Journal of Iranian Architecture & Urbanism
(JIAU)
Homepage: https://www.isau.ir/

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Comparative study of thermal comfort simulation software in urban environment

Roza Vakilinezhad [1,*]

[1] *Assistant Professor, School of Art and Architecture, Shiraz University.Shiraz. Iran.*

ARTICLE INFO

Article History:

Received	2020/03/01
Revised	2020/06/17
Accepted	2020/08/22
Available Online	2021/12/22

Keywords:

Urban Environment
Simulation
Thermal Comfort
Energy

Use your device to scan and read the article online

Number of References
48

Number of Figures
9

Number of Tables
4

Extended ABSTRACT

BACKGROUND AND OBJECTIVES: Energy simulation in an urban environment can be accomplished considering two major objectives: first by analyzing the environmental thermal comfort and second by defining the impact of the environment on buildings energy consumption. Three factors affect the creation of pedestrian thermal comfort including climate (global radiation, air temperature, relative humidity and wind speed), microclimate (sky view factor, direct and indirect radiation, mean radiant temperature, surface temperature, ground temperature, building and ground albedo) and pedestrian physical properties (metabolic activity and coatings; these factors are usually not considered in current software. In order to evaluate the thermal components of urban or regional climates, it is necessary to gather accurate data about the radiant conditions in the surrounding environment. This data can be measured experimentally or calculated using the appropriate radiation model. Thus, there are two general methods of using questionnaires and computational simulations to evaluate the effective factors. For applying energy simulation, selecting the proper tool is the first step, which would not be possible without a detailed understanding of how the tool works. On the other hand, it is difficult to choose the proper tool among the growing number of simulation software. Considering designers' recent tendency in this field, it is essential to be aware of the modeling capabilities and limitations of each tool. Some studies have compared the capabilities of building energy software, but no similar studies have been done on the urban scale.

METHODS: By identifying outdoor thermal indices, this study classifies different types of energy simulation at urban scale while introducing six software of Envimet, Rayman, UMI, Meteodyn, Solene and SOLWEIG for pedestrian thermal comfort evaluation. This study aims to define the capabilities, potential, weakness and efficiency of the mentioned software in urban environment. By applying comparative and logical analysis research method, the study is conducted in four steps. In the first step, outdoor thermal comfort indicators have been identified considering effective factors in creation of urban microclimate. The second step is dedicated to identification and classification of related software to be distinguished from urban energy analysis software. In the third step, software performance and the related features are examined and in the final step, selected software properties have been compared in different fields to define strengths, weaknesses and proper application. Capability of the above-mentioned software are compared in terms of climatic parameters, outdoor thermal comfort indicators, solving equations, defaults and neglected factors, extractable parameters, numerical and graphical output data, application simplicity, interaction with other software, graphical interface, accessibility and cost.

FINDINGS: In order to perform a simulation with proper accuracy, it is necessary to consider three basic models of radiation, heat transfer and CFD airflow in combination with each other. However, in many energy simulation tools, some equations in the analysis process are overlooked for simplification. In Envimet and Solene software, the three equations are analyzed. The analysis in Rayman, SOLWEIG and UMI models is based on the radiation and heat transfer models only ignoring the airflow model that is assumed

© 2021, JIAU. All rights reserved.

https://dx.doi.org/10.30475/ISAU.2020.217902.1353

OPEN ACCESS

* Corresponding Author:
Email: *arch.rv@shirazu.ac.ir*
Phone: +98(71)36134000

Extended ABSTRACT

to be constant. In Meteodyn, the radiation model in Urbasun and the airflow model in Urbawind tool are analyzed. In Envimet and Solone, four parameters of dry temperature, relative humidity, wind speed and radiant temperature are calculated. Apart from wind speed, Solone calculates three other parameters, while in Rayman, dry temperature and radiant temperature are considered regardless of relative humidity and wind speed. The only parameter examined in UMI and Meteodyn is wind speed.

CONCLUSION: By computing radiant fluxes, Rayman calculates six thermal comfort indicators. Envimet and Solone calculate four indicators including PMV, PET, UTCI, and MRT and in SOLWEIG model, three indicators including PET, UTCI, and MRT are calculated, while none of the common indicators for thermal comfort is listed as the output data in UMI and Meteodyn. Envimet, Solene and Rayman provide more outdoor thermal comfort indicators as output results. In UMI and Meteodyn data is estimated as the average radiation and wind speed while in other the tools it could be extracted precisely at any desired time. While UMI is a simple free tool, using Envimet and Solene is not free and requires training. However, currently no single tool considers the best combination of all factors and includes all physical processes. The results of this research can help architects, urban designers and software users to choose the proper software in each design stage considering project goals

.....

HIGHLIGHTS:

- Envimet, SOLENE-microclimate and Rayman present many of outdoor thermal comfort indicators as output results.
- The assumptions and equations considered for calculations are different in each tool, consequently, the accuracy of the results and their application differ.
- Currently there is no single tool which considers the best combination of all factors or includes all physical processes.

ACKNOWLEDGMENTS:
This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-forprofit sectors.

CONFLICT OF INTEREST:
The authors declared no conflicts of interest.

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

HOW TO CITE THIS ARTICLE
Vakilinezhad, R., (2021). Comparative study of thermal comfort simulation software in urban environment. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*., 12(2): 235-250.

https://dx.doi.org/10.30475/ISAU.2020.217902.1353
https://www.isau.ir/article_109869.html

نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران
(JIAU)
https://www.isau.ir/

مقاله علمی- پژوهشی

مقایسه تطبیقی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آسایش حرارتی در محیط شهری

رزا وکیلی‌نژاد [۱و*]

۱. استادیار، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

مشخصات مقاله

تاریخ ارسال ۱۳۹۸/۱۲/۱۱
تاریخ بازنگری ۱۳۹۹/۰۳/۲۸
تاریخ پذیرش ۱۳۹۹/۰۶/۰۱
تاریخ انتشار آنلاین ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

واژگان کلیدی

محیط شهری
شبیه‌سازی
آسایش حرارتی
انرژی

چکیده

شبیه‌سازی انرژی در محیط شهری می‌تواند با دو هدف عمده تحلیل آسایش حرارتی خرداقلیم و یا تاثیر خرداقلیم شهری بر مصرف انرژی ساختمان انجام شود. اولین قدم جهت کاربرد شبیه‌سازی انرژی، انتخاب ابزار مناسب است که بدون شناخت دقیق از نحوه عملکرد ابزارها میسر نمی‌شود. از طرف دیگر تعداد رو به رشد نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، انتخاب ابزار مناسب را دشوار می‌سازد. با توجه به تمایل طراحان در چندین سال اخیر به این زمینه، آگاهی از قابلیت‌های مدل‌سازی و محدودیت‌های ابزارهای مورد کاربرد ضروری است. پژوهش حاضر با معرفی شاخص‌های سنجش آسایش حرارتی در محیط خارجی و دسته‌بندی انواع شبیه‌سازی انرژی در مقیاس شهری، شش نرم‌افزار انویمت، ریمن، یومی، متئودین، سولن و سولوگ را جهت سنجش آسایش پیاده معرفی کرده و در تحلیلی تطبیقی به بررسی نحوه عملکرد و مقایسه قابلیت‌های آن‌ها می‌پردازد. سه نرم‌افزار انویمت، سولن و ریمن بیشترین شاخص‌های آسایش حرارتی خارجی را در نتایج خروجی ارائه می‌دهند. در یومی و متئودین داده‌ها به صورت تخمینی از میانگین تابش و سرعت باد و در بقیه ابزارها به صورت دقیق و در هر لحظه دلخواه قابل استخراج است. در حالی که یومی ابزاری ساده و رایگان است، استفاده از انویمت و سولن غیر رایگان بوده و نیاز به آموزش دارد. هرچند در حال حاضر ابزار واحدی که بهترین ترکیب از همه عوامل را مدنظر قرار داده و همه فرآیندهای فیزیکی را شامل شود وجود ندارد. نتایج این پژوهش می‌تواند معماران و طراحان شهری را در انتخاب نرم‌افزار مناسب در هر مرحله از طراحی و با توجه به اهداف پروژه یاری رساند.

نکات شاخص

- نرم‌افزارهای انویمت، سولن-خرداقلیم و ریمن بسیاری از شاخص‌های آسایش حرارتی خارجی را در نتایج خروجی ارائه می‌دهند.
- پیش‌فرض‌ها و معادلات مورد توجه جهت انجام محاسبات در هر ابزار متفاوت بوده و در نتیجه میزان دقت نتایج و دامنه کاربرد آن‌ها متفاوت است.
- در حال حاضر ابزار واحدی که بهترین ترکیب از عوامل را مدنظر قرار داده و همه فرآیندهای فیزیکی را شامل شود وجود ندارد.

نحوه ارجاع به مقاله

وکیلی‌نژاد، رزا. (۱۴۰۰). مقایسه تطبیقی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آسایش حرارتی در محیط شهری، *نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران*، ۱۲(۲)، ۲۵۰-۲۳۵.

* نویسنده مسئول
تلفن: ۰۰۹۸۷۱۳۶۱۳۴۰۰۰
پست الکترونیک: arch.rv@shirazu.ac.ir

مقدمه

در حیطه ساختمان و محیط شهری انواع شبیه‌سازی‌های گرافیکی، تحلیل سازه، برآورد هزینه، سنجش انرژی و ... وجود دارد. در سه دهه گذشته کاربرد شبیه‌سازی انرژی در ساختمان و محیط شهری گسترش بسیار یافته است. در زمینه انرژی، شبیه‌سازی محیط شهری می‌تواند با دو هدف عمده الف) تحلیل آسایش حرارتی در خرداقلیم شهری و ب) تاثیر خرداقلیم شهری بر مصرف انرژی ساختمان انجام شود. در حالت اول تمرکز بر آسایش حرارتی افراد پیاده بوده و در حالت دوم تاثیرات متقابل محیط شهری و انرژی مصرفی ساختمان مدنظر است. گرچه در هر دو حالت پارامترهای مورد بررسی یکسان است اما میزان دقت محاسبات، زمان مورد بررسی و نحوه تعامل میان آن‌ها متفاوت می‌باشد.

توجه به شرایط حرارتی و خرداقلیم شهری از آن جهت حائز اهمیت است که ارتقای کیفی شرایط محیطی می‌تواند شرایط مناسبی جهت حضور افراد در این مکان‌ها فراهم آورده و با افزایش مدت زمان استفاده از فضاهای جمعی سبب پویایی و سرزندگی شهری شود (Purdahimi, 2011). اهمیت سنجش شرایط آسایش در فضاهای شهری را از منظر عوامل مختلف زیر ضروری می‌داند: پیاده‌روهای عمومی در بافت مسکونی، فضاهای توریستی در بافت تاریخی، محیط‌های روباز نمایشگاهی-تجاری- فرهنگی، فضاهای مکث و انتظار عمومی جهت حمل و نقل، خرید، تفریح، ورزش. آسایش حرارتی در فضای شهری می‌تواند سبب تشویق پیاده‌روی در شهرها و بهبود سلامت عمومی و هوای پاک شود(Targhi & Van Dessel, 2015).

