۷	یک روش جدید برای ارزیابی نوسازی با انرژی کارآمد ساختمان‌ها در مقیاس منطقه‌ای	معرفی یک روش در مقیاس منطقه ای برای تجزیه و تحلیل نوسازی ساختمان‌ها از نظر انرژی کارآمد	تجزیه و تحلیل نوسازی ساختمان ها از نظر انرژی کارآمد از طریق مدل سازی داده های سه بعدی و تجسم به کمک CityGML	ارائه‌ی یک روش به عنوان مبنایی امیدوارکننده برای ارزیابی جایگزین‌های نوسازی انرژی در مقیاس منطقه.	Paiho et al (2019)
۸	از مفهوم تا کاربرد: مروری بر موارد استفاده در مدل‌سازی انرژی ساختمان شهری	ارائه یک نمای اجمالی از نقش‌های بالقوه‌ای که فناوری‌های مختلف مدل‌های انرژی ساختمان شهری ممکن است در آینده ایفا کنند و مشخص کردن اینکه کدام تکنیک برای کدام برنامه و گروه(های کاربر) مناسب‌تر است.	مدل‌سازی انرژی ساختمان شهری (UBEM) یک رویکرد مبتنی بر فیزیک از پایین به بالا برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی محله‌ها و شهرهای جدید یا موجود به کمک CityGML	یک گردش کار تلفیقی UBEM با داده ها و الزامات فرآیند کار را ارائه می دهد و پیشنهادات UBEM را در چهار دسته کاربردی اصلی سازماندهی می کند: برنامه ریزی شهری و طراحی محله جدید، استراتژی های کاهش کربن در سطح انبار، توصیه های فردی در سطح ساختمان، و ادغام ساختمان به شبکه. این پژوهش، برای هر برنامه، یک حداقل UBEM قابل استفاده را معرفی می‌کند.	Ang et al (2020)
۹	شبیه‌سازی انرژی شهری با استفاده از مدل باز CityGML یک تحلیل مقایسه‌ای	شبیه سازی ۵۰۰ مدل ساختمان منبع باز CityGML برای محاسبه تقاضای گرمایش	تجزیه و تحلیل با استفاده از مجموعه داده های منبع باز CityGML برای یک منطقه شهری متشکل از ۵۰۰ ساختمان و کمی سازی انحرافات بین نتایج شبیه سازی و داده های مرجع	مجموعه داده‌های باز واقعاً مهم هستند، با این حال، برای شبیه‌سازی عملکرد انرژی، ویژگی‌هایی مانند سال‌های ساخت، کاربری‌های ساختمان و وضعیت‌های نوسازی ضروری هستند و باید در مجموعه داده‌های باز گنجانده شوند تا ارزش افزوده ارائه شود.	Malhotra et al (2022)

۴-۱- راهبردهای کاربردی برای مدیریت تقاضای انرژی شهری در ایران با لحاظ اقلیم‌های چهارگانه

بر اساس تحلیل تطبیقی مطالعات مرورشده، مدل‌های سه‌بعدی معنایی مبتنی بر CityGML در ترکیب با داده‌های ساختمانی و انرژی، نقش کلیدی در کمّی‌سازی تقاضای انرژی، شبیه‌سازی مصرف، ارزیابی پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر و پشتیبانی تصمیم‌گیری شهری ایفا می‌کنند. تجربه شهرهای اروپایی نشان می‌دهد که این رویکرد، ضمن افزایش دقت تحلیل‌ها، امکان طراحی سناریوهای مقرون‌به‌صرفه کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن را فراهم می‌سازد. با توجه به تنوع اقلیمی ایران، راهبردهای اجرایی باید ویژگی‌های خاص هر اقلیم را در نظر بگیرند تا UBEM و مدل‌های شبیه‌سازی انرژی شهری واقع‌بینانه و کاربردی باشند. بر این اساس، راهبردهای پیشنهادی عبارتند از:

۱. تهیه مدل سه‌بعدی شهرهای دارای بیشترین روزهای آفتابی کشور بر اساس استاندارد CityGML:

این راهبرد با هدف تحلیل پتانسیل فتوولتائیک شهری پیشنهاد می‌شود و می‌تواند مبنایی برای تولید برق محلی، کاهش فشار بر شبکه سراسری و برنامه‌ریزی هدفمند نصب سامانه‌های خورشیدی فراهم آورد. مطالعات مرورشده نشان می‌دهد که نقشه‌های پتانسیل خورشیدی مبتنی بر CityGML ابزار مؤثری برای اولویت‌بندی ساختمان‌ها هستند. این راهبرد به‌ویژه برای اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب اهمیت دارد و امکان تحلیل پتانسیل فتوولتائیک شهری و برنامه‌ریزی نصب سامانه‌های خورشیدی را فراهم می‌آورد.

