University of Qom
Engineering Management and Soft Computing
JEMSC.QOM
Online ISSN: 2538-2675

Leveraging Model-Driven Development to Evaluate Key Performance Indicators for Smart City

Seyed Masoud Hoseini[1], Leila Samimi-Dehkordi[2*], Abbas Horri[3]
1. Msc of Software Engineering, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: Smh.masoud65@yahoo.com
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: samimi@sku.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: horri@sku.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 9 - 12 – 2024
Received in revised form
5 - 1 – 2025
Accepted 18 - 2 – 2025
Published online 18 - 3 – 2025

Keywords:
Key Performance Indicator, Smart City, Model-Driven Engineering, Domain-Specific Modeling Language

ABSTRACT

Rapid urbanization, particularly in megacities, poses complex challenges for traffic management, energy consumption, and quality of life. Key Performance Indicators (KPIs) are crucial for evaluating urban systems, but their accurate calculation is challenging due to the large volume of data and computational complexity involved. This research presents a novel model-driven engineering approach that automates KPI calculation through a domain-specific modeling language (DSML) and a user-friendly graphical editor. This approach simplifies the evaluation process by reducing computational complexity, providing city managers with faster and more accurate access to information. An evaluation of the proposed DSML, based on maintainability, understandability, and extensibility, demonstrates its advantages over existing methods. The results show a significant improvement in the accuracy and efficiency of KPI evaluation, enabling more informed and effective management decisions. The features of DSML, including a structured metamodel and specialized classifications, significantly reduce modeling time, minimize human error, and enhance computational accuracy.

Cite this article: ……..

© The Author(s)
DOI: https://doi.org/

Publisher: University of Qom

JEMSC.QOM
شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۵-۲۵۳۸

مدیریت مهندسی و رایانش نرم

دانشگاه قم

بهره‌گیری از توسعه‌ی مدل‌رانده برای ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد در شهر هوشمند

سید مسعود حسینی[1]، لیلا صمیمی دهکردی[2*]، عباس حری[3]

1. کارشناس ارشد مهندسی نرم افزار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. ایمیل: Smh.masoud65@yahoo.com

2. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. ایمیل: samimi@sku.ac.ir

3. استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. ایمیل: horri@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 1403/09/19

تاریخ بازنگری: 1403/10/16

تاریخ پذیرش: 1403/11/30

تاریخ انتشار 1403/12/30

کلیدواژه‌ها:
شاخص کلیدی عملکرد، شهر هوشمند، مهندسی مدل‌رانده، زبان مدل‌سازی خاص دامنه.

چکیده

رشد سریع شهرنشینی، به‌ویژه در کلان‌شهرها، چالش‌های پیچیده‌ای در مدیریت ترافیک، مصرف انرژی و کیفیت زندگی ایجاد کرده است. استفاده از شاخص‌های کلیدی عملکرد ابزار مهمی برای ارزیابی سیستم‌های شهری است، اما محاسبه‌ی دقیق آن‌ها به دلیل حجم بالای داده‌ها و پیچیدگی محاسبات، چالشی اساسی محسوب می‌شود. این پژوهش یک رویکرد نوین مبتنی بر مهندسی مدل‌رانده ارائه می‌دهد که با طراحی یک زبان مدل‌سازی خاص دامنه و ویرایشگر گرافیکی کاربرپسند، محاسبه‌ی خودکار شاخص‌ها را ممکن می‌سازد. این رویکرد ضمن کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، فرآیند ارزیابی را تسهیل و دسترسی سریع‌تر و دقیق‌تر به اطلاعات را برای مدیران شهری فراهم می‌کند. ارزیابی زبان مدل‌سازی پیشنهادی بر اساس معیارهای قابلیت نگهداری، درک‌پذیری و توسعه‌پذیری، نشان‌دهنده‌ی برتری آن نسبت به روش‌های مشابه است. نتایج پژوهش حاکی از بهبود قابل توجه در دقت و کارایی ارزیابی شاخص‌ها بوده و این امکان را فراهم می‌کند که تصمیمات مدیریتی دقیق‌تر و کارآمدتری اتخاذ شود. ویژگی‌های زبان پیشنهادی، شامل فرامدل ساختاریافته و دسته‌بندی‌های تخصصی، به کاهش زمان مدل‌سازی، کاهش خطاهای انسانی و افزایش دقت محاسبات کمک شایانی می‌کند.

استناد: .....

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه قم

1) مقدمه

شهرها در طول زمان به‌تدریج از مراکز ساده‌ی کشاورزی و صنعتی به ساختارهای پیچیده‌ی دیجیتالی تبدیل شده‌اند که اکنون به‌عنوان شهرهای هوشمند شناخته می‌شوند. توسعه‌ی فناوری‌های نوین اطلاعات و ارتباطات، این امکان را فراهم کرده است تا زیرساخت‌های شهری به‌صورت هوشمند مدیریت شوند و نیازهای شهروندان با کارایی بیشتری تأمین شود. با توجه به گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت در مناطق شهری، مدیران شهری با چالش‌های متعددی در تأمین خدمات شهری، بهینه‌سازی منابع و ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان مواجهند. در این بستر، شهرهای هوشمند به‌عنوان راهکاری برای مقابله با پیچیدگی‌های مدیریت شهری و ارائه خدمات بهتر به شهروندان، به یک الزام تبدیل شده‌اند (گارسیاس و همکاران (2023)).

شهر هوشمند نه تنها به معنای استفاده از فناوری‌های پیشرفته است، بلکه هدف آن ایجاد یک اکوسیستم کارآمد و یکپارچه است که در آن اجزای مختلف شهری از طریق شاخص‌های کلیدی عملکرد به یکدیگر متصل می‌شوند و میزان بهره‌وری، پایداری و هوشمندی شهر را می‌سنجند. این شاخص‌ها شامل معیارهایی در زمینه‌هایی نظیر ترافیک، کیفیت هوا، مصرف انرژی، مدیریت پسماند و امنیت عمومی است. با این‌حال، تعریف، ارزیابی و به‌روزرسانی این شاخص‌ها نیازمند ابزارها و روش‌های محاسباتی پیچیده‌ای است که بتوانند حجم عظیم داده‌های شهری را به‌طور بهینه پردازش کنند و نتایج دقیقی ارائه دهند (اوکانتا و ووکویک (2024)).

علی‌رغم اهمیت شاخص‌ها در بهبود عملکرد شهرهای هوشمند، روش‌های محاسباتی موجود با چالش‌های زیادی روبرو هستند. اغلب این روش‌ها به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی و تکرارپذیری بالا، زمان‌بر و پرهزینه هستند و نمی‌توانند به‌صورت کارآمدی با تغییرات پویای محیط‌های شهری تطبیق یابند. افزون بر این، بسیاری از این روش‌ها به دانش و تجربه‌ی بالایی نیاز دارند و بنابراین مدل‌سازی شاخص‌ها در مقیاس‌های بزرگ شهری، هنوز یک مسئله‌ی چالش‌برانگیز است (سانکتیس و همکاران (2022)). با توجه به این چالش‌ها، پژوهش حاضر به‌دنبال ارائه‌ی رویکردی مبتنی بر مهندسی مدل‌رانده (برامبیلا و همکاران (2017)) برای بهبود فرایند مدل‌سازی و محاسبه‌ی شاخص‌های کلیدی عملکرد در شهرهای هوشمند است. در پژوهش حاضر، زبان مدل‌سازی خاص دامنه‌ای ارائه شده است که از طریق کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، امکان تعریف خودکار شاخص‌ها و بهبود فرآیندهای ارزیابی را فراهم می‌آورد. این زبان به دلیل ساختار پیمانه‌ای و فرمول‌های از پیش تعریف‌شده، در مقایسه با سایر زبان‌های مشابه، مزیت‌های چشمگیری در کاهش زمان مدل‌سازی و سهولت در توسعه دارد.

استفاده از مهندسی مدل‌رانده، که در آن مدل‌ها به‌عنوان پایه‌ی اصلی توسعه و تحلیل سیستم به‌کار می‌روند، به محققان و مدیران شهری امکان می‌دهد تا فرایند مدل‌سازی شاخص‌ها را ساده‌تر کرده و پیچیدگی محاسبات را به‌حداقل برسانند (برامبیلا و همکاران (2017)). برای این‌منظور، در این پژوهش یک زبان مدل‌سازی خاص دامنه مبتنی بر فرامدل، توسعه یافته است که امکان تعریف و ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد را در قالب مدل‌های گرافیکی فراهم می‌کند. همچنین، یک ویرایشگر گرافیکی توسعه یافته است که این زبان مدل‌سازی را پیاده‌سازی کرده و با استفاده از آن محاسبات و ارزیابی شاخص‌های کلیدی به‌صورت خودکار انجام می‌دهد.

هدف اصلی این تحقیق، ایجاد زبانی برای مدل‌سازی شاخص‌های کلیدی عملکرد شهرهای هوشمند و ارائه‌ی ابزاری کارآمد برای ارزیابی خودکار این شاخص‌ها است. با به‌کارگیری این رویکرد، می‌توان محاسبات شاخص‌ها را تسهیل کرد و دسترسی به داده‌های ارزیابی‌شده‌ی به‌روز برای مدیران شهری را فراهم ساخت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد مدل‌رانده و ابزارهای مدل‌سازی خاص دامنه نه تنها پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد، بلکه امکان تعریف، توسعه و ارزیابی آسان‌تر شاخص‌های عملکردی را نیز فراهم می‌کند. نوآوری اصلی این پژوهش در طراحی زبانی نهفته است که قابلیت تعریف و ارزیابی خودکار شاخص‌ها را با دقت بالا ارائه می‌دهد. این زبان با ترکیب مدل‌های گرافیکی و محاسبات مبتنی بر فرامدل، ابزار قدرتمندی برای تصمیم‌گیری‌های شهری فراهم می‌کند.