شرایط اقلیم شهری شامل اثر جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوای شهری است که از تعامل حرارتی و جریانات هوایی در مقیاس‌های مختلف ایجاد می‌شود. تعدد پارامترهای موثر در ایجاد خرداقلیم شهری و نیز ناپایداری شرایط در مقایسه با محیط‌های بسته، کنترل و سنجش محیطی را دشوار می‌سازد. از جمله عوامل موثر در خرداقلیم شهری، ضریب دید به آسمان SVF ، نسبت ارتفاع به عرض خیابان H/W، تراکم ساختمان‌ها، جنس مصالح جداره ساختمان و سطوح خیابان، میزان سبزینگی شهری ست. عوامل مختلفی از جمله تراکم ساختمانی، شرایط پوششی زمین، بام و سطوح ساختمان، نوع و نحوه کاربرد سیستم تهویه مطبوع موثر بر جزیره گرمایی شهری است(Ooka, 2007).

علاوه بر این طراحی مناسب محیط شهری علاوه بر کاهش بارهای حرارتی و نوری ساختمان‌ها می‌تواند منبع مناسبی جهت تولید انرژی ایجاد نماید. طراحی شهری بر مبنای انرژی با کمک تولید و بهینه‌سازی فرم شهری بر اساس شبیه‌سازی انرژی صورت گرفته و مورفولوژی، فرم شهری و سیستم انرژی مناسب را پیشنهاد می‌دهد. بررسی ساختار کلی اقلیم شهری نمی‌تواند با تحلیل بخشی جزئی در یک مقیاس انجام شود. به همین دلیل ضروری است ابزارهای سنجش از مقیاس انسانی تا مقیاس میانه و کلان شهری با یکدیگر ترکیب شود (همان). شکل ۱، سلسله مراتب مقیاس‌ها را از کوچک به بزرگ (ساختمان تا اقلیم میانه) در تعامل با یکدیگر نشان می‌دهد.

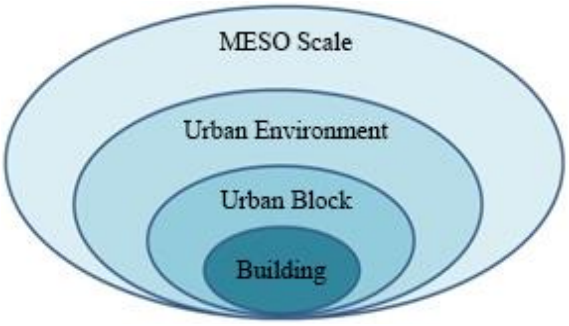

Fig.1. The hierarchy of scales (Building to MESOscale)

مروری بر مدل‌ها و ابزارهای موجود نشان می‌دهد که در حال حاضر ابزار واحدی که بهترین ترکیب از همه عوامل را مدنظر قرار داده و یا مدل واحدی که همه فرایندهای فیزیکی را شامل شود وجود ندارد (Allegrini et al., 2015). در هر پروژه پژوهشی و اجرایی، اهداف و محدودیت‌ها و شرایط ویژه روبروست. اولین قدم جهت کاربرد شبیه‌سازی انرژی، انتخاب ابزار مناسب با توجه به هدف، محدودیت‌ها و امکانات موجود است که بدون وجود شناخت دقیق و عمیق از نحوه عملکرد ابزارها میسر نمی‌شود. با توجه به تمایل طراحان و محققان در چندین سال اخیر به مدل‌سازی خرد اقلیم‌های شهری، آگاهی از قابلیت‌های مدل‌سازی و محدودیت‌های ابزارهای مورد کاربرد ضروری است. از طرف دیگر تعداد رو به رشد نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، انتخاب ابزار مناسب را دشوار می‌سازد. گرچه در مورد نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی در حوزه ساختمان، پژوهش‌هایی جهت مقایسه قابلیت‌های نرم‌افزارهای مختلف با یکدیگر انجام شده اما در مقیاس شهری، پژوهش‌های مشابه وجود ندارد. پژوهش حاضر با اشاره به اهمیت انواع شبیه‌سازی انرژی در مقیاس شهری و دسته‌بندی آن‌ها، به مقایسه قابلیت‌های مهمترین نرم‌افزارهای سنجش آسایش پیاده در محیط شهری می‌پردازد.

پیشینه پژوهش

در زمینه فیزیک ساختمان در حوزه اقلیم شهری و آسایش شهری سه روش تحقیق کلی آزمایش‌های میدانی، آزمایش‌های تونل باد و شبیه‌سازی‌های عددی وجود دارد. بطور کلی نرم‌افزارهای موجود به چند دسته نرم‌افزارهای پیچیده (مدل‌سازی ساختمان در ارتباط با منطقه شهری)، مدل‌های مفهومی کلی (نیاز کلی انرژی ساختمان‌ها)، سیستم‌های انرژی منطقه‌ای (بهینه‌سازی شبکه گرمایش، گاز، آب، برق)، تولید انرژی تجدیدپذیر، خرداقلیم شهری آسایش پیاده، تقسیم می‌شوند(Allegrini et al., 2015).

مدل خرداقلیم شامل سه ریزمدل ۱) مدل تابشی برای تابش بلند و تابش خورشید ۲) مدل‌های سیال برای تعیین سرعت باد، انتقال حرارت جابجایی ساختمان و دماهای هوا ۳) مدل‌های انرژی ساختمان یا شهر برای تعیین دماهای سطوح و نیازهای انرژی میباشد (همان). ابزار مناسب برای طراحی ساختمان انرژی کارامد باید با منظور کردن خرداقلیم شهری، بستر شبیه‌سازی مناسب را ایجاد کرده و با استفاده از ترکیب-کوپل دو ابزار: یک کد CFD و یک کد حرارتی تابشی، تاثیرات سطوح خارجی را درنظر بگیرد(Bouyer et al., 2011).

با وجود پیشرفت بسیار در نرم‌افزارها، شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان به صورت سیستمی منفرد و جداگانه از خرداقلیم و بستر انرژی آن واقع‌گرایانه نیست. در روند معکوس، شبیه‌سازی سیستم انرژی شهری بدون توجه به ویژگی ساختمان‌های درون آن نیز چنین است. شبیه‌سازی محیط شهری مصرف انرژی در ساختمان و سیستم‌های انرژی مرتبط با آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

دو روش کلی بالا به پایین و پایین به بالا برای مدل‌سازی مصرف انرژی یک بخش یا کل ساختمان‌های یک منطقه وجود دارد. روش بالا به پایین ساختمان‌ها به عنوان مخزن انرژی در نظر گرفته شده و مصرف انرژی آینده آن‌ها به عنوان نتیجه عملکرد متغیرهای اقتصاد کلان برآورد می‌شود. مدل‌های پایه ایجاد شده در این حالت می‌توانند برای برنامه ریزی کوتاه مدت نیازها استفاده شود. در مدل‌های بالا به پایین با ساختمان‌ها به عنوان بلوک‌هایی از احجام صلب بوده و اطلاعاتی در مورد تاثیرات محیطی تکنولوژی‌های مختلف یا مداخلات محلی در سطح یک ساختمان فراهم نیست.

اما مدل‌های پایین به بالا بر پایه تیپ‌های معماری ساختمان‌ها یا نمونه های واقعی آن‌ها به عنوان نمونه‌ای از ساختمان‌های موجود استوار است. عملکرد ساختمان در این نمونه‌ها بر اساس تعداد ساختمان‌های مربوط به هر گونه مدل‌سازی می‌شود. مدل‌های پایین به بالا برای اتخاذ تصمیم در مورد سیستم‌های انرژی و ارزیابی نیاز انرژی در مقیاس بزرگ استفاده می‌شوند. از آنجا که مدل‌سازی منطقه بر اساس اطلاعات ساختمان‌های نمونه (تجهیزات ساختمان، سرعت تهویه و ...) انجام می‌شود در نرم‌افزارهای طراحی شهری استفاده از مدل‌های پایین به بالا مطلوب‌تر است(Swan and Ugursal, 2009).

جهت تحلیل در مقیاس کلان، وجود اطلاعاتی از جمله دمای سطوح و داده‌های GIS برای تعیین شرایط مرزی این مدل‌ها لازم هست. در پژوهشی، مدل‌های مختلف آب و هوایی مقیاس میانه جهت بررسی اقلیم شهری و جزیره حرارتی با یکدیگر مقایسه شده است. استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع، افزایش حرارت تولیدی داخلی ساختمان‌ها و پوشش زمین منجر به افزایش دما در مراکز شهری است (Ooka, 2007).

در شبیه‌سازی انرژی و خرداقلیم، تابش به سه بخش تابش مستقیم، خورشید پراکنده و بلند تقسیم می‌شود. شرایط مرزی نیز به دو صورت بر اساس دما یا فشار بخار می‌توانند اعمال شده و انتقال حرارت و جرم همرفت در مدل سیال یا شارهای حرارت و جرم به عنوان شرایط مرزی مستقیم حل شود (Allegrini et al., 2015).

سه عامل موثر در ایجاد آسایش حرارتی پیاده شامل اقلیم (تابش جهانی، دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد)، خرداقلیم (ضریب دید به آسمان، تابش مستقیم، تابش پراکنده، دمای متوسط تابشی، دمای سطح، دمای زمین، آلبدوی ساختمان و آلبدوی زمین) و ویژگی‌های فیزیکی پیاده (فعالیت متابولیکی و پوشش) است که در نرم‌افزارهای موجود معمولا همگی آن‌ها مدنظر قرار نگرفته است. به عنوان مثال در اکثر نرم‌افزارهای سنجش انرژی ساختمان، تاثیر اقلیم مدنظر قرار گرفته و از خرداقلیم پشم پوشی می‌شود. مدل‌های آسایش حرارتی داخلی و خارجی نیز با ساده کردن اقلیم، آن را درنظر گرفته و از خرداقلیم و ویژگی‌های پیاده صرف نظر می‌کنند.