۲. طراحی و توسعه مدل اطلاعات انرژی شهری مبتنی بر CityGML:

ایجاد یک چارچوب داده‌ای یکپارچه برای ثبت ویژگی‌های کالبدی و انرژی ساختمان‌ها، پیش‌نیاز تحلیل‌های مقیاس شهری است. این مدل می‌تواند به‌عنوان زیرساخت اقدامات حفاظت انرژی در شهر عمل نماید. ایجاد پایگاه داده یکپارچه شامل مشخصات کالبدی، وضعیت انرژی و ویژگی‌های اقلیمی ساختمان‌ها، امکان تحلیل مقیاس شهری، به‌روزرسانی تدریجی و تطبیق با شرایط چهار اقلیم ایران را فراهم می‌کند.

۳. به‌کارگیری مدل‌سازی انرژی ساختمان شهری (UBEM) به‌عنوان رویکرد پایین‌به‌بالا:

یافته‌ها نشان می‌دهد UBEM مبتنی بر CityGML قادر است عملکرد حرارتی محله‌ها و شهرهای موجود یا جدید را شبیه‌سازی کند. استفاده از این رویکرد در ایران می‌تواند ابزار مؤثری برای ارزیابی سناریوهای توسعه شهری و طراحی محله‌های کم‌مصرف باشد. در مناطق سرد و کوهستانی تمرکز بر بار گرمایشی و در مناطق مرطوب بر بار سرمایشی و رطوبت‌زدایی و در مناطق معتدل بر الگوی ترکیبی گرمایش و سرمایش است.

۴. تحلیل نوسازی انرژی‌کارآمد ساختمان‌ها با استفاده از داده‌های سه‌بعدی CityGML:

مدل‌های سه‌بعدی امکان ارزیابی اثر اقدامات بهسازی(مانند بهبود پوسته یا تعویض سامانه‌های تأسیساتی) را در مقیاس گسترده و براساس ویژگی‌های اقلیمی و کالبدی فراهم می‌کنند و می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری اقتصادی برای اولویت‌بندی پروژه‌های نوسازی باشند.

۵. ایجاد شبکه اطلاعات سه‌بعدی بناهای تاریخی مبتنی بر CityGML:

این راهبرد با هدف تلفیق حفاظت انرژی و حفاظت میراث پیشنهاد می‌شود و امکان ارزیابی مداخلات انرژی بدون آسیب به ارزش‌های فرهنگی را فراهم می‌کند؛ موضوعی که برای بافت‌های تاریخی ایران اهمیت ویژه دارد به‌ویژه در مناطقی که شرایط اقلیمی بر عملکرد حرارتی بنا تأثیرگذار است.

۶. پشتیبانی تصمیم‌گیری درباره اقدامات حفاظت انرژی (ECM) در مناطق تاریخی با مدل چندمقیاسی CityGML:

مطالعات نشان می‌دهد مدل‌های چندمقیاسی CityGML می‌توانند داده‌های کالبدی، انرژی و میراثی را با ویژگی‌های اقلیمی ادغام کرده و انتخاب سناریوهای مناسب را تسهیل نمایند.

۷. توسعه ابزار تخمین عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی در مقیاس شهر:

ایجاد این ابزارها بر پایه استاندارد CityGML امکان شکل‌گیری مدل شهری سه‌بعدی معنایی را فراهم کرده و دقت برآورد مصرف انرژی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و نقشه‌های انرژی شهری را به‌طور اقلیم‌محور تولید می‌نمایند.

۸. تدوین برنامه تخمین عملکرد انرژی تمامی ساختمان‌های مسکونی و استخراج نقشه انرژی شهری:

نقشه انرژی محیط ساخته‌شده می‌تواند مناطق پرمصرف را مشخص کرده و مبنای سیاست‌های هدفمند یارانه، نوسازی و مدیریت تقاضا قرار گیرد.