در ادامه این مقاله، ابتدا در بخش «ادبیات تحقیق»، مفاهیم اصلی در زمینه شهر هوشمند، شاخص کلیدی عملکرد و مهندسی مدل‌رانده تبیین می‌گردد. سپس در بخش «پیشینه تحقیق»، به بررسی مطالعات مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته خواهد شد. در بخش «روش تحقیق»، روش‌شناسی مورد استفاده در این پژوهش، شامل نحو انتزاعی، نحو عینی و معنای زبان مدل‌سازی، به تفصیل شرح داده می‌شود. در بخش «یافته‌ها»، نتایج حاصل از مطالعه موردی شهر تهران ارائه شده و زبان مدل‌سازی پیشنهادی با زبان مدل‌سازی MIKADO مقایسه می‌گردد. در نهایت، در بخش «نتیجه‌گیری و پیشنهادها»، یافته‌های اصلی تحقیق جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

2) ادبیات تحقیق

در عصر دیجیتال، **شهر هوشمند** به‌عنوان یک رویکرد نوین برای مدیریت شهری مطرح است که در آن فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات با زیرساخت‌های فیزیکی و اجتماعی شهر تلفیق شده‌اند. هدف از این ادغام، ارتقای کیفیت زندگی شهروندان، افزایش بهره‌وری منابع و بهبود خدمات عمومی در ابعاد مختلف مانند محیط‌زیست، انرژی و امنیت است (گارسیاس و همکاران (2023)). شهرهای هوشمند از شبکه‌های متصل به اینترنت اشیاء و داده‌های بزرگ برای پردازش و تحلیل اطلاعات بهره می‌برند و بدین ترتیب، امکان مدیریت هوشمند و واکنش سریع به تغییرات و نیازهای شهری را فراهم می‌کنند (شهرکی و جلالی بیدگلی (1402)).

در پژوهش‌های مرتبط با توسعه شهرهای هوشمند، **شاخص‌های کلیدی عملکرد** نقشی حیاتی در سنجش و ارزیابی ابعاد مختلف عملکرد شهری ایفا می‌کنند. این شاخص‌ها، همانند استانداردهای مدیریت کیفیت (برادران کاظم‌زاده (1402))، به‌صورت کمی و کیفی تعریف می‌شوند و ابعاد متنوعی همچون ترافیک، مصرف انرژی، امنیت عمومی و مدیریت پسماند را پوشش می‌دهند و به مدیران شهری کمک می‌کنند تا پیشرفت و کیفیت خدمات شهری را در راستای توسعه پایدار ارزیابی کنند. با وجود اهمیت شاخص‌ها در تصمیم‌گیری‌های کلان، محاسبه و ارزیابی آن‌ها به‌دلیل پیچیدگی‌های ذاتی و حجم داده‌های شهری، چالش‌های زیادی را به‌همراه دارد (اوکانتا و ووکویک (2024)).

در راستای تسهیل و خودکارسازی محاسبات شاخص‌ها، **مهندسی مدل‌رانده** به‌عنوان رویکردی نوین در توسعه نرم‌افزار مطرح می‌شود. در این رویکرد مدل‌ها نقش اصلی را ایفا کرده و توسعه‌دهندگان به‌جای کار با کدهای پیچیده، از مدل‌ها برای تحلیل، طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌ها استفاده می‌کنند (برامبیلا و همکاران (2017)). در چارچوب شهرهای هوشمند،

این روش می‌تواند با ایجاد مدل‌های سطح بالا، به ساده‌سازی فرآیندهای ارزیابی کمک کند و با کاهش پیچیدگی‌ها، کارآمدی این شاخص‌ها را افزایش دهد.

برای تعریف و ارزیابی دقیق‌تر شاخص‌های کلیدی عملکرد در حوزه شهر هوشمند، **زبان مدل‌سازی خاص دامنه** به‌کار می‌رود. این نوع زبان‌ها به‌طور خاص برای حوزه‌های محدود طراحی شده‌اند و به متخصصان امکان می‌دهند تا مدل‌ها را با استفاده از اصطلاحات و مفاهیم همان دامنه ایجاد کنند (ایونگ و همکاران (2020)). در این پژوهش، زبان خاص دامنه به‌منظور مدل‌سازی و ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد توسعه یافته و با بهره‌گیری از آن، تعاریف و قوانین مرتبط با شاخص‌ها به‌صورت دقیق و ساختاریافته مدل‌سازی می‌شوند.

هر زبان مدل‌سازی شامل سه بخش اصلی است: **نحو انتزاعی**، **نحو عینی** و **معنا** (صمیمی دهکردی و همکاران (2019)). نحو انتزاعی ساختار کلی زبان را تعریف کرده و شامل مفاهیم ویژگی‌ها و روابط بین آن‌ها است؛ در این پژوهش، نحو انتزاعی به شناسایی و تعریف شاخص‌های مرتبط با شهر هوشمند اختصاص دارد. نحو عینی نمایش بصری از مفاهیم و روابط بین آنها را ارائه می‌دهد و کاربران را قادر می‌سازد که مدل‌ها را به‌صورت گرافیکی مشاهده و ویرایش کنند. معنای زبان شامل قواعد اجرایی و نحوه‌ی کارکرد زبان در کاربردهای مختلف است (صمیمی دهکردی و همکاران (2019)). این اجزا به صحت و پایداری مدل‌ها کمک کرده و بروز خطاهای احتمالی را کاهش می‌دهند.

چارچوب مدل‌سازی اکلیپس[1] **(EMF)** یکی از بسترهای پرکاربرد برای طراحی و مدیریت مدل‌ها در مهندسی مدل‌رانده است. این چارچوب با ارائه قابلیت‌های ایجاد و نگهداری فرامدل‌ها، امکان مدیریت ساختارهای مختلف مدل‌سازی را فراهم می‌کند و به کمک افزونه‌هایی مانند **ویرایشگر گرافیکی سیریوس**[2]، مشاهده و ویرایش مدل‌ها به‌صورت بصری را تسهیل می‌کند. EMF به‌عنوان یکی از اجزای اصلی این پژوهش، برای مدیریت و طراحی فرامدل شاخص‌های کلیدی عملکرد به‌کار رفته است.

برای اجرای محاسبات و فرآیندهای خودکارسازی در مدل‌سازی شاخص‌ها، **مجموعه زبان‌های اپسیلون**[3]، شامل زبان شیء اپسیلون (EOL)، ابزارهای مناسبی برای این منظور فراهم می‌آورند. EOL به‌عنوان زبان اصلی مجموعه اپسیلون، امکان انجام عملیات متنوعی مانند اعتبارسنجی، تبدیل و مدیریت مدل‌ها را فراهم می‌سازد (کولووس و همکاران (2006)).

3) پیشینه تحقیق

پیشینه تحقیق به سه دسته تقسیم می‌شود: 1) مقالاتی که به موضوع شاخص‌های کلیدی عملکرد در شهر هوشمند می‌پردازند، 2) مقالاتی که به مدل‌سازی شاخص کلیدی عملکرد پرداخته‌اند و 3) تحقیقاتی که به مدل‌سازی شهر هوشمند اشاره دارند.

دسته اول مطالعات مرتبط با شاخص‌های کلیدی عملکرد در شهر هوشمند هستند.

کارال و سویر (2024) ابتدا مفاهیم شهر هوشمند، شهر پایدار و شهر هوشمند پایدار را تعریف می‌کنند و سپس، به

[1] https://eclipse.dev/modeling/emf/
[2] https://eclipse.dev/sirius/
[3] https://eclipse.dev/epsilon/

بررسی شاخص‌های مرتبط با ارزیابی هوشمندی و پایداری شهرها و روند انتخاب این شاخص‌ها می‌پردازند. بر اساس تحلیل‌های صورت‌گرفته، 14 معیار برای ارزیابی شاخص‌های عملکردی شناسایی شده است، از جمله قابلیت اندازه‌گیری، در دسترس بودن، اعتبار و غیره. هدف این مطالعه حمایت از دیگر تحقیقات و کاربردهای مقامات در راستای ایجاد و ارزیابی شهرهای هوشمند و پایدار است و به شهرهایی که می‌خواهند به دستور کار 2030 بپیوندند، کمک می‌کند. اولین قدم در ایجاد یک شهر هوشمند پایدار، تعیین مناسب‌ترین شاخص‌ها برای آن شهر است.

داسیلوا تامادون و همکاران (2024) به بررسی نقش شاخص‌های کلیدی عملکرد در توسعه پایدار شهری می‌پردازد و بر اهمیت طراحی و ارزیابی سیاست‌ها برای شهرهای هوشمند تأکید می‌کند. با استفاده از یک مرور بیبلیومتریک از مقالات منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲، ۱۹۱ مقاله کلیدی شناسایی شده که نشان‌دهنده افزایش ۲۸۸ درصدی علاقه به این موضوع است. مقاله به کمبود پایگاه‌های داده جامع اشاره می‌کند و تأکید دارد که شاخص‌های دقیق و متنوع برای نظارت بر پیشرفت‌های توسعه پایدار ضروری هستند. در نهایت، بر لزوم ادغام شاخص‌های متمرکز بر تاب‌آوری در سیاست‌های شهری برای بهبود کیفیت زندگی و حفظ محیط زیست تأکید می‌کند.