اوکا (2007) روش‌های مختلف سنجش اثر جزیره گرمایی شهری و آسایش پیاده را معرفی و با توجه به مقیاس‌های مدل‌سازی مربوطه تقسیمبندی کرده است. در این پژوهش عملکرد نسبی مدل‌های آشفتگی مختلف برای کاربرد در عملکردهای متفاوت نیز بررسی شده است. در مدل‌سازی‌های که با هدف سنجش آسایش حرارتی محیط خارجی انجام می‌شود دمای تابشی یکی از مهمترین عوامل موثر است. با اینهمه نتایج نرم‌افزارهای مدل‌سازی اقلیمی می‌توانند طیف وسیعی از خروجی‌ها از یک متغیر تا مجموعه ای از انواع متغیرهای خرداقلیم را شامل شود. به عنوان مثال دمای متوسط تابشی یکی از پارامترهای موثر در آسایش حرارتی و مبنای چندین شاخص سنجش آسایش حرارتی خارجی است. با این حال اطلاعات اندکی از نحوه محاسبه دمای متوسط تابشی توسط نرم‌افزارها در دسترس است (Reinhart and Fitz, 2006). عدم اطلاع کاربران از پیش‌فرض‌های نرم‌افزارها در محاسبه دمای تابشی و متغیرهای آسایش وابسته به آن می‌توانند سبب اتخاذ تصمیم نادرست شود. به همین منظور در پژوهشی متغیرهای موثر بر دمای تابشی در پنج نرم‌افزار citysim pro، Envi-met، Rayman، HoneyBee& Ladaybug و Autodesk CFD بررسی شده است.

طبق نتایج این تحقیق، سیتی سیم تمام طیف کوتاه و بلند امواج حرارتی را درنظر گرفته و با توجه به گستردگی تعاریف ورودی‌ها، قابلیت کاربرد در محیط‌های خارجی پیچیده را داراست. انویت با

درنظر گرفتن ساختمان، زمین، گیاه، عناصر منفرد و آب قابلیت شبیه‌سازی را در طیف گسترده‌ای از کاربردها دارد. ریمن ابزاری جهت محاسبات ابتدایی دمای متوسط تابشی در کاربردهایی با محیط بسیار ساده است زیرا نتایج آن بستگی به ورودی ضریب دید به آسمان داشته و تبادل حرارتی انعکاسی میان امواج بلند و کوتاه در آن ساده‌سازی شده و تنها برای زمین منظور شده است (Naboni et al., 2017).

در زمینه سنجش قابلیت‌های ابزارهای شبیه ساز انرژی ساختمان چندین پژوهش انجام شده است. کراولی و همکاران، با انجام پژوهشی وسیع و جامع در مورد نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان، به مقایسه بیست نرم‌افزار از مهمترین ابزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان پرداخته‌اند (Crawley et al., 2005). در زمینه مقایسه ابزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان تعداد دیگری تحقیقات مشابه انجام شده اما پژوهش‌های انجام شده در زمینه شهری بسیار اندک است. پژوهش آلگرینی و همکاران، از معدود پژوهش‌هایی ست که در آن تعدادی از ابزارهای شبیه‌سازی سیستم‌های مصرف انرژی در مقیاس محله، مورد تحلیل قرار گرفته است (Allegrini et al., 2015). اما در حوزه شبیه‌سازی آسایش پیاده در محیط شهری پژوهش مشابه انجام نشده است. به این ترتیب انجام پژوهش جهت شناسایی، نقاط ضعف و کمبود ابزارها در مقیاس شهری ضروری است.

مبانی نظری

مفاهیم آسایش پیاده، آسایش حرارتی در فضای باز و شاخص‌های مربوط به آن در حیطه مبانی نظری پژوهش حاضر قرار می‌گیرند. آسایش حرارتی در محیط خارجی علاوه بر پارامترهای فردی حاصل برهم کنش مولفه‌های دمای هوا، رطوبت، باد و دمای متوسط تابشی است. جهت ارزیابی اجزای حرارتی اقلیم شهری و منطقه‌ای، اطلاعات دقیق از شرایط تابشی محیط اطراف ضروری است. این اطلاعات می‌توانند اندازه‌گیری شده یا با استفاده از مدل تابشی مناسب محاسبه شود. به این ترتیب دو روش کلی پرسشنامه و شبیه‌سازی محاسباتی جهت بررسی عوامل مورد سنجش وجود دارد. در پژوهشی روش‌های کیفی برای بررسی انتظار حرارتی را در محیط‌های خارجی شهری بررسی شده است. طبق نتایج، انتظار حرارتی تحت تاثیر طیف گسترده‌ای از عوامل شامل ماهیت و مقیاس بافت‌های فضایی، حالت حرکتی مردم و مقیاس زمانی دریافت آن‌ها قرار دارد(Lenzholzer et al., 2018).

در محیط شهری، یکی از مهمترین پارامترهای موثر در آسایش حرارتی، میزان دریافت حرارت از طریق تابش و دمای تابشی است. دمای تابشی به عنوان یکی از متغیرهای کلیدی آب و هوایی در تعیین تعادل انرژی انسان و آسایش حرارتی، از برآیند جریان‌های (مستقیم و غیرمستقیم) تابشی (کوتاه و بلند) وارد بر بدن انسان حاصل می‌شود. دمای متوسط تابشی[1] مهمترین پارامتر اقلیمی در محاسبات تعادل حرارتی بدن انسان است در روزهای آفتابی تابستان که تاثیر زیادی بر شاخص‌های آسایش حرارتی مستخرج از مدل‌های تعادل حرارتی انرژی انسان دارد. دمای متوسط تابشی به عنوان دمای یکنواخت یک محفظه سیاه رنگ فرضی است که مقدار مبادله حرارت تابشی فرد ساکن در آن برابر با وقتی است که یک فرد در یک محفظه غیریکنواخت واقعی قرار دارد. دمای تابشی با مدل‌سازی جریان‌های تابشی بلند و کوتاه در شش جهت و فاکتورهای زاویه‌ای بدست می‌آید.

ساختمان‌ها و کالبد شهر با تاثیر بر دمای تابشی شرایط آسایش را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Krüger et al., 2011). در این محیط اهمیت و میزان تاثیر اشعه تابشی در احساس حرارتی بسیار است (Toudert, 2005). علاوه بر این ضریب دید به آسمان[2] نیز تاثیر بسیاری بر شرایط حرارتی خارجی دارد (Lin et al., 2006-2010). این ضریب شاخصی بدون بعد و به مفهوم نسبت تابش دریافتی یک سطح صاف به تابش دریافتی نیمکره دربرگیرنده آن سطح است(Watson and Johnson, 1987).

انسلی و اسپرویل، دو مدل آسایش حرارتی شاخص دمای تر گویسان[3] با اندازه‌گیری مستقیم و منطقه آسایش پیشنهاد بر اساس داده‌های آب و هوایی[4] را مناسب برای کاربرد در فضای خارجی بیان کرده‌اند (Ansley and Spruill, 1990). شاخص دمای تر گویسان در استاندارد ISO7243 برای چهار کلاس فعالیت متابولیکی تنظیم شده است. قوانین تدوین شده توسط سازمان بین المللی استاندارد در ISO7730، برای محیط داخلی تهیه شده اما با افزودن تبادل حرارت تابشی برای محیط خارجی نیز قابل اعمال است (Jendritzky and Nübler, 1981).

در سال‌های اخیر امکان استفاده از مدل آسایش حرارتی پایدار مربوط به فضاهای داخلی، در فضای خارجی بررسی شده است. نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که شاخص‌هایی با مبنای مدل حرارتی پایدار، جهت سنجش آسایش خارجی در مدت زمان کوتاه مناسب نمی‌باشند (Hoppe, 2002; Leech et al., 2000).

طبق نتایج هوپ، مدل‌های پایدار به دلایلی چون مسائل روانشناختی، میزان پوشش و نوع فعالیت و محدوده زمانی، میزان نارضایتی افراد را در فضای خارجی بیش از حد نشان می‌دهند. نتایج پژوهش چون و دیگران (2004) و پوتر و دی دیر (2000) نشان می‌دهند که شاخص PMV [5] برای ارزیابی آسایش حرارتی در فضاهای باز مناسب نیست (Cheng et al, 2011; Thorsson et al, 2004). لین و دیگران (2006) نیز شاخص‌های PMV، ET[6] و SET[7] را برای فضاهای خارجی صحیح نمی‌دانند.

به این ترتیب شاخص‌های جدیدی جهت سنجش آسایش حرارتی در محیط‌های خارجی معرفی شده‌اند که برخی از آن‌ها تنها جهت کاربرد در اقلیم‌های خاص مناسب هستند. اسپاگنولو و دی دیر (2003)، شاخص OUT_SET[8] را برای سنجش آسایش حرارتی خارجی معرفی کرده و با توجه به دمای آسایش ۲۶,۲ برای این شاخص و دمای آسایش ۲۴ برای شاخص set، آن را برای تمام فصول مناسب می‌دانند. به گفته آن‌ها افراد در محیط‌های خارجی میزان تحمل درجه حرارت گسترده‌تری نسبت به فضاهای داخلی را دارند. شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی به عنوان شاخصی جهانی در سال ۱۹۹۹ توسط هوپ معرفی شد که بر پایه مدل تعادل انرژی مونیخ استوار است. دمای معادل فیزیولوژیکی شاخص متداول حالت پایدار در فضاهای باز بوده و بسیار مورد استفاده است (Mayer and Hoppe, 1987). حیدری و منعام (Heidari and Mon'am, 2013)، محدوده های متفاوت آسایش حرارتی را بر مبنای این در غرب و مرکز اروپا، جنوب شرق آسیا و تهران مقایسه کرده است. در سال ۱۹۹۹، فیالا یک مدل دینامیکی پویا[9] را برای سنجش آسایش پیشنهاد داد. شاخص اقلیم حرارتی جهانی[10] نیز آسایش پیاده را بر اساس دمای هوا، دمای تابشی، رطوبت نسبی و سرعت باد و نیز پارامترهای فردی تعیین می‌کند.

بیشترین مطالعات در مورد شرایط آسایش حرارتی خارجی به ترتیب دراقلیم‌های معتدل، خشک، سرد و تراپیکال انجام شده است. شاخص‌های UTCI[11]، PT[12]، STI[13] تنها شاخص‌هایی هستند که می‌توانند برای تعیین همه احساس‌های حرارتی (از استرس گرمایی زیاد تا استرس سرمایی زیاد) بکار روند و بنابراین در همه اقلیم‌ها کاربرد دارند. مدل شاخص‌های Index of Thermal Stress، Humidex، Heat Index and Wet Bulb Globe Temperature Index برای اقلیم‌های گرم پذیرفته شده و مقیاسی برای احساس سرمایی ندارند. در نقطه مقابل شاخص‌های Wind Chill Index and Cooling Power Index احساس سرمایی را درنظر گرفته و از گرما را چشم پوشی می‌کنند. شاخص ITS[14] بیشتر در اقلیم‌های خشک و شاخص‌های SET و OUT SET* بیشتر در اقلیم معتدل استفاده می‌شود. شاخص‌های SET*، PET و OUT_SET*، احساس حرارتی حدود خنثی را با دقت نشان داده اما حالت‌های شدید استرس حرارتی را نشان نمی‌دهند. با این حال شاخص دمای معادل فیزیولوژیک با بیشترین استفاده شاخصی متداول بوده و تطبیق خوبی با اندازه‌گیری‌های میدانی و پرسشنامه‌ها دارد. شاخص UTCI نیز تنها شاخصی است که تاکنون در همه اقلیم‌ها اعمال شده و تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های میدانی و پرسشنامه‌ها دارد(Blazejczyk et al., 2012). به این ترتیب بسیاری از نرم‌افزارهای آسایش پیاده در محیط شهری، دمای متوسط تابشی و ضریب دید به آسمان را محاسبه می‌کنند گرچه خروجی آن‌ها در زمینه شاخص‌های آسایش حرارتی مختلف است.