۹. ارائه چارچوب ارزیابی پتانسیل سامانه‌های خورشیدی حرارتی و فتوولتائیک در مقیاس ساختمان و محله:

این چارچوب، امکان مقایسه سناریوهای مختلف تولید انرژی تجدیدپذیر را فراهم ساخته و به تدوین راهبردهای حفاظت انرژی شهری کمک می‌نماید. در نتیجه با ترکیب داده‌های تابش، سایه‌اندازی و ویژگی‌های اقلیمی هر اقلیم، امکان تحلیل سناریوهای مختلف تولید انرژی تجدیدپذیر و تدوین راهبردهای بهینه حفاظت انرژی را فراهم می‌آورد.

۱۰. استفاده از مدل‌های اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان داده ورودی شبیه‌سازی انرژی منطقه‌ای مبتنی بر CityGML:

این رویکرد، راهکاری عملی برای عبور از کمبود داده‌های سه‌بعدی در ایران بوده و امکان شروع تدریجی شبیه‌سازی انرژی شهری را با تطبیق با شرایط اقلیمی متفاوت ایران فراهم می‌سازد.

۱۱. توسعه مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک انرژی ساختمان برای برآورد دقیق‌تر تقاضا و عرضه انرژی:

ترکیب این مدل‌ها با CityGML امکان تحلیل سناریوهای پیچیده سامانه‌های خورشیدی و حرارتی را فراهم کرده و دقت پیش‌بینی‌ها را در مقیاس شهری افزایش می‌دهد.

مرور نظام‌مند مطالعات منتخب نشان داد که به‌کارگیری مدل‌های سه‌بعدی معنایی مبتنی بر CityGML، در ترکیب با مدل‌سازی انرژی ساختمان شهری (UBEM)، شبیه‌سازی‌های دینامیک انرژی و داده‌های GIS، بستری کارآمد برای تحلیل هم‌زمان تقاضای انرژی، پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر، سناریوهای نوسازی و اقدامات حفاظت از انرژی در مقیاس‌های مختلف شهری فراهم می‌کند. تجربیات کشورهای پیشرو، به‌ویژه آلمان، ایتالیا و فنلاند، حاکی از آن است که این رویکردها نه‌تنها امکان تولید نقشه‌های انرژی شهری و برآورد دقیق‌تر مصرف ساختمان‌ها را فراهم می‌آورند، بلکه به عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی شهری، سیاست‌های کاهش کربن و مدیریت دارایی‌های ساختمانی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در مقابل، در ایران فقدان مدل‌های سه‌بعدی یکپارچه شهری، نبود پایگاه داده معنایی ساختمان‌ها و پراکندگی اطلاعات انرژی، مانع اصلی استقرار چنین سامانه‌هایی به شمار می‌رود. از این رو، انتقال مستقیم تجارب بین‌المللی بدون بومی‌سازی نهادی و داده‌ای امکان‌پذیر نیست و نیازمند تدوین یک چارچوب مرحله‌بندی‌شده متناسب با ظرفیت‌های فنی و ساختار حکمرانی شهری کشور است.

بر این اساس، با اتکا به یافته‌های مرور حاضر، مجموعه‌ای از راهبردهای عملیاتی استخراج شده‌اند که از تولید داده پایه (مدل سه‌بعدی CityGML)، تا توسعه ابزارهای شبیه‌سازی انرژی، تهیه نقشه‌های انرژی شهری، ارزیابی پتانسیل خورشیدی، تحلیل نوسازی انرژی‌کارآمد و حفاظت همزمان انرژی و میراث را در بر می‌گیرند. این راهبردها در قالب یک جدول سیاستی سامان‌دهی شده‌اند که ضمن حفظ پیوستگی با ادبیات پژوهش، مسیر گذار ایران از وضعیت داده‌محور محدود به سمت برنامه‌ریزی انرژی شهری مبتنی بر شبیه‌سازی را ترسیم می‌کند. جدول شماره ۵ چارچوب پیشنهادی را همراه با ابزارهای اجرایی، خروجی‌های مورد انتظار، افق زمانی و نهادهای مسئول ارائه می‌دهد.