بلاید و همکاران (2024) به بررسی تحقیقات در زمینه شهرهای هوشمند و پایدار می‌پردازند و با استفاده از تحلیل‌های شبکه‌ای و بیبلیومتریک، محتوای این حوزه را تحلیل می‌کنند. با بررسی ۳۱۲ مقاله، پنج خوشه اصلی در تحقیقات شهرهای هوشمند و پایدار شناسایی شده است: پیاده‌سازی، فناوری، شاخص کلیدی عملکرد، سیاست و ارزش. همچنین، مقاله چالش‌ها و مسائل موجود در تحقیق درباره این شهرها را شناسایی و بررسی می‌کند و راهکارهایی برای مقابله با این چالش‌ها ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند به محققان و کارشناسان کمک کند تا در ادبیات شهرهای هوشمند و پایدار بهتر عمل کنند و به سیاست‌گذاران و نهادهای دولتی نیز راهنمایی‌های مفیدی ارائه دهد.

قاضی‌نوری و همکاران (2024) به بررسی مدل‌های بلوغ شهر هوشمند می‌پردازند که به‌عنوان یکی از نتایج تحول دیجیتال، برای ارزیابی شرایط موجود در شهرها و تعیین راهنمایی‌هایی برای پیشرفت به مراحل بعدی بلوغ طراحی شده‌اند. اکثر این مدل‌ها از مدل اولیه منتشر شده توسط سازمان بین‌المللی داده‌ها پیروی می‌کنند. مقاله با بررسی نظام‌مند مدل‌های موجود و تحلیل مزایا و معایب آنها، خلأهای موجود در دانش را پر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که موضوعات مهمی مانند تاب‌آوری در مواجهه با پاندمی‌های جهانی و جنبه‌های فرهنگی در این مدل‌ها مورد غفلت واقع شده‌اند. همچنین، تکنیک‌های اعتبارسنجی مدل‌ها غیرموجه هستند و به‌دلیل نظری بودن بیشتر آنها، قابلیت کاربرد در مناطق مختلف را ندارند. این مقاله به‌دنبال بهبود در ارزیابی و توسعه شهرهای هوشمند از طریق شناسایی و تحلیل این نقاط ضعف است.

ترندویچ و همکاران (2023) به بررسی تجربه کاربری و ارتباط آن با ارزش کسب‌وکار در سیستم‌های نرم‌افزاری، به‌ویژه در زمینه اینترنت اشیا صنعتی می‌پردازند. نویسندگان با انجام یک مرور ادبیات چندصدایی، ۶۰۴ شاخص کلیدی عملکرد، ۷۸ عامل تأثیرگذار و ۱۱۹ چالش مرتبط با اندازه‌گیری تجربه کاربری در سیستم‌های اینترنت اشیای صنعتی را شناسایی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که توجه کمی به تجربه کاربری در این زمینه شده و بیشتر ویژگی‌های تجربه کاربری به‌طور کلی در سیستم‌های نرم‌افزاری تعریف شده‌اند و به‌طور خاص به اینترنت اشیا مرتبط نیستند. مقاله به عدم وجود یک رویکرد پذیرفته‌شده برای اندازه‌گیری تجربه کاربری در سیستم‌های صنعتی و نقش اندک آن در طراحی و توسعه این

سیستم‌ها اشاره می‌کند و توصیه‌هایی برای بهبود اندازه‌گیری آن ارائه می‌دهد.

جونیور (2023) به بررسی یک مدل حکمرانی و شاخص‌های کلیدی عملکرد در زمینه حمل و نقل پایدار در شهرهای هوشمند می‌پردازد. هدف اصلی آن ارائه روشی برای دستیابی به تحرک قابل دسترس، فراگیر و پایدار درون و فراتر از شهرهای هوشمند است. با استفاده از تحقیقات پیشین، مقاله به شناسایی عوامل کلیدی که بر توسعه سیاست‌های شهری تأثیر می‌گذارند، می‌پردازد و نشان می‌دهد که چگونه شهرها می‌توانند از اطلاعات مختلف برای بهبود خدمات حمل و نقل پایدار بهره‌برداری کنند. یافته‌ها تأکید بر اهمیت تحرک هوشمند و فعالیت‌های مبتنی بر داده دارند و پیشنهاد می‌کنند که با افزایش آگاهی جامعه و حمایت از سیاست‌گذاران، رفتار مسافران به سمت تحرک پایدار تغییر کند. این مطالعه همچنین به بهبود کیفیت زندگی شهروندان و پایداری اقتصادی خدمات حمل و نقل تأکید دارد و نکات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی شهری و پذیرش روش‌های حمل و نقل دوستانه با محیط زیست ارائه می‌دهد.

محمدزاده و همکاران (2023) به بررسی تأثیر شهرهای هوشمند بر شاخص‌های کلیدی نظام بهداشت و درمان پرداخته و به بررسی زیرساخت‌های لازم برای ایجاد این شهرها در کشورهای در حال توسعه می‌پردازند. با استفاده از فناوری‌های نوین مانند تحلیل داده‌ها، حسگرهای اینترنت اشیا و برنامه‌های موبایل، شهرهای هوشمند می‌توانند دسترسی به خدمات بهداشتی را بهبود بخشند، نتایج بیماران را بهینه‌سازی کنند و هزینه‌ها را کاهش دهند. نتایج نشان می‌دهد که این فناوری‌ها به ارائه مراقبت‌های بهداشتی با کیفیت بهتر، نظارت بر سلامت در زمان واقعی و تشخیص زودهنگام بیماری‌ها کمک می‌کنند. در نهایت، مقاله تأکید می‌کند که پیاده‌سازی سیستم‌های بهداشت هوشمند در کشورهای در حال توسعه می‌تواند به بهبود دسترسی و مقرون‌به‌صرفه بودن خدمات بهداشتی منجر شود و فشار بر مراکز درمانی را کاهش دهد.

الشریف و پوخارل (2022) به بررسی ابعاد مختلف و ابزارهای ارزیابی شهرهای هوشمند پرداخته و به اهمیت استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات در این شهرها اشاره می‌کند. همچنین، ریسک‌های فنی و غیرفنی مرتبط با پیاده‌سازی شهرهای هوشمند و تأثیر آن‌ها بر حریم خصوصی و امنیت را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این مرور ادبیات نشان می‌دهد که همه شهرهای هوشمند از تمامی ابعاد شهر هوشمند استفاده. مقاله همچنین به ارائه جهت‌گیری‌های تحقیقاتی برای طراحی، پیاده‌سازی و عملیات شهرهای هوشمند می‌پردازد و به اهمیت شاخص‌های کلیدی عملکرد در ارزیابی موفقیت این شهرها اشاره می‌کند.

دسته دوم مطالعاتی که به مدل‌سازی شاخص کلیدی عملکرد می‌پردازند.

فرناندس و همکاران (2024) به بررسی اهمیت حاکمیت شرکتی و تأثیر آن بر عملکرد سازمانی و کنترل داخلی مؤثر می‌پردازد. نویسندگان با تأکید بر دشواری‌های پیش‌رو در پذیرش یک نگرش حاکمیتی، به نقش معماری سازمانی در تسهیل تغییرات از طریق شناسایی و نقشه‌برداری از فرآیندها و داده‌ها اشاره می‌کنند. همچنین، شاخص‌های کلیدی عملکرد به‌عنوان نشانگرهای مؤثر برای فعالیت‌های سازمانی معرفی شده است. مقاله مفاهیم مربوط به مدل‌های حاکمیتی را ارائه می‌دهد و به مزایای پیاده‌سازی یک مدل حاکمیتی مناسب و ابزارهای ضروری برای توسعه آن می‌پردازد.

آلونسو-مارتینز و همکاران (2024) به بررسی راهکارهای پایدار در زنجیره‌های ارزش کشاورزی می‌پردازد تا مدل‌های کسب‌وکار کشاورزان را به سمت مدل‌های کسب‌وکار پایدار تبدیل کند. هدف اصلی مقاله ارائه چارچوبی برای

اجرای شیوه‌های کشاورزی پایدار است که شامل شیوه‌های مدیریتی، عوامل کلیدی و ذینفعان مربوطه از دیدگاه‌های مختلف و در چهار مرحله اصلی می‌باشد. همچنین، با استفاده از مرور ادبیات، ۱۳۳ شاخص کلیدی عملکرد پایدار (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) برای ارزیابی عملکرد پایداری مزارع ارائه شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که عوامل مختلفی می‌توانند بر تعهد مزارع به شیوه‌های پایدار تأثیر بگذارند، اما اهمیت این عوامل یکسان نیست و نقش ذینفعان نیز بسته به مرحله متفاوت است.

وَن دِ ون و همکاران (2023) به بررسی و تحلیل شاخص‌های کلیدی عملکرد مرتبط با مدل‌های کسب‌وکار پرداخته است. با توجه به اینکه تحقیقات موجود در این زمینه پراکنده و نامشخص هستند، پژوهشگران یک مرور سیستماتیک از ادبیات مربوطه انجام دادند و ۳۵ منبع مرتبط را شناسایی کردند. آنها این منابع را در یک ماتریس مفهومی که شامل پنج دسته مرتبط با مدل‌های کسب‌وکار و مدیریت شاخص‌ها است، طبقه‌بندی کردند. همچنین، شاخص‌های مدل کسب‌وکار موجود در ادبیات را به یک کاتالوگ منظم بر اساس ابعاد مدل کسب‌وکار تبدیل کردند.