روش پژوهش

هدف پژوهش حاضر، تعیین قابلیت‌ها، نقاط ضعف و قوت و کارایی نرم‌افزارهای سنجش آسایش حرارتی در محیط شهری است. بدین منظور پژوهش در چهار مرحله و با استفاده از روش‌های مقایسه تطبیقی و تحلیل منطقی انجام شده است. در مرحله اول با توجه به عوامل موثر در ایجاد خرداقلیم شهری، شاخص‌های سنجش آسایش حرارتی در محیط خارجی شناسایی شده است. مرحله دوم به شناسایی نرم‌افزارهای مرتبط و دسته‌بندی انواع و تفکیک آن‌ها از نرم‌افزارهای تحلیل انرژی شهری اختصاص دارد. در مرحله سوم نحوه عملکرد و ویژگی‌های هر یک از نرم‌افزارها مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله نهایی ویژگی‌های نرم‌افزارهای منتخب در زمینه های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و نقاط ضعف و قوت و کاربرد مناسب هر یک مشخص شده است.

Envimet

در دهه اخیر، نرم‌افزار انویمت یکی از متداولترین ابزارهای تحلیل انرژی در محیط شهری بوده که توسط مایکل بروس[15] در سال ۱۹۹۵ در دانشگاه بوخوم آلمان ارائه شده است. کاربرد اصلی نرم‌افزار، تحلیل اقلیم در مقیاس خرد و از مهمترین ویژگی‌های آن قابلیت گرافیک سه‌بعدی است. از آنجا که اثر متقابل سطوح، گیاه و هوا با تغییرات مختلف موثر بر شرایط محیطی خرداقلیم می‌توانند مورد بررسی قرار گیرد به همین دلیل اغلب در محیط‌های شهری و معماری منظر استفاده می‌شود. انویمت یک ابزار تحلیلی خرداقلیم بر مبنای تعامل چهار سیستم خاک، گیاه، اتمسفر و ساختمان است. در محاسبه این تعامل، دمای هوا، دمای متوسط تابشی، سرعت و جهت باد، تابش کوتاه و بلند از مقیاس ساختمان به کل شهر انجام می‌شود. انویمت برای مقیاس کوچک با دقت از ۰.۵ تا ۵ متر افقی و در بازه زمانی ۲۴ تا ۴۸ ساعته با گام ۱ تا ۵ ثانیه طراحی شده و با استفاده از آن اثرات پوشش‌های گیاهی، جنس خاک، بافت شهری و تراکم آن، تا ارتفاع ۲۵۰۰ متر قابل محاسبه است(Bruse, 1998).

انویمت در یک شبیه‌سازی یکپارچه، تاثیر عوامل خرد تا کلان را از دمای برگ و سرعت تبخیر از آن، انعکاس یک مصالح تا تاثیر سازماندهی ساختمان‌ها در مقیاس همسایگی را تحلیل می‌کند. این ابزار متشکل از چند مدول نرم‌افزار کمکی است که هر یک وظیفه معینی به عهده دارند. مدول بیومت[16] سنجش شرایط آسایش حرارتی را انجام داده و از شاخص‌های مبنای UTCI، PET، PMV و MRT استفاده می‌کند(Bruse, 2014). مدول لئوناردو[17] نیز جهت نمایش گرافیکی نتایج خروجی و استخراج عددی آن‌ها بکار میرود. انویمت با امکان مدل‌سازی

و محاسبات انواع مختلف گیاهان، درختان، آب و مصالح، جریان انرژی و تبادل حرارت را بین فضای باز و محیط داخلی را محاسبه می‌کند. علاوه بر این قابلیت محاسبه دمای سطوح ساختمان، دیوار و بام سبز و محاسبه سرمایش تبخیری را نیز دارد. این ابزار در محاسبات جریان هوا از CFD استفاده کرده و تابش خورشید، جریان باد و آلودگی هوا را به صورت یکپارچه درنظر می‌گیرد. شکل ۲، نمونه‌ای از تحلیل انجام شده در محیط انویمت را نشان می‌دهد.

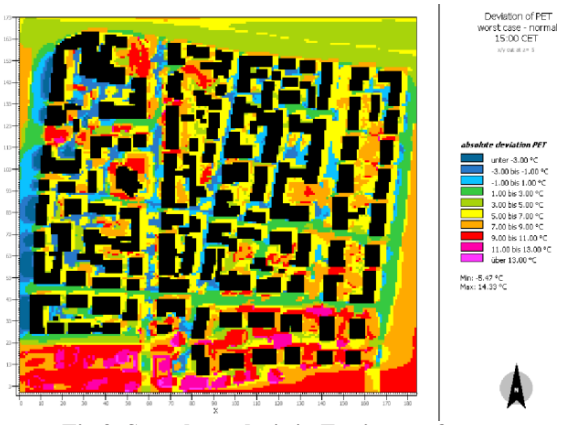

Fig.2. Sample analysis in Envimet software
(Huttner et al., 2008)

Rayman

نرم‌افزار رایگان ریمن[۱۸] توسط دانشگاه فرایبورگ آلمان تهیه شده و در دو نسخه آلمانی و انگلیسی وجود دارد. این نرم‌افزار میزان تابش، تاثیر ابرها، درختان و موانع سایه‌اندازی را بر تابش موج کوتاه محاسبه کرده و قابلیت استفاده در دو مقیاس محلی و منطقه ای[۱۹] را دارد. مهمترین خروجی محاسباتی این مدل، دمای متوسط تابشی ست که با استفاده از آن شاخص‌های حرارتی PMV، PET و SET* نیز محاسبه و ارائه می‌شود. علاوه بر این مقدار ضریب دید به آسمان و طول مدت تابش آفتاب نیز می‌تواند استخراج شود. حداقل داده‌های موردنیاز برای ورودی نرم‌افزار دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد است(Matzrakis and Rutz, 2005; Matzarakis et al, 2007, 2010). سایر داده‌های ورودی شامل مشخصات جغرافیایی محل، ویژگی‌های فردی سن و جنس، نوع فعالیت و پوشش بوده و برای محاسبه شاخص‌های حرارتی براساس تعادل انرژی افراد، داده‌های آب و هوایی دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و مقدار تابش موج کوتاه و موج بلند و داده‌های حرارتی فیزیکی (میزان فعالیت و پوشش) مورد نیاز است. علاوه بر این نرم‌افزار قابلیت ورود ویژگی ساختمان‌ها، درختان و نوع آن‌ها (برگدار و مخروطی) و مقدار پوشش ابرهای آسمان را به صورت ترسیم آزاد و یا عکس‌های چشم ماهی دارد. به این ترتیب نرم‌افزار طول مدت تابش آفتاب، حداکثر، کل و متوسط روزانه تابش خورشید و تعیین مناطق سایه را محاسبه می‌کند. خروجی‌ها به دو صورت نمودار و متن است. شکل ۳، نمونه‌ای از تحلیل انجام شده در محیط ریمن را نشان می‌دهد.

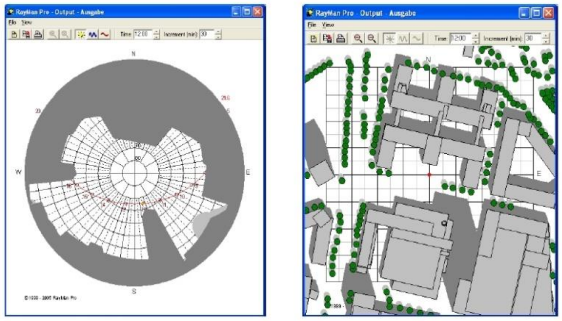

Fig.3. Sample analysis in Rayman software
(Matzarakis & Rutz, 2007)

umi

ابزار یومی[۲۰] که توسط آزمایشگاه طراحی پایدار دانشگاه ام‌آی‌تی طراحی شده، عمدتاً جهت ارزیابی و مقایسه گزینه‌های مختلف طراحی شهری بر میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها در واحد همسایگی کاربرد دارد. این ابزاری پلاگینی رایگان در محیط راینوست که با استفاده از نرم‌افزارهای انرژی پلاس، دیسیم و رادیانس و یک رابط کاربر گرافیکی تحلیل‌ها را انجام می‌دهد. در این مدل توده ساختمان‌ها در واحد همسایگی یا شهر شامل پوسته ساختمان‌ها با درصد پنجره، درختان، سایه سازها، خیابان‌ها و زیرساخت‌های اصلی، پنجره‌ها با سایبان‌های ثابت مدل‌سازی می‌شود. این ابزار قابلیت مدل‌سازی انواع توده‌ها با تعیین مصالح را دارا بوده و تا حدودی به ابزار سان تول[۲۱] شباهت دارد. برای ایجاد تاثیرات خرداقلیم و جزیره گرمایی شهری این مدل از ابزار UWG[۲۲] استفاده کرده و لایه هوایی بالاتر شهری را با لایه هوای سطح خیابان‌های شهری ترکیب می‌کند. این مدل، ابزار محاسباتی برای تولید داده‌های خرداقلیمی با ورودی‌های اندازه‌های هندسی، آلبدو و انتشار مصالح ساختمان‌ها و خیابان‌ها، پوشش درخت و گیاهان، سیستم تهویه مطبوع و تراکم و برنامه بر اساس مدل‌سازی تب[۲۳] است. به عبارتی ابزار UWG فایل epw را برای ایستگاه آب و هوایی روستایی به نزدیک‌ترین مرکز شهری برای تاثیرات ساعتی جزیره گرمایی شهری تبدیل می‌کند. از آنجا که این مدل فقط در حالتی که ایستگاه هواشناسی در جهت روبه باد شهر باشد تبیین شده است، باید محتاطانه و در مکان‌هایی به دور از مجاورت بدنه‌های بزرگ آب استفاده شود.

خروجی‌های مدل انرژی مصرفی، آسایش حرارتی خارجی، مکان‌های سایه، قابلیت پیاده و دو شاخص آناتومی نور روز سالانه[۲۴]در هر طبقه ساختمان است (Dogan et al., 2012). علاوه بر این قابلیت تعیین شاخص قابلیت پیاده را دارد. شاخص آمریکایی قابلیت پیاده امتیازی بین ۰ تا ۱۰۰ بر اساس نزدیکی به امکاناتی مانند فروشگاه مواد غذایی، رستورانها، مراکز خرید، مدارس، بانک، پارک، کتاب و سرگرمی است(Walkscore, 2013). گالاپاگوس[۲۵] در گرسهاپر می‌تواند با قابلیت پیاده ترکیب شده و مکانیابی را در همسایگی‌ها ارتقا دهد(Rakha and Reinhart, 2012).