جدول ۵- چارچوب سیاستی پیشنهادی برای پیاده‌سازی شبیه‌سازی انرژی شهری مبتنی بر CityGML در ایران

ردیف	راهبرد	ابزار اجرایی	خروجی مورد انتظار	افق اجرا	نهادهای مسئول پیشنهادی
۱	تهیه مدل سه‌بعدی شهرهای آفتابی مبتنی بر CityGML	برداشتGIS ، تصاویر ماهواره‌ای، تولید LoD1–2	نقشه پتانسیل فتوولتائیک شهری	میان‌مدت	شهرداری‌ها، سازمان نقشه‌برداری، وزارت نیرو
۲	توسعه مدل اطلاعات انرژی شهری	طراحی پایگاه داده CityGML Energy ADE	بانک اطلاعات انرژی ساختمان‌ها	میان‌مدت	وزارت راه و شهرسازی، مرکز آمار
۳	پیاده‌سازی UBEM در محله‌ها	مدل‌سازی پایین‌به‌بالا، موتورهای شبیه‌سازی انرژی	پیش‌بینی تقاضای انرژی محله‌ای	میان‌مدت	دانشگاه‌ها، شهرداری
۴	تحلیل نوسازی انرژی‌کارآمد	شبیه‌سازی سناریوهای بهسازی	اولویت‌بندی ساختمان‌های هدف	کوتاه‌مدت	شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت

۵	مدل‌سازی سه‌بعدی بناهای تاریخی	اسکن لیزری، CityGML Heritage	پایگاه داده میراث– انرژی	بلندمدت	وزارت میراث فرهنگی
۶	ارزیابی ECM در بافت تاریخی	مدل چندمقیاسی CityGML	راهنمای مداخلات انرژی در بافت تاریخی	میان‌مدت	شهرداری مناطق تاریخی
۷	توسعه ابزار تخمین انرژی مسکن	مدل‌های آماری و دینامیک	مدل شهری سه‌بعدی معنایی	کوتاه‌مدت	دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان
۸	تهیه نقشه انرژی شهری	تجمیع خروجی UBEM	شناسایی لکه‌های پرمصرف	میان‌مدت	وزارت نیرو، شهرداری
۹	ارزیابی سامانه‌های خورشیدی	تحلیل سایه‌اندازی، تابش خورشید	چارچوب استقرار انرژی خورشیدی	کوتاه‌مدت	ساتبا، وزارت نیرو
۱۰	یکپارچه‌سازی GIS و CityGML	تبدیل داده‌های دوبعدی به سه‌بعدی	ورودی شبیه‌سازی منطقه‌ای	کوتاه‌مدت	سازمان نقشه‌برداری
۱۱	شبیه‌سازی دینامیک انرژی	مدل‌های پیشرفته حرارتی	برآورد دقیق عرضه و تقاضا	بلندمدت	پژوهشگاه نیرو

۵- نتیجه گیری

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت شهرها و افزایش مصرف انرژی، محدودیت منابع سوخت فسیلی و بحران‌های زیست‌محیطی، ضرورت توجه به مصرف انرژی در حوزه ساختمان و برنامه‌ریزی شهری را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این زمینه، شبیه‌سازی انرژی به دلیل کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در زمان و امکان ارزیابی سناریوهای مختلف، ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در بافت‌های شهری موجود و طراحی محله‌ها و شهرهای جدید محسوب می‌شود.

هدف اصلی شبیه‌سازی شهری، مدلسازی تقاضای انرژی با هدف تخمین دقیق مصرف، بهینه‌سازی میزان انرژی مصرفی و مدیریت منابع در بخش‌های شهری است. در این پژوهش، با مرور مطالعات انجام‌شده در ده سال اخیر، کاربرد CityGML در شبیه‌سازی انرژی شهری بررسی شد و یافته‌های کلیدی زیر حاصل گردید:

- کاربرد انرژی خورشیدی: استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک می‌تواند تا ۳۵ درصد از کل برق مصرفی سه‌ماهه شهری را تأمین کرده و نیمی از انرژی تولیدی به صورت مستقیم در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد.
- مدل‌های سه بعدی معنایی: مدل‌های شهر سه‌بعدی معنایی، ابزاری مناسب برای محاسبه تقاضای انرژی از سطح ساختمان تا مقیاس شهری هستند و امکان تحلیل دقیق مصرف و تولید انرژی را فراهم می‌کنند.
- استفاده بهینه از فضای سقف: بهره‌گیری کامل از فضای سقف‌ها می‌تواند ۷۷ درصد از برق مصرفی منطقه را پوشش دهد و ۵۶ درصد از آن به عنوان پتانسیل اقتصادی با در نظر گرفتن سقف‌های تابش بالا قابل استفاده است.
- ساده‌سازی اجزای ساختمانی: تجمیع اجزای دیوار و سقف در جهت‌های محدود، زمان شبیه‌سازی را به طور قابل توجهی کاهش داده و در عین حال دقت نتایج را حفظ می‌کند.
- خطای ناشی از سطح جزئیات: هنگام ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، باید به خطای ناشی از سطح جزئیات مستقر شده توجه شود تا تصمیم‌گیری‌ها مبتنی بر داده‌های دقیق باشد.
- حفاظت از محله‌های تاریخی: اتخاذ تصمیمات کلان در مقیاس محله‌های تاریخی برای ارتقاء عملکرد انرژی، مصرف بهینه، پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی و تأمین آسایش ساکنان، با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی شهری و ابزارهای تصمیم‌گیری سریع، امکان‌پذیر است.
- توازن نیازهای فرهنگی و زیست‌محیطی: مدل‌سازی سه‌بعدی شهری، امکان پاسخ‌گویی همزمان به نیازهای اجتماعی و فرهنگی (حفظ بناهای تاریخی) و نیازهای زیست‌محیطی (مصرف بهینه انرژی) را فراهم می‌آورد.
- یکپارچه‌سازی داده‌ها: استفاده همزمان از CityGML، پایگاه داده ساختمان و اطلاعات آب و هوا، امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی معنایی و شبیه‌سازی دقیق انرژی را فراهم می‌کند.

- مدل‌سازی انرژی شهری (UBEM): این رویکرد امکان برنامه‌ریزی شهری و طراحی محله‌های جدید، تدوین استراتژی‌های کاهش کربن، ارائه توصیه‌های فردی در سطح ساختمان و ادغام ساختمان‌ها با شبکه انرژی را فراهم می‌سازد.
- ضرورت داده‌های دقیق: برای شبیه‌سازی دقیق عملکرد انرژی، اطلاعاتی نظیر سال ساخت، کاربری ساختمان و وضعیت نوسازی ضروری است و باید در مجموعه داده‌ها گنجانده شود.
- پشتیبانی از تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی: مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک انرژی ساختمان، ابزار مناسبی برای ارائه مقادیر تقاضا و عرضه انرژی و ارزیابی سناریوهای پیچیده سیستم‌های خورشیدی و حرارتی هستند.

با توجه به اینکه میزان تقاضای انرژی در ایران اغلب از عرضه پیشی گرفته است، بهره‌گیری از یافته‌های این پژوهش می‌تواند راهبردهای مؤثری برای مدیریت انرژی ارائه دهد. از جمله این راهبردها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- توسعه و استفاده از مدل‌های سه‌بعدی شهری مبتنی بر استاندارد CityGML در شهرهای با بیشترین تابش خورشید برای تحلیل پتانسیل انرژی خورشیدی و تولید برق.
- ایجاد مدل اطلاعاتی مبتنی بر CityGML برای برنامه‌ریزی اقدامات حفاظت از انرژی در بافت‌های شهری و تاریخی.
- تهیه نقشه انرژی شهری و ارائه اطلاعات دقیق مصرف انرژی برای ساختمان‌های مسکونی و عمومی.
- استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک انرژی برای ارائه مقادیر تقاضا و عرضه دقیق انرژی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در سطح شهر و منطقه.

با لحاظ کردن تنوع اقلیمی ایران، مشخص شد که پارامترهای شبیه‌سازی انرژی باید متناسب با ویژگی‌های اقلیمی هر منطقه تنظیم شوند. در اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب، تأکید بر مدیریت بار سرمایشی و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی اهمیت دارد، در اقلیم سرد و کوهستانی تمرکز بر کاهش بار گرمایشی و عایق‌کاری ساختمان‌ها است و در اقلیم معتدل و مرطوب، الگوی مصرف انرژی ترکیبی و کنترل رطوبت و گرمایش/سرمایش باید مد نظر قرار گیرد. این تطبیق اقلیمی موجب افزایش دقت مدل‌سازی و قابلیت استفاده نتایج در برنامه‌ریزی شهری می‌شود. در مجموع، شبیه‌سازی انرژی شهری با بهره‌گیری از CityGML و مدل‌های سه‌بعدی معنایی، ابزار قدرتمندی برای مدیریت مصرف انرژی، ارتقاء بهره‌وری، برنامه‌ریزی پایدار و حمایت از تصمیم‌گیری‌های کلان در حوزه معماری و شهرسازی در ایران محسوب می‌شود.