کاردنَس رودریگز (2024) در پایان‌نامه‌ی دکتری، یک رویکرد نوین برای توسعه سیستم‌های پیچیده با استفاده از ادغام مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ارائه داده است. با توجه به مرزهای مبهم بین دنیاهای فیزیکی و دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم، این تحقیق بر اهمیت تحلیل دقیق سناریوها در طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌ها تأکید دارد. روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی مبتنی بر مهندسی سیستم به‌منظور کاهش ریسک‌های فنی و هزینه‌ها به‌کار می‌روند، اما هنوز دارای محدودیت‌هایی هستند. این پژوهش به بررسی و بهبود این روش‌ها بر اساس شاخص‌های کلیدی عملکرد پرداخته و یک چارچوب مدل‌سازی تعریف می‌کند که می‌تواند برای سیستم‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، با استفاده از یک مورد کاربردی در زیرساخت‌های محاسباتی لبه‌ای، به توضیح روش‌شناسی پیشنهادی پرداخته می‌شود که می‌تواند به بهبود عملکرد و تسریع فرآیند توسعه سیستم‌های پیچیده کمک کند.

دسته سوم مطالعات به پژوهش‌هایی در زمینه مدل‌سازی شهر هوشمند می‌پردازند.

وانگ و همکاران (2024) به بررسی نقش داده‌های دولتی آزاد در توسعه شهرهای هوشمند می‌پردازد و به‌طور خاص، این داده‌ها را به‌عنوان یک جزء حیاتی در مدل شهر هوشمند معرفی می‌کند. با استفاده از داده‌های شاخص تحول دیجیتال شهرهای چین در بازه زمانی 2022 تا 2024 و به‌کارگیری مدل‌سازی معادلات ساختاری، نویسندگان تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم داده‌ها، زیرساخت‌های دیجیتال و اقتصاد دیجیتال بر توسعه شهر هوشمند را تحقیق می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که زیرساخت‌های دیجیتال اثر مثبت و مستقیمی بر توسعه شهر هوشمند دارند، اما مسیرهای غیرمستقیم شامل داده‌های دولتی آزاد تأثیرات قوی‌تری دارند. این تحقیق به ادبیات مربوط به شهرهای هوشمند افزوده و داده‌های آزاد را به‌عنوان یک محرک کلیدی شناسایی می‌کند که با بهبود اقتصاد دیجیتال و زیرساخت‌های دیجیتال، به‌طور مستقیم به توسعه شهر هوشمند کمک می‌کند.

آنشوتز و همکاران (2024) به نیازهای شهرهای کوچک و متوسط در زمینه توسعه شهرهای هوشمند پرداخته و یک مدل بلوغ طراحی شده از طریق رویکرد علم طراحی ارائه می‌دهد. با توجه به اینکه این شهرها معمولاً در بررسی‌های علمی نادیده گرفته می‌شوند، این تحقیق به دنبال پشتیبانی از این شهرها برای تبدیل شدن به یک شهر هوشمند جامع است. نیازهای

این مدل از ادبیات مربوطه و مصاحبه‌های تخصصی استخراج شده است. این مدل به رهبران شهری کمک می‌کند تا مراحل بعدی توسعه شهر هوشمند خود را برنامه‌ریزی کنند.

رودریگز بولیوار و همکاران (2024) به بررسی فرآیند تبدیل شهرها به شهرهای هوشمند در کشورهای در حال توسعه و نوظهور آمریکای لاتین می‌پردازد. با تحلیل ابعاد مختلف، اهداف، تأثیرات اقتصادی و اجتماعی مورد نظر و زمان‌بندی‌های پیش‌بینی‌شده برای دستیابی به این اهداف، مطالعه نشان می‌دهد که راهبردهای شهری بسته به چالش‌های محلی متفاوت است. با استفاده از تحلیل خوشه‌ای و همبستگی کِندال، مقاله سه مدل مختلف حاکمیت را شناسایی می‌کند و ارتباطات متفاوتی بین اهداف اولویت‌دار و ابعاد هوشمند شهرها را نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق به درک بهتر و مدیریت بهینه فرآیند تبدیل شهرها به شهرهای هوشمند کمک می‌کند.

ارازو-گارسون و همکاران (2023) به بررسی اهمیت اینترنت اشیا به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تحول دیجیتال در جامعه پرداخته و تأثیرات مثبت آن بر کیفیت زندگی افراد را مورد تأکید قرار می‌دهد. با توجه به تولید حجم بالای داده‌ها و نیاز به انطباق مداوم اطلاعات، مقاله پیشنهاد می‌کند که مهندسی مدل‌رانده رویکرد مناسبی برای توسعه نرم‌افزار در اینترنت اشیا است. از آن‌جا که پیشنهادات محدودی برای زبان‌های خاص دامنه به‌منظور ایجاد داشبوردهای تحلیلی اینترنت اشیا وجود دارد، این مقاله یک زبان خاص دامنه و یک موتور تبدیل مبتنی بر مدل را برای طراحی و پیاده‌سازی خودکار برنامه‌های وب داشبورد ارائه می‌دهد. این راه‌حل جزئیات پیاده‌سازی داده‌های متنوع را از کارشناسان حوزه پنهان کرده و نتایج تجربی نشان می‌دهد که کاربران این راه‌حل را مفید و آسان برای استفاده می‌دانند و تمایل به استفاده از آن در آینده دارند.

باستیداس و همکاران (2022) در پژوهش خود مفاهیم مدل‌سازی شهرهای هوشمند را در زبان ArchiMate تعریف کرده‌اند که با رویکرد طراحی‌محور هدایت می‌شود. تمرکز آنها بر مدل‌سازی خدمات شهری و سیستم‌های اطلاعاتی است که به فرامدل معماری سازمانی افزوده شده و در یک مورد واقعی توسط کارشناسان شهر هوشمند تایید شده است تا تصمیمات معماری در تحول و دیجیتالی‌سازی خدمات عمومی را یاری کند.

سانکتیس و همکاران (2022) از تکنیک‌های مهندسی مدل‌رانده و از طریق زبان‌های خاص دامنه مبتنی بر فرامدل برای ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد از چارچوبی به نام MIKADO استفاده کرده‌اند. این چارچوب می‌تواند از متخصصان حوزه با تعریف یک زبان خاص دامنه متنی برای مدل‌سازی بصری شاخص‌های کلیدی عملکرد با تعریف ویرایشگرهای گرافیکی پشتیبانی کند. آنها از داشبوردهای پویا برای پشتیبانی از تجسم و تفسیر بصری شاخص‌های کلیدی عملکرد ارزیابی شده، توسط موتور ارزیابی استفاده کرده‌اند. این تحقیق نزدیک‌ترین موضوع را به راهکار پیشنهادی مقاله حاضر داشته و در بخش ارزیابی بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

4) روش تحقیق

با توجه به رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی، چالش‌هایی نظیر کنترل ترافیک، مدیریت پسماند، مدیریت مصرف انرژی، آلودگی هوا و کیفیت سلامت شهروندان از مهم‌ترین مسائل پیش‌روی شهرهای بزرگ هستند. همچنین، افزایش

جمعیت تأثیر مستقیمی بر کیفیت خدمات شهری از جمله حمل‌ونقل، تامین آب و برق، خدمات بهداشتی و آموزش داشته و بر پیچیدگی مدیریت شهری افزوده است. برای جلوگیری از کاهش کیفیت خدمات، ضروری است که داده‌های مربوط به هر خدمت به‌صورت مستمر پایش و مدیریت شوند. شاخص‌های کلیدی عملکرد شهر هوشمند به‌عنوان ابزاری برای جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها، می‌توانند برای ارزیابی وضعیت جاری شهر به‌کار گرفته شوند (گارسیاس و همکاران (2023)).

این تحقیق رویکردی مدل‌رانده را به‌منظور ساده‌سازی محاسبات و ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکردی پیشنهاد می‌دهد. این رویکرد با تمرکز بر کاهش پیچیدگی‌ها و زمان توسعه‌ی مدل، زبان مدل‌سازی خاص دامنه‌ای با عنوان SciMark[4] را توسعه داده که هسته‌ی آن فرامدل است. این فرامدل مفاهیم کلیدی زبان مدل‌سازی ویژگی‌ها و روابط میان آن‌ها را تشریح کرده و با استفاده از چارچوب مدل‌سازی اکلیپس پیاده‌سازی شده است که امکانات متنوعی برای تعریف زبان‌های مدل‌سازی و انجام تحلیل مدل‌ها و تولید کد فراهم می‌کند. زبان مدل‌سازی دارای سه جز اصلی است: 1) نحو انتزاعی که در قالب یک فرامدل با استفاده از چارچوب EMF طراحی می‌شود و مفاهیم مرتبط با شاخص‌های کلیدی عملکرد را دربرمی‌گیرد. 2) نحو عینی که نمایش گرافیکی مفاهیم نحو انتزاعی را تعریف می‌کند و با استفاده از ابزار سیریوس و در قالب یک ویرایشگر گرافیکی طراحی می‌شود. 3) معنای زبان که توابع محاسباتی هر شاخص را تعریف می‌کند و با استفاده از زبان شیء اپسیلون به‌صورت کد پیاده‌سازی می‌شود. فرآیند اعتبارسنجی مدل‌ها شامل اجرای مدل‌ها در چارچوب اپسیلون و بررسی خروجی‌های محاسباتی است. این فرآیند تضمین می‌کند که تمامی شاخص‌ها با داده‌های ورودی واقعی سازگار هستند و نتایج ارائه‌شده دقیق و قابل اعتمادند. استفاده از ابزارهای خودکارسازی مانند موتور اپسیلون، خطاهای انسانی را کاهش داده و سرعت تحلیل را افزایش می‌دهد.