تفاوت اساسی مدل‌های پایین به بالا با یومی این است که این مدل‌ها با همه ساختمان‌های یک گونه به صورت یکسان برای اهداف آماری برخورد می‌کنند. یومی با تمرکز بر معماری و طراحی شهری تمایل به حل مجدد تفاوت‌های مصرف انرژی بخاطر شرایط خرداقلیم محلی شهری مانند خودسایه‌اندازی یا اثر جزیره حرارتی دارد. مدل آسایش حرارتی در یومی ساده‌سازی شده و از متوسط دمای تابشی و اثرات بادهای محلی چشم‌پوشی می‌شود.

این ابزار هیچ یک از شاخص‌های آسایش حرارتی خارجی را ارائه نمی‌دهد. تحلیل آسایش حرارتی ارائه شده توسط یومی، شامل تعیین و نمایش نقاط سرد و گرم در محیط شهری است. معیار تعیین نقاط گرم، تعداد ساعاتی ست که فضای شهری در معرض تابش قرار گرفته و دمای هوا در آن‌ها بالاتر از یک آستانه دمایی معین (مثلا ۲۸ درجه) است. نقاط سرد نیز بخشهایی از فضای شهری هستند که در تعداد ساعات زیادی از سال، دمای آن‌ها پایینتر از یک آستانه دمایی معین (مثلا ۵ درجه) بوده و تابش را دریافت نمی‌کنند(Reinhart at al., 2013). شکل ۴، نمونه ای از تحلیل انجام شده در محیط یومی را نشان می‌دهد.

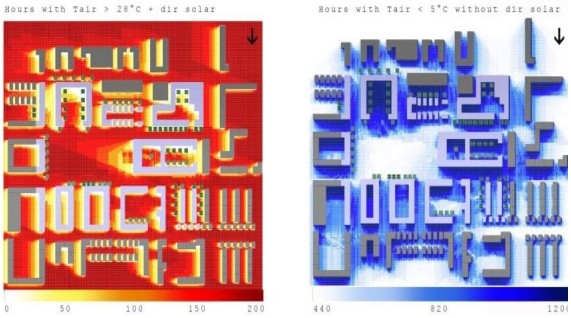

Fig.4. Sample analysis in UMI software
(Reinhart et al., 2013)

Meteodyn

شرکت متئودین[۲۶] که در سال ۲۰۰۳ تاسیس شده مجموعه نرم‌افزارهایی در زمینه شبیه‌سازی باد با CFD و مطالعات انرژی فراهم کرده است. این نرم‌افزارها در سه دسته در ارتباط با انرژی‌های تجدیدپذیر، ساختمان و شهر، حمل و نقل و امنیت سازه ها در برابر باد طراحی شده‌اند. با استفاده از دو ابزار اورباوینـد[۲۷] و اورباسان[۲۸] می‌توان آسایش پیاده را در محیط شهری بررسی نمود. ابزار اول، یک شبیه‌ساز جریان باد است که مخصوص محیط‌های شهری و ساختمان‌ها طراحی شده و یک مدول آسایش باد پیاده نیز مناطق عدم آسایش باد را در اطراف ساختمان‌ها برای معماران و طراحان شهری تعیین می‌کند. شاخص آسایش در برابر باد بر اساس تواتر و سرعت باد تعیین می‌شود. این مدول تهویه طبیعی درونی ساختمان‌ها در ساختمان‌های با طراحی ایستا و پیشرفته مدل‌سازی می‌کند. متغیرهای مورد اندازه‌گیری، جهت و سرعت متوسط باد، شدت آشفتگی و متوسط ضرایب فشار روی پوسته ساختمان است. مدول منابع انرژی به توربین‌های کوچک تولید باد اختصاص دارد که با محاسبه پتانسیل باد درون سایت، محل توربین‌ها را برای تولید بهینه و عمر تجهیزات اعتبارسنجی می‌کند.

ارزیابی آسایش پیاده بر اساس چیدمان ساختمان‌ها و اثرات نامطلوب آیرودینامیکی در گوشه‌ها و بین ساختمان‌ها سنجیده می‌شود. مدول آسایش باد پیاده در نرم‌افزار اورباوینـد اقلیم محلی را در رابطه با پلان توده ساختمان‌ها ارزیابی کرده و با محاسبه تواتر بادها، نقشه فصلی یا سالانه از باد و تابش ارائه می‌دهد. مدول تهویه طبیعی در این ابزار با تخمین پتانسیل تهویه طبیعی بر مبنای اطلاعات مبنای اقلیمی، نرخ تعویض هوا، پلان توده و ویژگی‌های بهینه بازشوها را محاسبه می‌کند.

پتانسیل تهویه طبیعی به تنوع زمانی (فصول و روز/شب)، توپوگرافی، هموواری زمین و ساختمان‌های مجاور بستگی دارد. این ابزار با ارزیابی تولید انرژی باد در محیط مصنوع و در مجاورت سازههای حساس به جریانات هوایی، میزان تولید سالانه انرژی و اطلاعات کلیدی را برای انتخاب بهترین تجهیزات و مکان‌ها را پیشنهاد می‌دهد. این مدول برای هر ساختار معماری، مشبندی اتوماتیک را جهت محاسبه دقیق CFD با توجه به محیط اطراف (توپوگرافی، هموواری و گیاهان) انجام می‌دهد.

مهمترین ویژگی آن بیان گرافیکی و کاربری آسان است. نرم‌افزار اورباسان تابش خورشیدی را در محیط شهری ارزیابی کرده و در محاسبات ارزیابی آسایش پیاده، شرایط حرارتی ساختمان و پتانسیل انرژی خورشیدی کاربرد دارد. این ابزار با محاسبه میزان تابش خورشید بر روی سطوح با مصالح مختلف و در ترکیب با ابزار قبلی، مطالعات کامل اقلیم و آسایش را فراهم می‌کند. شکل ۵، نمونه ای از تحلیل انجام شده در محیط اورباوینـد و اورباسان را نشان می‌دهد.

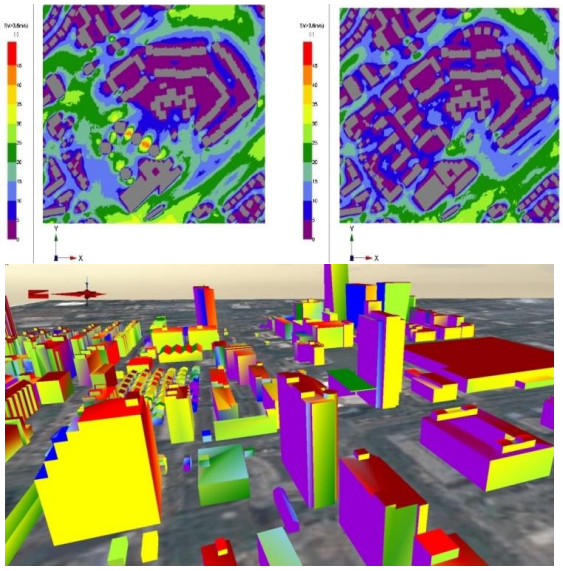

Fig.5. Sample analysis in Urbawind and Urbasun software
(meteodyn, 2019)

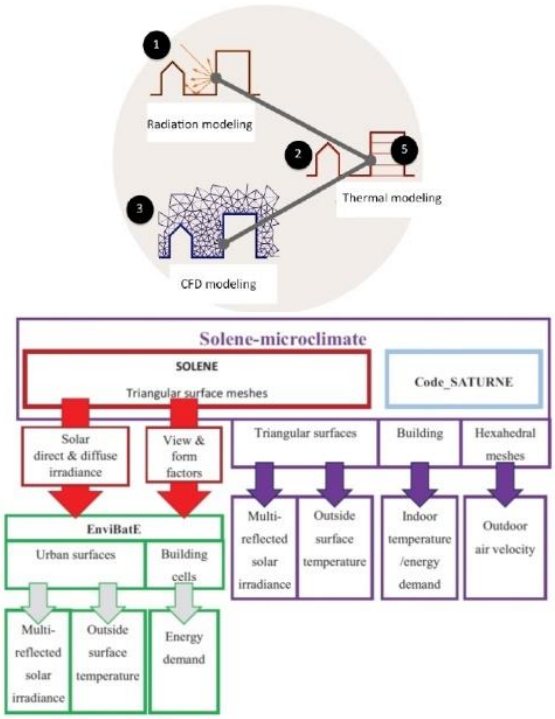

Fig.6. Structure of modules and calculation analysis in Solene-microclimate (Gros et al., 2015)

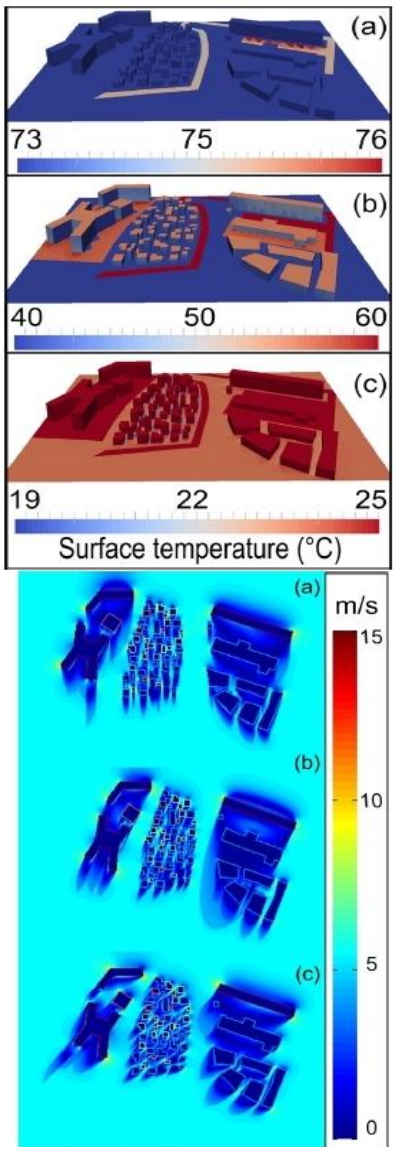

Fig.7. Sample analysis in Solene-microclimate (Gros et al., 2015)