۶- منابع

۱. خسروی کزازی، ع. و حسینعلی، ف. (۱۳۹۹). ارزیابی قابلیت داده های مکانی داوطلبانه در ایجاد منظر سه بعدی شهر. برنامه ریزی و آمایش فضا.

۲. میروهابی ، س. و عباسپور، ر. (۱۳۹۵). استخراج مدل CityGML ساختمان‌ها در سطح ۴ جزئیات از اطلاعات پایگاه داده داوطلبانه OSM. علوم و فنون نقشه برداری، دوره ششم، شماره ۱، ۱۸۵-۱۹۸.

۳. وکیلی نژاد، ر. (۱۳۹۸). بررسی ضرورت آموزش جامع شبیه سازی انرژی به دانشجویان کارشناسی ارشد معماری. فصلنامه آموزش مهندسی ایران، ۷۹-۱۰۰.

۴. یکتا، م. و گل افشان ، س. (۱۳۹۴). بررسی انواع شیوه های نوین شبیه سازی انرژی در حوزه طراحی شهری. کنفرانس و نمایشگاه بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی.

5. Jang, Y.-H., Park, S. l., Kwon, T. H., & Lee, S.-H. (2021). CityGML urban model generation using national public datasets for flood damage simulations: A case study in Korea. *Journal of Environmental Management*.
6. Murshed, S. M., Picard, S., & Koch, A. (2018). Modelling, Validation and Quantification of Climate and Other Sensitivities of Building Energy Model on 3D City Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*.
7. Agugiaro, G. (2015). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (Italy). *Appl Geomat*, 41-56.

8. Ang, Y. Q., Berzolla, Z. M., & Reinhart, C. F. (2020). From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling. *Applied Energy*.
9. Barnes , M., & Finch, E. L. (2008). *COLLADA – Digital Asset Schema Release 1.5.0.* Sony Computer Entertainment Inc.
10. Chen, Y., Hong, T., Luo, X., & Hooper, B. (2019). Development of city buildings dataset for urban building energy modeling. *Energy and Buildings*, 252-265.
11. Clarke, J. (2001). *Energy simulation in building design.* Butterworth-Heinemann.
12. Coors, V., & Zipf, A. (2007). MoNa 3D – mobile navigation using 3D city models. *4th International Symposium on LBS and Telecartography.* Hong Kong.
13. De Jaeger, I., Reynders, G., Ma, Y., & Saelens, D. (2018). Impact of building geometry description within district energy simulations. *Energy*, 1060-1069.
14. Egusquiza, A., Prieto, I., Izkara, J. L., & Béjar, R. (2018). Multi-scale urban data models for early-stage suitability assessment of energy conservation measures in historic urban areas. *Energy & Buildings*, 87-98.
15. Goetz, M., & Zipf , A. (2013). The Evolution of Geo-Crowdsourcing: Bringing Volunteered Geographic Information to the Third Dimension. In D. Sui, S. Elwood, & M. Goodchild, *Crowdsourcing Geographic Knowledge* (pp. 139-159). Springer, Dordrecht.
16. Hopfe, C. J. (2009). *Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization.* PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
17. Kolbe, T. H. (2019). *3D City Database for CityGML.* Chair of Geoinformatics, Technische Universität München.
18. Kolbe, T. H. (2009). Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In J. Lee , & S. Zlatanova, *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* (pp. 15-31). Springer, Berlin, Heidelberg.
19. Kolbe, T. H., Gröger, G., & Plümer, L. (2008). *CityGML – 3D city models and their potential for emergency response.*
20. Malhotra, A., Shamovich, M., Frisch, J., & van Treeck, C. (2022). Urban energy simulations using open CityGML models: A comparative analysis. *Energy & Buildings*.
21. Metral, C., Falquet, G., & Karatzas, K. (2012). Ontologies for the Integration of Air Quality Models and 3D City Models. *ArXiv*.
22. Paiho, S., Ketomäki, J., Kannari, L., Häkkinen, T., & Shemeikka, J. (2019). A new procedure for assessing the energy-efficient refurbishment of buildings on district scale. *Sustainable Cities and Society*.
23. Rodríguez, L. R., Duminil, E., Ramos, J. S., & Eicker, U. (2017). Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Solar Energy*, 264-275.
24. Saran, S., Wate, P., Srivastav, S. K., & Murthy, K. (2015). CityGML at semantic level for urban energy conservation strategies. *Annals of GIS*, 27-41.