در ادامه، هر جز زبان SciMark را با تفصیل بیشترمعرفی خواهیم کرد.

۱-۴) نحو انتزاعی

نحو انتزاعی SciMark در قالب یک فرامدل جامع برای تعریف و ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد در شهر هوشمند ارائه شده است که شامل مجموعه‌ای از مفاهیم مرتبط با ارزیابی شاخص‌ها است و مدل‌ها را به‌صورت سلسله‌مراتبی سازمان‌دهی می‌کند. شکل 1 فرامدل پیشنهادی را با ۳۹ کلاس و ۴ کلاس انتزاعی، شاخص‌های عملکردی را در سه بُعد محیط‌زیست، اقتصاد، و فرهنگ و جامعه دسته‌بندی کرده است. هر بُعد دارای انواع مختلف شاخص‌های عملکردی است و هر شاخص به مفاهیم خاص شهر هوشمند مرتبط می‌شود. شاخص‌ها با ویژگی‌های نام، مقدار و واحد تعریف شده‌اند و عملیات محاسبه‌ای آن‌ها با زبان شیء اپسیلون انجام می‌گیرد. این فرامدل که در چارچوب مدل‌سازی اکلیپس پیاده‌سازی شده، به‌طور دقیق مفاهیم شهر هوشمند و روابط آن‌ها را مدل‌سازی کرده و دیدگاهی کلی و شفاف از مدل مفهومی شهر هوشمند ارائه می‌دهد تا اطلاعات کلیدی هر مفهوم به‌طور دقیق تعریف شود. چارچوب مدل‌سازی اکلیپس (EMF) ابزاری استاندارد برای ایجاد، مدیریت و تحلیل مدل‌ها در مهندسی مدل‌رانده است. این چارچوب، امکان تعریف فرامدل‌ها و تولید

[4] عنوان SciMark از ترکیب sci برای Smart City و Mark برای KPI یا marker به معنای نشانگر یا شاخص گرفته شده است.

خودکار کدهای متناظر را فراهم می‌کند. از ویژگی‌های برجسته آن می‌توان به پشتیبانی از فرمت‌های مختلف مدل‌سازی، قابلیت تولید ویرایشگرهای گرافیکی و سازگاری با ابزارهای پیشرفته مانند سیریوس اشاره کرد.

فرامدل پیشنهادی شامل چندین فراکلاس است که عبارت‌اند از:

SmartCityRoot: این فراکلاس به‌عنوان ریشه‌ی اصلی فرامدل عمل می‌کند و دارای دو ویژگی «نام» و «توضیحات» است. این کلاس پایه‌ای برای ساختاردهی تمامی مفاهیم شهر هوشمند محسوب می‌شود.

KPIModel: این فراکلاس مفاهیم شهر هوشمند را از شاخص‌های کلیدی عملکرد جدا کرده و شامل فراکلاس Dimension به‌عنوان فراکلاسی دیگر است که دسته‌بندی‌های مختلف شاخص‌های کلیدی عملکرد را در خود جای می‌دهد.

KPI: فراکلاس KPI به‌عنوان یک فراکلاس انتزاعی برای انواع شاخص‌های کلیدی عملکرد تعریف شده و ویژگی‌های مشترک بین تمام شاخص‌ها را نگهداری می‌کند، بدون توجه به بُعدی که در آن قرار دارند.

KPIForEnvironment Concepts: این فراکلاس انتزاعی برای بُعد محیط زیست تعریف شده و شاخص‌های مرتبط با این بُعد را شامل می‌شود.

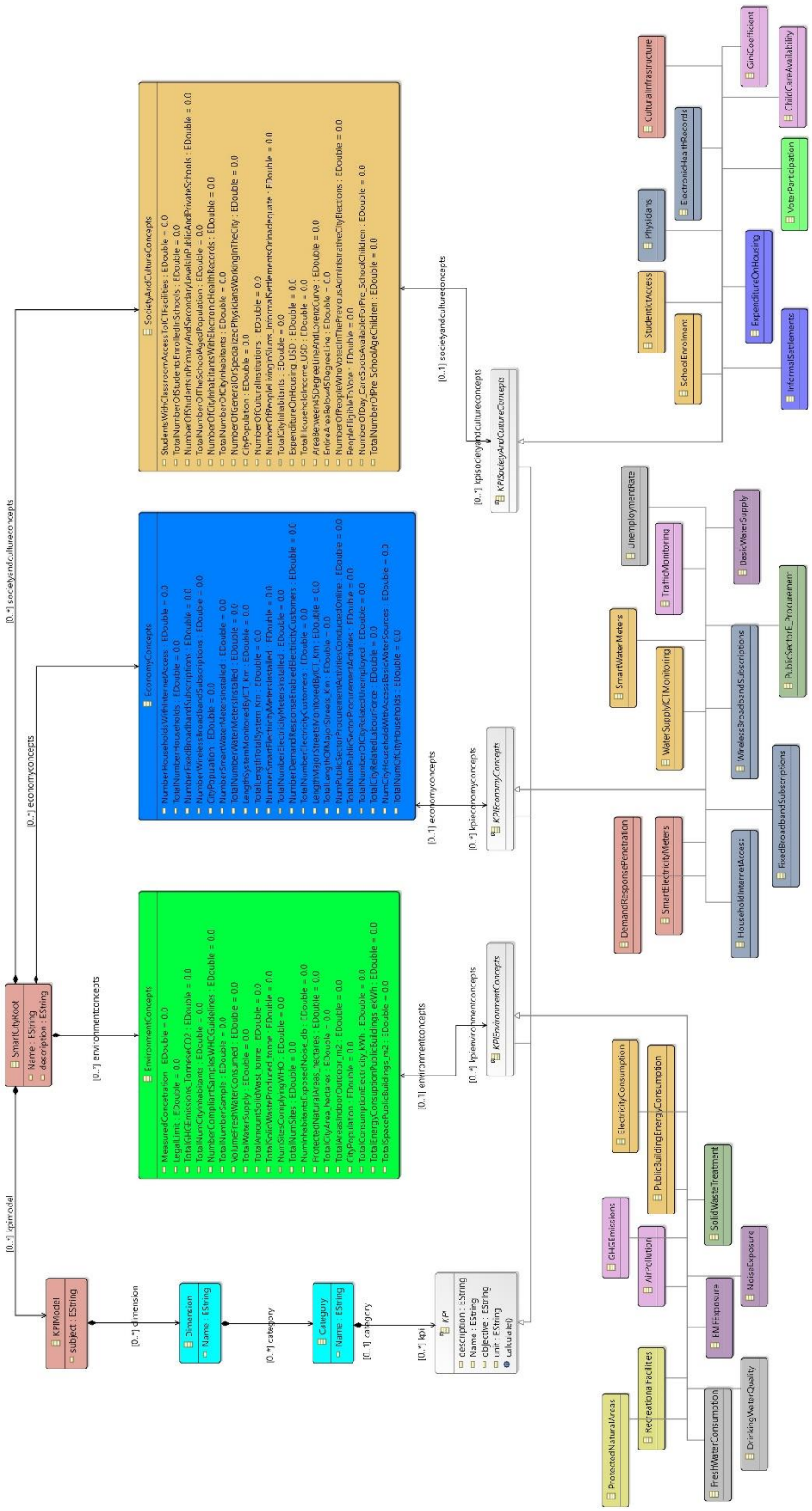
KPIForEconomy Concepts: این فراکلاس انتزاعی برای بعد اقتصاد تعریف شده و شاخص‌های اقتصادی مرتبط با شهر هوشمند را مدیریت می‌کند.

KPIForSocietyAndCulture Concepts: این کلاس انتزاعی برای بعد فرهنگ و جامعه تعریف شده است و شاخص‌های اجتماعی و فرهنگی را در بر می‌گیرد.

هر یک از این فراکلاس‌ها، به بُعد خاصی از شاخص‌های کلیدی عملکرد مرتبط بوده و روابط دوطرفه‌ای با کلاس‌های مفاهیم خاص شهر هوشمند دارند که امکان تعریف توابع محاسباتی را فراهم می‌سازد.

فراکلاس‌های فرعی EnvironmentConcepts، EconomyConcepts و SocietyAndCultureConcepts به‌ترتیب، مفاهیم شهر هوشمند مربوط به ابعاد محیط زیست، اقتصاد و فرهنگ و جامعه را نگهداری می‌کنند. هر یک از این فراکلاس‌ها با کلاس‌های KPIForEnvironment، KPIForEconomy و KPIForSocietyAndCulture رابطه دوطرفه‌ای دارند که امکان تعریف و اجرای توابع محاسباتی را تسهیل می‌کند.

فرامدل پیشنهادی از ساختاری سلسله‌مراتبی برخوردار است که به‌طور دقیق مفاهیم شاخص‌های کلیدی عملکرد و روابط آن‌ها را مدل‌سازی می‌کند. این ساختار از سه بخش اصلی تشکیل شده است: 1) نحو انتزاعی که به تعریف ویژگی‌های مفاهیم می‌پردازد، 2) نحو عینی که نمایش گرافیکی مدل‌ها را ارائه می‌دهد و 3) معنا که قواعد اجرایی و محاسباتی هر شاخص را مشخص می‌کند. این تقسیم‌بندی موجب کاهش پیچیدگی مدل‌سازی و افزایش قابلیت درک مدل‌ها برای کاربران می‌شود.