Solene

سولن ابزاری برای شبیه‌سازی خرداقلیم شهری و مصرف انرژی ساختمان بر اساس محاسبات نور خورشید و تابش حرارتی ست که در دهه ۱۹۹۰ به زبان فرانسوی توسط مرکز تحقیقات کرما[۲۹] در فرانسه ایجاد شد. هدف اصلی این ابزار تعیین میزان دسترسی پروژه‌های شهری و معماری به نور خورشید و تاثیر خرد اقلیم بر میزان مصرف انرژی ساختمان با استفاده از محاسبات تابش حرارتی بود. سولن- خرداقلیم[۳۰] ابزاری برای ارزیابی کارایی پوسته ها بر مبنای مصرف انرژی در مقیاس محله در سال ۲۰۱۵ ایجاد شده است. سولن-خرد اقلیم پلت فرمی با ابزارهای شبیه‌سازی خرداقلیم شهری است که برای ارزیابی فرم شهری و تاثیر اقلیمی پروژه‌های شهری و معماری بکار میرود. نرم‌افزار فعلی سولن- خرداقلیم در مقیاس همسایگی می‌تواند متغیرهای دمای سطوح، آسایش خارجی، مصرف انرژی ساختمان، کاهش جزیره گرمایی شهری، تاثیر سبزینگی شهری، انتخاب مصالح را شبیه‌سازی کند. سولن- خرداقلیم جهت محاسبه رفتار حرارتی ناپایدار ساختمان از مدل حرارت-تابش سولن استفاده می‌کند که با استفاده از ابزار CDF کد ستورن[۳۱] با جریان هوای خارجی کوپل می‌شود. مزیت اصلی این ابزار توجه به کل محیط شهری ست که تبادلات تابشی (تابش موج کوتاه و بلند) و تاثیر خاک، دیوار، بام سبز و درختان و شرایط هوایی خارجی ساختمان را تعیین می‌کند. امکان تعریف پوسته‌های جدید شهری با مصالح تغییر فاز دهنده یا سیستم‌های تولید انرژی خورشیدی در محیط سولن-خرداقلیم وجود داشته و کارایی آن‌ها می‌تواند ارزیابی شود. مدل سه بعدی شهر از هر نرم‌افزار اتوکد می‌تواند از طریق فایل با فرمت ACIS به محیط سولن-خرداقلیم وارد شود (sat.). علاوه بر این یک رابط کاربر جدید در گوگل اسکچاپ[۳۲] ورود و خروج هندسی را میسر ساخته و بعد از مش زدن مدل، نمایش نتایج را با نقشه های گول ارت[۳۳] سه بعدی میسر می‌کند. شکل ۶، ساختار مدول‌ها و محاسبات تحلیلی انجام شده در محیط سولن-خرداقلیم و شکل ۷، نمونه‌ای از تحلیل انجام شده در این محیط را نشان می‌دهد.

SOLWEIG

نرم‌افزار سولوگ[۳۴] انواع شارهای تابشی، دمای متوسط تابشی و الگوی سه بعدی سایه را در ساختارهای شهری پیچیده مدل‌سازی می‌کند. ورودی‌های این مدل شامل داده های آب و هوایی، تابش، دمای هوا، رطوبت نسبی، هندسه شهری، اطلاعات جغرافیایی طول و عرض و ارتفاع است. برای تعیین دمای متوسط تابشی، نقشه مداوم از ضریب دید به آسمان لازم است. برای افزایش دقت خروجی مدل اطلاعات سبزینگی و پوشش زمین می‌تواند اضافه شود. مدل سول وگ در نرم‌افزار یومپ[۳۵] اجرا می‌شود که یک

پلاگین پایتون[۳۶] در برنامه QGIS است. یو ام ای پی، ابزاری برای طراحی اقلیمی در مقیاس شهری با واسط کاربر گرافیکی ست که مدل‌ها و ابزارهای ضروری برای شبیه‌سازی های اقلیمی را با یکدیگر ترکیب کرده و برای تعیین آسایش حرارتی خارجی، مصرف انرژی شهری و تعدیل تغییر اقلیم کاربرد دارد. این ابزار متن باز[۳۷] و رایگان بوده و مهمترین ویژگی آن توانایی کاربر برای تعامل با داده های فضایی جهت تعیین پارامترهای مدل است. سه جز اصلی آن شامل پیش پردازشگر (برای ورودی‌های آب و هوایی و اطلاعات سطوح)، پردازشگر (سیستم‌های مدل‌سازی مانند مدل‌های سطوح زمین شهری)، پس پردازشگر (ابزارهایی برای تحلیلی خروجی‌ها (نمونه مستقل و گروهی، نشانگرهای عدم قطعیت، کاربردهای کاربر) می‌باشد.

سولوگ نیز یکی از ابزارهای پردازشگر است که برای تعیین آسایش حرارتی، دمای متوسط تابشی و مصرف انرژی در دو مقیاس محلی و خرد بکار میرود که می‌تواند برای یک زمان خاص یا یک بازه زمانی مورد استفاده قرار گیرد. اولین نسخه مدل سولوگ در سال ۲۰۰۸ ایجاد شده و در سال ۲۰۱۶ اولین نسخه آن در ترکیب با نرم‌افزار یومپ ارائه شد. سول وگ با تعیین جریان‌های حرارتی دو و سه بعدی و تنوع پوششی زمین و گیاهان سه بعدی (درخت و بوته)، دمای متوسط تابشی را در ساختارهای شهری پیچیده محاسبه می‌کند. این مدل قابلیت تعیین امواج گرمایی و تاثیر زیر ساختارهای سبز بر روان آب، تاثیر ساختمان‌ها بر تنش حرارتی انسان، تولید انرژی خورشیدی و تاثیر فعالیتهای انسانی بر انتشارات گرمایی را داراست. گرچه در مدل محاسباتی سولوگ تمرکز بر محاسبه شارهای حرارتی تابشی پیاده بوده و برای شارهای حرارتی روی سطوح بام ساختمان مناسب نیست. داده‌های لازم برای سولوگ شامل دو دسته شامل اطلاعات فضایی و اطلاعات آب و هوایی و پارامترهای محیطی اصلی لازم ضریب آلبدو و انتشار زمین و دیوارهاست. داده‌های آب و هوایی لازم، دما و رطوبت هوا و تابش موج کوتاه ورودی بوده و فایل آب و هوایی پیش فرض فرمت یومپ دارد. یک پلاگین پیش پردازشگر دیگر برای ایجاد ارتفاع دیوار ساختمان‌ها لازم است.

در قسمت پیش پردازشگر یومپ یک محاسبه‌گر برای ضریب دید به آسمان وجود دارد که برای اجرای آن باید نقشه ضریب دید به آسمان برای ساختمان‌ها و گیاهان ایجاد شود. اجرای نتایج تحلیل شده از پلاگین تحلیل سولوگ[۳۸] در قسمت پس پردازشگر بوده و امکان دریافت خروجی ها به صورت شبکه محاسباتی از انواع پارامترها و یا داده‌های کامل از یک نقطه موردنظر وجود دارد. شکل ۸، دیاگرام درختی متغیرها و تحلیل‌های انجام شده و شکل ۹، نمونه‌ای از تحلیل انجام شده در محیط سولوگ را نشان می‌دهد.

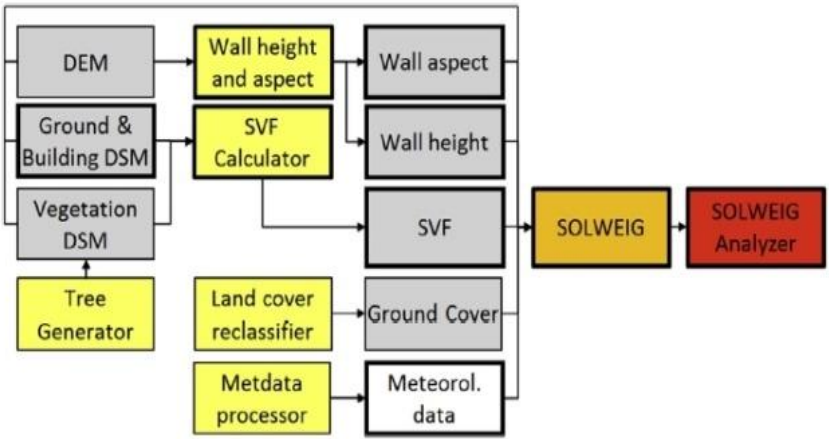

Fig.8. Structure of modules and calculation analysis in SOLWEIG (Lindberg et al., 2018)

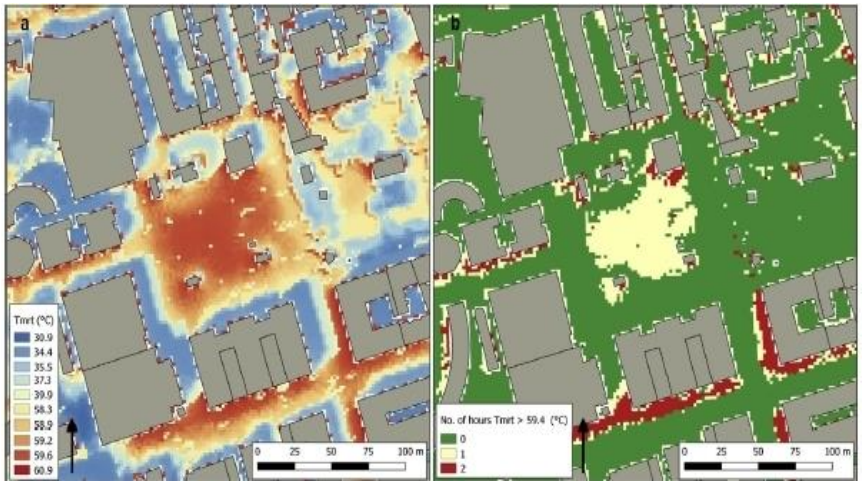

Fig.9. Sample analysis in SOLWEIG (Lindberg et al., 2018)

یافته‌ها

مقایسه قابلیت‌های نرم‌افزارها

جهت مقایسه قابلیت‌های شش نرم‌افزار مطرح شده، برخی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر نحوه عملکرد شبیه‌سازی تعیین شده است. استخراج این عوامل بر اساس اهداف مختلف کاربرد شبیه‌سازی انرژی و نیز با توجه به عوامل مورد بررسی در مطالعات مشابه پیشین با رویکرد مقایسه تطبیقی نرم‌افزارها صورت گرفته است. جداول ۱ تا ۴ خلاصه‌ای از این اطلاعات را نشان می‌دهند. بر اساس مقایسه انجام شده، در هر جدول سه ابزار کاملتر با تغییر رنگ ستون مربوطه مشخص شده است. قابلیت ابزارها در زمینه اطلاعات پایه شامل دمای خشک، رطوبت نسبی، سرعت باد و دمای تابشی در جدول ۱ و شاخص‌های سنجش آسایش حرارتی خارجی شامل MRT، PMV/ PPD، PET، UTCI، SET* و PT، در مقایسه با یکدیگر در جدول ۲، نشان داده شده است.