25. Shiode, N. (2000). 3D urban models: Recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions. *GeoJournal*, 263-269.
26. Strzalka, A., Alam, N., Duminil, E., Coors, V., & Eicker, U. (2012). Large scale integration of photovoltaics in cities. *Applied Energy*, 413-421.
27. Zhu, W., Simons, A., Wursthorn, S., & Nichersu, A. (2016). Integration of CityGML and Air Quality Spatio-Temporal Data Series via OGC SOS. *Geospatial Sensor Webs Conference.*
28. E. Kamel, A.M. Memari, Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions, Autom. Constr. 97 (2019) 164–180.
29. J.-S. Chou, D.-K. Bui, Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design, Energy Build. 82 (2014) 437–446.
30. S. Seyedzadeh, F.P. Rahimian, I. Glesk, M. Roper, Machine learning for estimation of building energy consumption and performance: A Review,Visualiz. Eng. 6 (1) (2018) 1–20.
31. D.R. Wulfinghoff, V. Garg, V. Garg, J. Mathur, Energy Conservation Building Code tip sheet, 2009.
32. Seyedzadeh, F.P. Rahimian, I. Glesk, M. Roper, Machine learning for estimation of building energy consumption and performance: A Review, Visualiz. Eng. 6 (1) (2018) 1 20.
33. J.-S. Chou, D.-K. Bui, Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design, Energy Build. 82 (2014) 437–446.
34. E. Kamel, A.M. Memari, Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions, Autom. Constr. 97 (2019) 164–180.
35. D.R. Wulfinghoff, V. Garg, V. Garg, J. Mathur, Energy Conservation Building Code tip sheet, 2009.
36. A. Tulsyan, S. Dhaka, J. Mathur, J.V. Yadav, Potential of energy savings through implementation of Energy Conservation Building Code in Jaipur city, India, Energy Build. 58 (2013) 123–130.
37. D.G. Sanchez, B. Lacarrière, M. Musy, B. Bourges, Application of sensitivity analysis in building energy simulations: combining first-and second-order elementary effects methods, Energy Build. 68 (2014) 741–750.
38. R. Baetens, R. De Coninck, F. Jorissen, D. Picard, L. Helsen, D. Saelens, Openideas-an open framework for integrated district energy simulations, Build. Simul345–354 (2015).
39. D. Crawley, J. Hand, M. Kummert, B. Griffith, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, Build. Environ. 43 (2008) 661–673, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027.
40. G. Gröger, T.H. Kolbe, C. Nagel, K.-H. Häfele, OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version: 2.0.0, Tech. rep, Open Geospatial Consortium, OGC (2012) 12–019.
41. J. Benner, A. Geiger, G. Gröger, K.-H. Häfele, M. Löwner, Enhanced LoD concepts for virtual 3D city models, ISPRS Ann. Photogram., Remote Sens. Spatial Inform. Sci. 2 (2013) 51–61.

42. Sameer Saran, Parag Wate, S.K. Srivastav & Y.V.N. Krishna Murthy (2015) CityGML at semantic level for urban energy conservation strategies, Annals of GIS, 21:1, 27-41, DOI: 10.1080/19475683.2014.992370
43. N. Nurhasanah, The Effort of Germany on Addressing Climate Change Through Climate Action Plan 2050, Ph.D. thesis, University of Muhammadiyah Malang (2019).
44. J. Huang, Exploring Climate Framework Laws and The Future of Climate Action, Pace Environmental Law Review 38 (2) (2021) 285.
45. R. Kinley, M.Z. Cutajar, Y. de Boer, C. Figueres, Beyond good intentions, to urgent action: Former UNFCCC leaders take stock of thirty years of international climate change negotiations, Climate Policy 21 (5) (2021) 593–603.
46. S. Oberthür, C. Dupont, The European Union's international climate leadership: towards a grand climate strategy?, J Eur. Public Policy (2021) 1–20.
47. -Institute for Housing and Environment, TABULA WebTool (2017). URL: https://webtool.building-typology.eu/#bm.
48. -Remondino F, Poli D (2014) Back to the future: Il ritorno della fotogrammetria. GEOmedia 2014(2):6–8