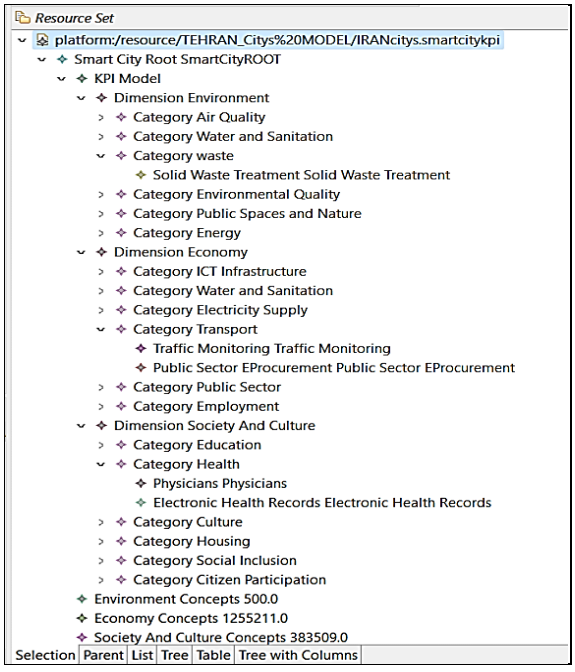


شکل 1. فرامدل شاخص‌های کلیدی عملکرد در شهر هوشمند

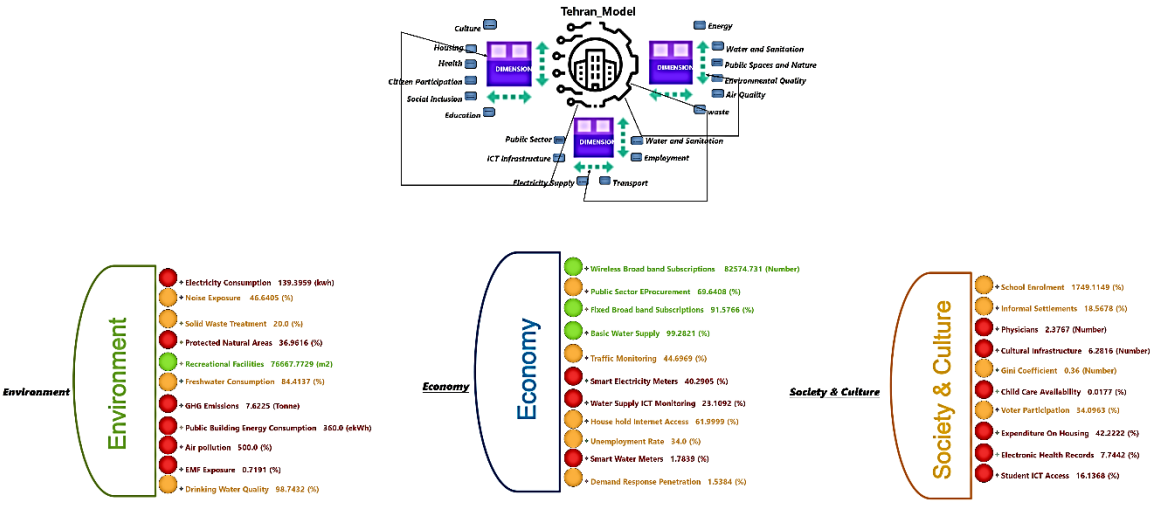
۲-۴) نحو عینی

برای بهره‌برداری مؤثر از هر زبان مدل‌سازی وجود یک ویرایشگر مناسب ضروری است، به‌ویژه زمانی که سرعت تولید و کیفیت نمایش گرافیکی از اهمیت بالایی برخوردار باشند. در این راستا ویرایشگر گرافیکی شاخص‌های کلیدی عملکرد برای شهر هوشمند که با ابزار سیریوس در محیط اکلیپس پیاده‌سازی شده است، به‌دلیل امکانات کاربرپسند و قابلیت‌های بصری مطلوب، انتخاب مناسبی برای متخصصان است. چارچوب سیریوس ابزاری قدرتمند برای ایجاد ویرایشگرهای گرافیکی در محیط اکلیپس است. این چارچوب به کاربران امکان می‌دهد تا مدل‌ها را با استفاده از نمایش‌های بصری مختلف طراحی و تحلیل کنند. ویژگی‌های کلیدی آن شامل قابلیت شخصی‌سازی کامل، پشتیبانی از قوانین نمایش شرطی، و امکان ترکیب چندین دیدگاه گرافیکی در یک مدل واحد است.

در زبان مدل‌سازی SciMark نیز، از نمادهای گرافیکی که با الهام از شکل واقعی عناصر طراحی شده، بهره گرفته شده است. این عناصر گرافیکی در ویرایشگر به‌کار گرفته شده‌اند تا فرآیند مدل‌سازی را تسهیل کنند و به دقت عملکرد طراحی بیفزایند. شکل 2 نمایی از مدل درختی (غیرگرافیکی) و مدل گرافیکی را نشان می‌دهد. برای ساده‌تر کردن موضوع تشخیص وضعیت محاسبه شده در زمان اجرا، برای هر کدام از شاخص‌های کلیدی عملکرد هدف تحت تأثیر را به‌صورت بصری، رنگ نشانگر(دایره) و اسم آن را در سه رنگ با معنای متفاوت قرار داده‌ایم. سبز: حالت عادی و خوب (بی‌خطر)، نارنجی: حالت نسبتاً عادی (متوسط) و قرمز: حالت غیرعادی و بد (خطرناک) را نشان می‌دهد. وضعیت قرمز به حکمرانان شهر و مسئولین مربوطه هشدار می‌دهد تا نسبت به رفع این مشکل اقداماتی انجام بدهند.



(الف)



(ب)

شکل 2. (الف) مدل درختی- (ب) مدل

۳-۴) معنای زبان

در اینجا معنای زبان مدل‌سازی، یعنی نحوه محاسبه‌ی شاخص‌های کلیدی عملکرد است. برای تعریف معنا، از زبان شیء اپسیلون (EOL) که اصلی‌ترین زبان چارچوب اپسیلون است، استفاده کرده‌ایم. زبان شیء اپسیلون (EOL) یکی از زبان‌های اصلی چارچوب اپسیلون است که برای عملیات مختلف روی مدل‌ها طراحی شده است. این زبان، قابلیت‌هایی مانند تعریف توابع محاسباتی، تبدیل مدل‌ها به یکدیگر و اجرای پرس‌وجوهای پیچیده را فراهم می‌کند. نحو شبیه به زبان‌های برنامه‌نویسی شیءگرا و دسترسی آسان به ویژگی‌های مدل، این زبان را به ابزاری مناسب برای خودکارسازی فرایندهای مدل‌سازی تبدیل کرده است.

در جدول 1 گزیده‌ای از توابع فراخوانی شده مربوط به محاسبه شاخص‌های کلیدی عملکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول 1. توابع EOL متناظر با شاخص‌های کلیدی عملکرد

شاخص کلیدی عملکرد	کد EOL

Air Pollution
میزان آلودگی هوا
	var A=SmartCity!AirPollution.all.first();
	A.calculate().println();
	operation SmartCity!AirPollution calculate(){
	"This is the AirPollution KPI calculation".println();
	var env = *self*.environmentconcepts;
	var AirPollution= env.MeasuredConcetration/env.LegalLimit *100;
	"unit-> m3".println();
	self.Value= AirPollution;
	return AirPollution;
	}

GHG Emissions
انتشارگازهای گلخانه‌ای
	var B=SmartCity!GHGEmissions.all.first();
	B.calculate().println();
	operation SmartCity!GHGEmissions calculate(){
	"This is the GHGEmissions KPI calculation".println();
	var env = *self*.environmentconcepts;
	var ghgEmissions= env.TotalGHGEmissions_TonneseCO2 /env.TotalNumCityInhabitants;

"unit-> Tonnes eCO2/capita".println(); *self*.Value= GHGEmissions; **return** ghgEmissions;}	

var C=SmartCity!EMFExposure.all.first();
C.calculate().println();
operation SmartCity!EMFExposure calculate(){
"This is the EMFExposure KPI calculation".println();
var env = *self*.environmentconcepts;
var EMFExposure= env.NumSitesComplyingWHO /env.TotalNumberSites*100;
"unit-> Percentage".println();
self.Value= EMFExposure;
return EMFExposure;}
	EMF Exposure
	در معرض میدان مغناطیسی

برای درک بهتر توابع نوشته شده در جدول 1 به‌عنوان نمونه، نسبت به تشریح تابع دستوری شاخص کلیدی عملکرد انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGEmissions) می‌پردازیم. در زبان شیء اپسیلون EOL باید قبل از تعریف تابع آن را فراخوانی کرد تا از این طریق بتواند اجرا شود، دو خط اول قطعه کد برای فراخوانی تابع مورد نظر و چاپ نتیجه آن استفاده می‌شود. تابع calculate ابتدا پیامی را برای شروع محاسبه چاپ می‌کند و سپس از متغیرهای موجود در شیء environmentconcepts استفاده می‌کند. این تابع با تقسیم مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای (TotalGHGEmissions_TonnesCO2) بر تعداد کل ساکنان شهر (TotalNumCityInhabitants) مقدار شاخص را محاسبه می‌کند. سپس واحد محاسبه (تن eCO2 بر سرانه) چاپ می‌شود و مقدار محاسبه‌شده به‌عنوان Value ذخیره و بازگردانده می‌شود. توابع تعریف‌شده با زبان شیء اپسیلون برای خودکارسازی محاسبات و ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد شهر هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند. این توابع از طریق یک موتور ارزیابی مبتنی بر EOL پیاده‌سازی شده‌اند که محاسبات لازم را روی مدل بارگذاری‌شده اجرا می‌کند. مدل به‌عنوان ورودی در افزونه EOL در محیط اکلیپس بارگذاری می‌شود و نتایج محاسبات در بخش خروجی Console برنامه نمایش داده می‌شوند. این توابع که به بُعد محیط اختصاص دارند، ارزیابی کاملی از شاخص‌های کلیدی عملکرد مرتبط با شهر هوشمند ارائه می‌دهند و امکان محاسبه دقیق و سریع این شاخص‌ها را فراهم می‌کنند. پس از انجام محاسبات رنگ شاخص‌ها در مدل گرافیکی تغییر می‌کند. مواردی که بی‌خطر هستند به رنگ سبز و مواردی که خطرناک شناخته می‌شوند، به رنگ قرمز درمی‌آیند.