Table 1. Software comparison for climatic indicators

Indicator	Envimet	Meteodyn	Rayman	umi	solene	solweig
DBT	+	-	+	+	+	+
RH	+	-	-	-	+	+
MRT	+	-	+	-	+	+
V	+	+	-	-	+	-

Table 2. Software comparison for outdoor thermal comfort indicators

Indicator	Envimet	Meteodyn	Rayman	umi	solene	solweig
PMV/PPD	+	-	+	-	+	-
PET	+	-	+	-	+	+
SET*	-	-	+	-	-	-
UTCI	+	-	+	-	+	+
PT	-	-	+	-	-	-
MRT	+	-	+	-	+	+

در انویمت و سولن، هر چهار پارامتر دمای خشک، رطوبت نسبی، سرعت باد و دمای تابشی محاسبه می‌شود. سولوگ بجز سرعت باد سه پارامتر دیگر را محاسبه می‌کند در حالیکه در ریمن دمای خشک و دمای تابشی بدون توجه به رطوبت نسبی و سرعت باد مورد بررسی قرار می‌گیرد. تنها پارامتر مورد بررسی در یومی دمای خشک و در متئودین، سرعت باد است. ریمن، با محاسبه شارهای تابشی، شش شاخص از انواع شاخص‌های آسایش حرارتی را محاسبه می‌کند. در انویمت و سولن نیز چهار شاخص MRT، UTCI، PET و PMV در مدل سولوگ سه شاخص MRT، UTCI و PET محاسبه می‌شود. در حالی که هیچکدام از شاخص‌های متداول سنجش آسایش حرارتی جز داده‌های خروجی یومی و متئودین قرار ندارد.

جهت انجام شبیه‌سازی با دقت و صحت مناسب، درنظر گرفتن سه مدل پایه تابش، انتقال حرارت و جریان هوا CFD در ترکیب با یکدیگر ضروری است. این درحالی است که در بسیاری از ابزارهای شبیه‌سازی انرژی، جهت ساده سازی از برخی معادلات در فرآیند تحلیل، چشم‌پوشی می‌شود. در نرم‌افزارهای انویمت و سولن، هر سه معادلات تابش، حرارت و جریان هوا تحلیل می‌شوند. تحلیل انجام شده در مدل‌های ریمن، سولوگ و یومی تنها بر اساس مدل تابش و مدل حرارت بوده و با چشم پوشی از مدل جریان هوا، شرایط آن ثابت فرض می‌شود. در متئودین، مدل تابش در ابزار اورباسان و مدل جریان هوا در ابزار اورباوینند تحلیل می‌شود. جدول ۳، مقایسه نرم‌افزارهای مورد بحث را در زمینه معادلات مورد حل در هر ابزار نشان می‌دهد.

Table 3. Software comparison for solving equations and models

Model	Envimet	Meteodyn	Rayman	umi	solene	solweig
Radiation Model	+	+	+	+	+	+
Thermal Model	+	-	+	+	+	+
CFD Model	+	+	-	-	+	-

قابلیت نرم‌افزارها در سایر زمینه‌ها در جدول ۴ با یکدیگر مقایسه شده است. موارد مورد بررسی شامل پیش فرض‌ها و عوامل چشم پوشی شده، سایر پارامترهای قابل استخراج، نوع داده‌های خروجی (عددی و گرافیکی)، سهولت کاربری، تبادل با سایر نرم‌افزارها، واسط گرافیکی، دسترسی و هزینه است.

در ریمن، متئودین و سولوگ، عملکرد حرارتی درون ساختمان‌ها به صورت ثابت فرض می‌شود. در یومی، با چشم پوشی از متوسط دمای تابشی و اثرات بادهای محلی، مدل آسایش حرارتی ساده سازی شده است. ابزار سولوگ تنها شارهای حرارتی تابشی در سطح پیاده محاسبه شده و از شارهای حرارتی منتشره از سطوح بالاتر از جمله بام ساختمان‌ها چشم‌پوشی می‌شود. علاوه بر خروجی‌های ذکرشده، در انویمت، متوسط دمای داخلی ساختمان‌ها و دمای سطوح قابل استخراج است.

متئودین و ریمن، امکان استخراج ضرایب دید به آسمان را فراهم می‌کنند. یومی قابلیت پیاده را در واحدی بین ۰ تا ۱۰۰ نشان می‌دهد. در متئودین، شدت آشفتگی، ضرایب فشار روی پوسته ساختمان‌ها،

Table 4. Software comparison for various fields

Field		Envimet	Meteodyn	Rayman	umi	solene	solweig
Ignored Parameters		-	Building thermal Performance	Building thermal Performance	Mean Radiant Temperature-Local Wind Effects	-	Building thermal Performance-Roof Surface Heat Fluxes
Other Output Data		Average Indoor Temperature-Surface Temperatures	Turbulence Intensity-Wind Pressure Coefficients-Natural Ventilation Potential-Wind Discomfort Points- Air Change Rate	Sky View Factor	Walkability	Daylight penetration-Energy Consumption and Interior building's Interior Temperature-Surface Temperatures	Sky View Factor
Output Date	Numerical	+	+	+	+	+	+
	Graphical	+	+	+	+	+	+
Ease of Use		Need Training	Requires Knowledge in Building Physics and Fluid Dynamics	Average	Easy	Hard	Need Training
Exchange with other software		Image-CAD	Image-CAD	Image-CAD	+	CAD- Sketch UP-Google Earth	-
Access and Price		Free Educational Version-Various Version with Different Capabilities	Free Educational Version	Free	Free in Grasshopper	Research Version	Free

پتانسیل تهویه طبیعی، نقاط عدم آسایش باد و نرخ تعویض هوا نیز قابل دستیابی ست. محیط سولن نیز میزان نفوذ نور در ساختمان، دید بصری، مصرف انرژی ساختمان‌ها، دمای داخلی ساختمان‌ها و دمای سطوح را تعیین می‌کند. نوع داده های خروجی در هر شش نرم‌افزار مورد بررسی شامل داده‌های عددی و گرافیکی ست و انویمت، متئودین و ریمن امکان تبادل با سایر نرم‌افزارها را به صورت CAD و تصویر دارند. سولن می‌تواند فایل‌ها را از محیط CAD، اسکچاپ و گوگل ارت دریافت کند. اما سولوگ در این زمینه محدودیت دارد. در ابزار ریمن و سولوگ می‌توان از تصاویر چشم ماهی به عنوان داده ورودی جهت محاسبه ضریب دید به آسمان استفاده شود.

کاربرد یومی در صورت آشنایی با محیط گرسهاپر، آسان بوده و استفاده از انویمت و سولوگ نیازمند آموزش است. برای کاربرد متئودین وجود دانش پایه از فیزیک ساختمان و اصول سیالات ضروری بوده و کاربرد سولن-خرداقلیم در مقایسه با سایر نرم افزارهای مذکور دشوار است. ریمن در میانه قرار داشته و کابردی نسبتاً آسان دارد. ابزار انویمت در قالب چندین نسخه با قابلیت‌های مختلف موجود بوده و نسخه آزمایشی آن نیز با قابلیت‌های محدود، به صورت رایگان در دسترس است. متئودین نیز امکان استفاده ۱۵ روزه از نسخه رایگان را با ارائه درخواست، فراهم کرده است.

ریمن، یومی و سولوگ رایگان بوده و سولن خرداقلیم نیز به صورت نسخه پژوهشی در دسترس است.

شاخص‌های آسایش حرارتی در نرم‌افزارها

نرم افزارهای مورد بررسی قابلیت‌های متفاوت داشته و در زمینه محاسبه شاخص‌های آسایش حرارتی متفاوت عمل می‌کنند. انویمت علاوه بر آنکه امکان محاسبه آسایش حرارتی را برای افراد و شرایط مختلف فراهم کرده است، آن‌ها را به صورت انواع مختلفی از شاخص‌های حرارتی خروجی شامل MRT، PMV/PPD، PET و UTCI را ارائه می‌دهد. در این ابزار شرایط خرداقلیم محلی و سه نوع معادلات تابش، تبادل حرارت و جریان هوا در محاسبات منظور شده است.

در مدل ریمن نیز امکان محاسبه آسایش حرارتی برای افراد و شرایط مختلف وجود دارد ولی جریان هوا مورد تحلیل قرار نمی‌گیرد. شش نوع مختلف از شاخص‌های آسایش حرارتی خارجی در ریمن قابل استخراج است. این ابزار برای محاسبات اولیه دمای تابشی در بافت‌های ساده هندسه شهری مناسب بوده و نتایج آن بستگی به ورودی ضریب دید به آسمان دارد. در این مدل، تابش منعکس شده موج کوتاه و تبدیل آن به موج بلند، ساده‌سازی شده و تنها برای زمین محاسبه می‌شود.

سنجش آسایش حرارتی در ابزار متئودین از ترکیب نتایج دو موتور تحلیل اورباوینـد و اورباسان امکانپذیر است. آنالیز آسایش پیاده باید از ترکیب نتایج این دو موتور تحلیل و با استفاده از دانش کاربر انجام شود. هرچند اطلاعاتی که در این زمینه توسط نرم‌افزارها در اختیار کاربر قرار میگیرد، اندک است. این نتایج شامل آسایش پیاده در برابر باد بر اساس سرعت و تواتر آن تحلیل شده در ابزار اورباوینـد و نیز شامل میزان و تواتر زمانی تابش خورشید و مناطق در آسایش تابشی است که در ابزار اورباسان ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که تحلیل انجام شده فاقد دقت لحظه ای بوده و تخمینی از برآیند شرایط حرارتی در بازه زمانی تعیین شده است.

ابزار یومی جهت انجام تحلیل‌ها و بررسی تاثیر فضای شهری بر مصرف انرژی ساختمان‌ها، از uwg استفاده کرده و با استفاده از اطلاعات GIS یک فایل آب و هوایی خرداقلیم برای هر واحد همسایگی میسازد. به دلیل استفاده از اطلاعات GIS، تحلیل صورت گرفته از دقت زیادی برخوردار نیست. تحلیل آسایش حرارتی ارائه شده توسط یومی، شامل تعیین و نمایش نقاط سرد و گرم در محیط شهری بوده و هیچیک از شاخص‌های آسایش حرارتی خارجی را ارائه نمی‌دهد. به این ترتیب کاربر باید جهت سنجش شرایط آسایش حرارتی با استفاده از خروجی‌های میزان تابش، نور دریافتی، نقاط گرم و سرد و با تکیه بر دانش خود به تحلیل شرایط آسایش بپردازد.

در سولن چهار شاخص PMV, PET, UTCI, MRT و در سولوگ سه شاخص PET, UTCI, MRT محاسبه می‌شود. سولن در مقیاس شهری، تبادلات تابشی (تابش موج کوتاه و بلند) و تاثیر خاک، دیوار، بام سبز و درختان و شرایط هوایی خارجی ساختمان را در محاسبات اعمال کرده و امکان تعریف پوسته های جدید شهری با مصالح تغییر فاز دهنده یا سلولهای خورشیدی دارد. در مدل سولوگ تمرکز بر محاسبه شارهای حرارتی تابشی پیاده بوده و شارهای حرارتی روی سطوح بام ساختمان محاسبه نمی‌شود. گرچه در هر دو مدل اطلاعات سبزینگی و پوشش زمین و ساختمان مدنظر قرار میگیرد اما در مدل سولوگ، انجام محاسبات بدون توجه به تغییرات جریان هوا انجام می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

شبیه‌سازی انرژی در محیط شهری با دو هدف عمده تحلیل آسایش حرارتی خرداقلیم و یا تاثیر خرداقلیم شهری بر مصرف انرژی ساختمان انجام می‌شود. مقاله حاضر با هدف تعیین ابزار مناسب جهت سنجش آسایش حرارتی در محیط شهری، به مقایسه قابلیت‌های شش نرم افزار شبیه‌سازی انرژی در مقیاس شهری پرداخته است. سه نرم‌افزار انویمت، سولن-خرداقلیم و ریمن بیشترین شاخص‌های آسایش حرارتی خارجی را در نتایج خروجی ارائه می‌دهند اما در مدل ریمن، تنها معادلات تابش و حرارت مئنظر قرار گرفته و تاثیر جریان باد در انجام تحلیل‌ها درنظر گرفته نمی‌شود. در انویمت و سولن-خرداقلیم انجام محاسبات در تعامل با عملکرد حرارتی درونی ساختمان‌ها انجام شده و در سایر نرم‌افزارها از آن چشم‌پوشی می‌شود. در حالیکه در یومی و متئودین داده ها به صورت تخمینی از میانگین تابش و سرعت باد، ارائه می‌شود، در بقیه نرم‌افزارهای مورد بررسی، داده ها به صورت دقیق و در هر لحظه دلخواه قابل استخراج است. سهولت کاربری و دسترسی به نرم‌افزارها نیز از دیگر عوامل موثر در میزان کاربرد آن‌ها است. در حالی که یومی به صورت ابزاری ساده و رایگان در دسترس است، استفاده از انویمت و سولن-خرداقلیم با محدودیت‌هایی همراه بوده و کاربرد آن‌ها نیاز به آموزش دارد. به این ترتیب در حال حاضر ابزار واحدی که بهترین ترکیب از عوامل را مدنظر قرار داده و همه فرآیندهای فیزیکی را شامل شود وجود ندارد. لذا نتایج پژوهش حاضر می‌تواند معماران و طراحان شهری را در انتخاب نرم‌افزار مناسب در هر مرحله از طراحی و با توجه به اهداف پروژه یاری رساند.

پی نوشت

1. Tmrt
2. Sky View Factor (SVF)
3. Wet Bulb Globe Temperature Index developed by Yaglou & Minard (1957)
4. Comfort zones based on readily available National Weather Service Data suggested by Macfarlane (1958).
5. Predicted Mean Vote
6. Equivalent Temperature
7. Standard Equivalent Temperature
8. Outside Standard Equivalent Temperature
9. PET (physiological equivalent temperature)
10. Dynamic Thermal Sensation
11. UTCI (universal thermal climate index)
12. Perceived Temperature
13. Subjective Temperature Index
14. Index of Thermal Stress
15. Michael Bruse
16. Biomet
17. Leonardo
18. radiation on the human body
19. meso- and micro scale
20. UMI (Urban Modeling Interface)
21. SUNtool
22. UWG (Urban Weather Generator)
23. TEB (Town Energy Budget)
24. daylight autonomy (DA) or continuous daylight autonomy (CDA)
25. Galapagos
26. Meteodyn
27. Urbawind
28. Urbasun
29. CERMA
30. SOLENE-microclimate
31. Code_Saturne
32. T4SU (Tools for SketchUp)
33. Google Earth
34. SOlar and LongWave Environmental Irradiance Geometry model (SOLWEIG)
35. UMEP - Urban Multi-scale Environmental Predictor

36. Python
37. open source
38. SOLWEIG Analyzer

تشکر و قدردانی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

تاییدیه‌های اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که کلیهٔ اصول اخلاقی انتشار اثر علمی را براساس اصول اخلاقی COPE رعایت کرده‌اند و در صورت احراز هر یک از موارد تخطی از اصول اخلاقی، حتی پس از انتشار مقاله، حق حذف مقاله و پیگیری مورد را به مجله می‌دهند.

منابع مالی/ حمایت‌ها

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

مشارکت و مسئولیت نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌دارند به‌طور مستقیم در مراحل انجام پژوهش و نگارش مقاله مشارکت فعال داشته و به طور برابر مسئولیت تمام محتویات و مطالب گفته‌شده در مقاله را می‌پذیرند.

References

1. Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V., Evins, R. (2015). A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1391–1404.
2. Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G. et al. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal Biometeorology,* (56),515–535.
3. Bouyer, J., Inard, CH., Musya, M. (2011), Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings,* 43, 1549–1559.
4. Bruse, M., Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. *Environment Modelling Software,* 13, 373-384.
5. Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., and Pigeon, G. (2013). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation,* 6(4), 269-281.
6. Cheng,V; Ng, E; Chan, C; Givoni, B. (2011). Outdoor thermal comfort study in a subtropical climate: A longitudinal study based in Hong Kong. *International Journal of Biometeorol, 56*, 43-56.
7. Crawley1, D., Hand, J., Kummert, M. et al. (2005), Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Ninth International IBPSA Conference,* 15-18.
8. Dogan, T., Reinhart, C., Michalatos, P. (2012). Urban daylight simulation: Calculating the daylit area of urban designs. *In: Proceedings of SimBuild.*
9. Envi-met. (2019). Retrieved from: "https://www.envi-met.com/" on September 2019, 12:30 PM.
10. Ghaiei, M. M., Mahdavi Nia, M., Tahabaz, M., Mofidi Shemirani, S. M. (2013). Methodology for selecting applicable energy simulation software in the architecture. *Hoviyat-e-shahr,* 13 (7), 45-55.
11. Gros, A., Bozonnet, E., r Inard, Ch. Et al. (2016). Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district. *Energy and Buildings,* 114 (2016) 112–122.
12. Heidari, Sh.; Mon'am, A. (2013). Evaluation of outdoor thermal comfort indicators. *Geography and Regional Development,* (20), 197-216.
13. Herrmann, J., Matzarakis, A. (2010). Influence of mean radiant temperature on thermal comfort of humans in idealized urban environments. *In: Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology,* 20, 523-528.
14. Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34, 661-665.
15. Huttner, S., Bruse, M., Dostal, P. (2008). Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities. *5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology,* 307-312.
16. Jendritzky, Gerd and W. Nübler. (1981). A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms." *Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B,* (29)313-326.
17. Krüger, E. L., Minella, F. O., Rasia, F. (2011). Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment,* 46 (3), 621-634.
18. Leech, J.A; Burnett, R; Nelson, W; Aaron, Raizenne, M. (2000). Outdoor air pollution epidemiologic studies. *American Journal of Respiration and Critical Care Medicine,* 161(3), A308.
19. Lenzholzer, S., Klemma, W., Vasilikou, C. (2018). Qualitative methods to explore thermo-spatial perception in outdoor urban spaces. *Urban Climate,*23, 231-249.
20. Lin, Tp; Matzarakis, A; Huang, JJ. (2006). Thermal comfort and passive design strategy of bus shelters. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Geneva, Switzerland.
21. Lin, TP; Matzarakis, A; Hwang, RL. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment,* 45, 213-221.
22. Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., Gabey, A. et al.

(2018), Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services, *Environmental Modelling & Software,* 99, 70-87.
23. Lindberg, F; Holmer, B; Thorsson, S. (2008). SOL-WEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal Biometeorol,* 52, 697-713.
24. Matzarakis, A., Mayer, H. (1996). Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletter,* 18, 7-10.
25. Matzarakis, A., Rutz, F., Scott, D. (2007). RAYMAN: a tool for tourism and applied climatology. *Developments in Tourism Climatology,* 129-138.
26. Matzarakis, A; Rutz, F. (2005). Application of RayMan for tourism and climate investigations. *Annalen der Meteorologie,* 41(2), 631-636.
27. Matzarakis, A; Rutz, F; Mayer, H. (2007). Modeling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of Rayman model. *International journal Biometeorol,* 51, 323-334.
28. Matzarakis, A; Rutz, F; Mayer, H. (2010). Modeling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorol,* 54, 131-139.
29. Mayer, H; Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology,* 38, 43-49.
30. Meteodyn. (2019). Retrieved from: "https://meteodyn.com/" on September 2019, 10:00 AM.
31. Naboni, E., Marco Meloni, M., Coccolo, S., Kaempf, J., Scartezzini, J. (2017). An overview of simulation tools for predicting the mean radiant temperature in an outdoor space. *Energy Procedia,* 122 (2017) 1111–1116.
32. Ooka, R. (2007), Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan. *International journal of climatology,* 27, 1919–1930.
33. Purdahimi, Sh. (2011). Culture and Housing. *Housing and Village Environment,* 30 (134), 3-18.
34. Rakha, T., Reinhart, C. (2012). Generative Urban Modeling: A Design Work Flow for walkability optimized cities. In: Proceedings of SimBuild.
35. Reinhart, C., Dogan, T., Jakubiec, J. et al. (2013). UMI - an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. *In: Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association.*
36. Reinhart, C., Fitz, A. (2006). Findings from a Survey on the current use of daylight simulations during building design. *Energy and Buildings,* 38, 824-835.
37. SOLENE, (2019); Retrieved from https://aau.archi.fr/crenau/solene/
38. Spagnolo, Jennifer; de Dear, Richard. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environments,* 38, 721-738.
39. Swan, L., Ugursal, I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 13(8), 1819-1835.
40. T4SU. (2019). Retrieved from: "https://t4su.wordpress.com/" on September 2019, 09:00 AM.
41. Targhi, M. Z., & Van Dessel, S. (2015). Potential Contribution of Urban Developments to Outdoor Thermal Comfort Conditions: The Influence of Urban Geometry and Form in Worcester. Massachusetts, USA. *In: Procedia Engineering,* 118, 1153-1161.
42. Thorsson, S; Lindqvist, M; Lindqvist, S. (2004). Thermal bioclimatic conditions and patterns of behavior in an urban park in Goteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology,* 48, 149-156.
43. Toudert, F. A. (2005). Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. 80.
44. UMEP. (2019). Retrieved from: "https://umep.docs.readthedocs.io/en/latest/OtherManuals/SOLWEIG.html" on September 2019, 01:00 PM.
45. Urbanclimate. (2019). Retrieved from: "https://www.urbanclimate.net/rayman/" on September 2019, 10:30 AM.
46. Walkscore. (2019). Retrieved from: "http://www.walkscore.com" on September 2019, 03:20 PM.
47. Watson ID, Johnson GT. (1987) Graphical estimation of skyview-factors in urban environments. *Journal of Climatology,* 7, 193–197.
48. Web.mit.edu. (2019). Retrieved from: "http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html" on September 2019, 11:20 AM.