5) یافته‌ها

ارزیابی در این پژوهش در دو بخش انجام شده است: اول، مطالعه موردی شهر تهران و دوم، مقایسه با زبان مدل‌سازی MIKADO (سانکتیس و همکاران (2022)). هدف از این تقسیم‌بندی، بررسی دقت و کارایی زبان مدل‌سازی SciMark در شرایط واقعی و همچنین ارزیابی مزایا و نقاط قوت آن نسبت به یک زبان مدل‌سازی مشابه است. بخش 5-1 به تحلیل و ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد با داده‌های واقعی می‌پردازد، در حالی که بخش 5-2، به مقایسه کیفیت و کارایی زبان پیشنهادی با زبان مدل‌سازی MIKADO اختصاص دارد تا به وضوح قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن مشخص شود.

۵–۱) نمونه مورد مطالعه (شهر تهران)

جهت ارزیابی دقیق شاخص‌های کلیدی عملکرد طوری که به اعداد و ارقام واقعی نزدیک باشند، برای تمامی مفاهیم شهر هوشمند بازه تقریبی عددی مشخص که از درگاه ملی آمار[۵] و سامانه اطلاعات آماری استان تهران[۶] به‌دست آمده‌اند، در قالب سه فرمول محاسبه (حد پایین، حد متوسط و حد بالا) در نظر گرفته شد. بدین منظور، از دستورات شرطی Conditional Style استفاده شده است. به‌عنوان مثال، دستور شرطی شاخص کلیدی عملکرد GHG Emissions را در جدول 2 را شرح می‌دهیم. هرکدام از این شرط‌ها محدوده مشخصی برای اجرا شدن دارد، در صورتی که شرط خط اول برقرار شد، یعنی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر از 3/99 تن در سال باشد رنگ سبز را مقابل نام این شاخص نمایش می‌دهد، در صورتی که مقدار وارد شده عددی بین 3/1 الی 5/54 باشد حد وسط هشدار فعال می‌شود و رنگ نارنجی را به کاربر نمایش می‌دهد و در صورتی که شرط سوم برقرار شد یعنی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشتر از 55/5 تن درسال رسید، هشدار قرمز فعال می‌شود.

جدول 2. دستورات شرطی به زبان aql استفاده شده در ابزار سیریوس

```
Conditional Style aql:self.value <= 3.99
Conditional Style aql:self.value > 3. 99 and (self.value <5.55)
Conditional Style aql:self.value >= 5.55
```

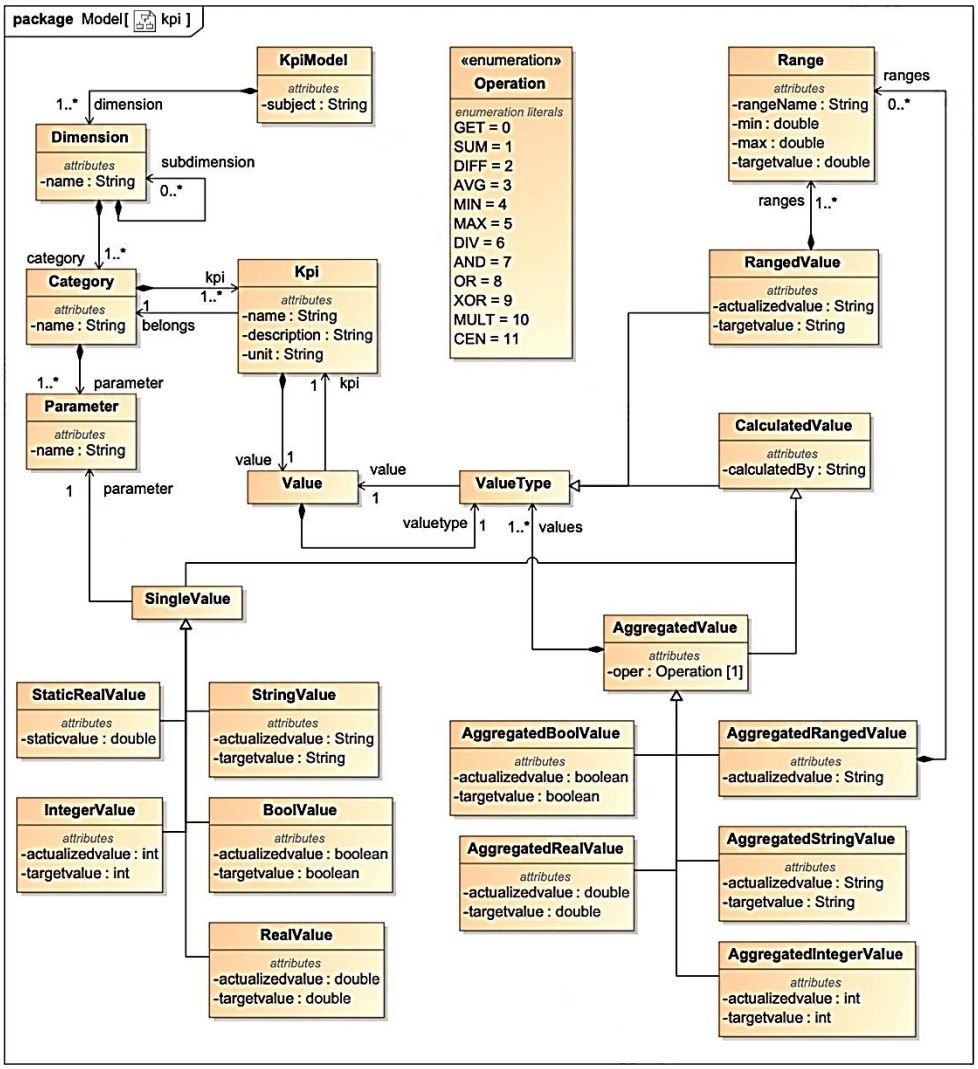
شکل 2–ب که پیش از این نمایش داده شده بود، مربوط به مدل شاخص‌های کلیدی عملکرد شهر تهران می‌باشد. بر اساس شکل ارائه شده، نتایج ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد در ابعاد مختلف مدل شهر هوشمند تفسیر شده است. این شاخص‌ها در سه بُعد اصلی محیط، اقتصاد و جامعه و فرهنگ طبقه‌بندی شده‌اند. در بخش محیط، شاخص‌های مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا، نویز شهری و مواجهه با میدان‌های مغناطیسی وضعیت‌های مختلفی از بحرانی تا نسبتاً عادی را نشان می‌دهند. برای مثال، انتشار گازهای گلخانه‌ای با مقدار 7,622.5 تن و رنگ قرمز نشان‌دهنده وضعیت بحرانی است، در حالی‌که شاخص بازیافت زباله‌های خشک با مقدار 20 درصد و رنگ نارنجی وضعیت نسبتاً عادی را گزارش می‌کند. در بخش اقتصاد، شاخص‌ها به ارزیابی وضعیت‌هایی مانند مصرف انرژی و میزان تولید می‌پردازند و وضعیت‌های مختلف از جمله هشدارها و سطح مصرف انرژی زیاد را مشخص می‌کنند. در بخش جامعه و فرهنگ نیز، شاخص‌هایی مانند کیفیت آب آشامیدنی و مساحت فضاهای فرهنگی و اجتماعی بررسی شده‌اند. به‌عنوان مثال، کیفیت آب آشامیدنی با مقدار 98.7532 درصد و رنگ نارنجی وضعیت نسبتاً عادی را نشان می‌دهد، در حالی‌که مساحت اماکن فرهنگی با رنگ سبز وضعیت مطلوبی را ارائه می‌دهد. این مدل بصری به کاربران امکان می‌دهد تا وضعیت شاخص‌های مختلف را به سرعت و به‌صورت رنگی مشاهده و تحلیل کنند.

۵–۲) مقایسه با زبان مدل‌سازی MIKADO

فرامدل شاخص کلیدی عملکرد MIKADO در شکل 3 نشان داده شده است (سانکتیس و همکاران (2022)). در بالاترین سطح، کلاس KpiModel قرار دارد که موضوع شاخص را مشخص می‌کند و به کلاس Dimension مرتبط است. کلاس

[5] https://amar.org.ir/
[6] https://amar.thmporg.ir/

Dimension دارای سلسله مراتبی از زیربعدها بوده و به کلاس Category متصل است. Category شامل شاخص‌های عملکردی است که در قالب کلاس Kpi نمایش داده می‌شوند. هر KPI به یک یا چند Parameter وابسته است که نام پارامتر را در خود ذخیره می‌کند. برای هر KPI، یک مقدار وجود دارد که از طریق کلاس ValueType به انواع مختلف مقادیر مرتبط می‌شود. کلاس‌های مختلفی برای نمایش انواع مقادیر وجود دارد، از جمله SingleValue برای مقادیر ساده و AggregatedValue برای مقادیر تجمیع شده که عملیات مختلفی مانند جمع، تفریق و میانگین‌گیری را از طریق نوع داده‌ای Operation انجام می‌دهد. مقادیر همچنین می‌توانند از انواع رشته‌ای، عدد صحیح، بولی و حقیقی باشند، که هرکدام ویژگی‌های actualizedvalue و targetvalue را در خود دارند. به علاوه، فرامدل امکان تعیین محدوده‌های معتبر برای KPIها را از طریق کلاس Range و کلاس مشتق‌شده RangedValue فراهم می‌کند که حداقل و حداکثر مقادیر و همچنین مقدار هدف را مشخص می‌کند. در نهایت، کلاس CalculatedValue نیز برای مقادیری استفاده می‌شود که با محاسبات خاصی تولید می‌شوند و منبع محاسبه آنها در ویژگی calculatedBy تعیین می‌شود.



شکل 3. فرامدل MIKADO (سانکتیس و همکاران (2022))

در مقایسه با فرامدل MIKADO، فرامدل SciMark، به‌دلیل ساختار دقیق‌تر و تقسیم‌بندی مفصل‌تر مزایای متعددی دارد. در فرامدل SciMark، شاخص‌های کلیدی عملکرد به سه دسته اصلی EnvironmentConcepts، EconomyConcepts و SocietyAndCultureConcepts تقسیم شده‌اند. هر یک از این دسته‌ها شامل ویژگی‌ها و مفاهیم تخصصی در زمینه‌های مربوطه هستند که امکان مدیریت و تحلیل جامع‌تر شاخص‌ها را فراهم می‌کند. از جمله مزایای دیگر این فرامدل، ارتباطات مشخص‌تر میان مفاهیم و دسته‌ها است که از طریق کلاس‌های واسط مانند KPIEnvironmentConcepts، KPIEconomyConcepts و KPISocietyAndCultureConcepts ایجاد شده‌اند. این ارتباطات موجب انعطاف‌پذیری بیشتر در افزودن یا تغییر شاخص‌ها در هر دسته می‌شوند و تحلیل حوزه‌های مختلف شهر هوشمند را آسان‌تر می‌کنند. یکی از مزایای برجسته فرامدل SciMark نسبت به MIKADO، طراحی پیمانه‌ای و ساختاردهی دقیق‌تر شاخص‌ها در قالب دسته‌بندی‌های تخصصی است. این ویژگی باعث شده است که تحلیل و مدیریت شاخص‌های کلیدی عملکرد در زمینه‌های مختلف شهری آسان‌تر انجام شود. با این حال، محدودیت اصلی فرامدل پیشنهادی در عدم امکان تعریف محاسبات پویا و انعطاف‌پذیر مشابه MIKADO است. این موضوع به‌دلیل استفاده از فرمول‌های از پیش تعریف‌شده رخ داده است که هرچند دقت و سرعت را افزایش می‌دهد، اما ممکن است در شرایط خاص، محدودیت‌هایی برای توسعه‌دهندگان ایجاد کند.

در مقابل، در فرامدل SciMark، فرآیند مدل‌سازی بهینه‌تر و سریع‌تر شده است، زیرا مدل‌های ساخته شده بر اساس این فرامدل به‌دلیل ساختارهای پیمانه‌ای و دسته‌بندی‌های تخصصی، به مراتب کوچک‌تر از مدل‌های فرامدل MIKADO هستند. این ساختار به کاهش زمان مورد نیاز برای مدل‌سازی کمک می‌کند، چرا که بسیاری از شاخص‌های کلیدی عملکرد به‌صورت خودکار در قالب‌های از پیش تعریف شده سازماندهی شده‌اند.

از مزیت‌های اصلی دیگر این فرامدل، تعریف خودکار فرمول شاخص‌هاست. در فرامدل اول، مدل‌ساز می‌بایست فرمول محاسبه هر شاخص را به‌طور دستی طراحی کند، که این فرآیند هم به دانش تخصصی بالاتر و هم زمان بیشتری نیاز دارد. در مقابل، فرامدل پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده که فرمول شاخص‌ها به‌صورت پیش‌فرض و خودکار تعریف می‌شود، که این امر دقت محاسبات را افزایش داده و خطاهای انسانی را به حداقل می‌رساند.

مطالعات زیادی روی سنجش کمّی معیارهای کیفی نرم‌افزاری شده است (رضائی و زاهدی (1401)). جهت ارزیابی زبان مدل‌سازی ارائه شده در این پژوهش، مقایسه‌ای بر اساس سه معیار قابلیت نگهداشت[۷]، درک‌پذیری[۸] و توسعه‌پذیری[۹] (بیتینی و همکاران (2019)) با زبان مدل‌سازی MIKADO انجام خواهیم داد. فرمول سه معیار در جدول 3 آمده است.

[7] Maintainability
[8] Understandability
[9] Extendibility

جدول 3. معیارهای کیفیت نرم‌افزار (بیتینی و همکاران (2019))

معیار	فرمول
قابلیت نگهداشت	$\frac{NC + NA + NR + DIT_{Max} + Fanout_{Max}}{5}$
درک پذیری	$\frac{\sum_{K=1}^{NC} PRED + 1}{NC}$
توسعه‌پذیری	$\frac{\text{INHF}}{\text{NTF}}$

قابلیت نگهداشت به‌عنوان میانگین معیارهای طراحی سطح پایین تعریف می‌شود که در آن NC، NA و NR به‌ترتیب تعداد کلاس‌ها، تعداد صفات و تعداد روابط فرامدل می‌باشد. همچنین DITmax و Fanoutmax بیشترین عمق درخت وراثت و بیشترین تعداد کلاس‌های مرجع شده توسط یک کلاس هستند. *مقدارهای پایین‌تر* نشان‌دهنده قابلیت نگهداشت بهتر است. درک‌پذیری به‌عنوان میانگین تعداد نودهای قبلی در سلسله مراتب وراثت تعریف می‌شود، که در آن PRED تعداد نودهای قبلی در سلسله مراتب وراثت برای یک کلاس مشخص تعریف می‌شود. *مقدارهای بالاتر* نشان‌دهنده طراحی درک‌پذیرتر است. در فرمول توسعه‌پذیری، INHF تعداد ویژگی‌های وراثتی و NTF کل تعداد ویژگی‌ها تعریف می‌شود. *مقدارهای بالاتر* نشان‌دهنده درجه بالاتری از توسعه‌پذیری است. مقادیر معیارهای معرفی شده برای فرامدل SciMark و فرامدل MIKADO در جدول 4 نشان داده شده است. این جدول مقایسه‌ای بین فرامدل پیشنهادی و MIKADO ارائه می‌دهد و تفاوت‌های کلیدی آن‌ها را بر اساس معیارهای نگهداشت، درک‌پذیری، و توسعه‌پذیری برجسته می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که فرامدل پیشنهادی در دو معیار اول عملکرد بهتری دارد، اما توسعه‌پذیری بیشتری در MIKADO مشاهده می‌شود.

جدول 4. مقایسه سه معیار برای فرامدل SciMark و MIKADO

MIKADO	SciMark	
42	**43**	NC
21	**10**	NR
65	**59**	NA
4	**2**	Fanoutmax
9	**11**	DITmax
101	**204**	NTF
25	**39**	∑PREDc
16	**4**	INHF
28	**25**	قابلیت نگهداری
0/87	**0/020**	توسعه‌پذیری
0/62	**0/93**	درک‌پذیری

در مقایسه قابلیت نگهداری، فرامدل SciMark نسبت به MIKADO کیفیت بهتری دارد. هرچه مقدار این معیار کمتر باشد، نگهداری فرامدل ساده‌تر خواهد بود. در معیار درک‌پذیری، فرامدل پیشنهادی درک‌پذیری بالاتری نسبت به MIKADO دارد. این نتیجه در راستای اهداف مهندسی مدل‌رانده است. در بررسی توسعه‌پذیری، MIKADO نسبت به فرامدل SciMark توسعه‌پذیرتر است. این موضوع نشان می‌دهد که بهبود توسعه‌پذیری فرامدل SciMark در آینده ضروری است. این موضوع البته بدین علت است که در فرامدل MIKADO امکان تعریف هر نوع محاسبه‌ای برای شاخص کلیدی عملکرد وجود دارد. در حالی که، در فرامدل پیشنهادی شاخص‌ها از پیش تعریف شده‌اند. برای بهبود این امر می‌توان برای تعریف شاخص‌های جدید، مفاهیم محاسبه را مانند فرامدل MIKADO به فرامدل پیشنهادی نیز اضافه کرد. پیشنهاد می‌شود که در توسعه‌های آتی، از ترکیب رویکرد تعریف خودکار شاخص‌ها با قابلیت تعریف محاسبات پویا استفاده شود. این کار می‌تواند با اضافه کردن سازوکارهایی برای تولید فرمول‌های جدید توسط کاربران و یا استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی الگوهای محاسباتی بهینه، انجام شود. این تغییرات می‌تواند به افزایش انعطاف‌پذیری فرامدل و ارتقای قابلیت‌های آن در محیط‌های متغیر شهری کمک کند.

6) نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این بخش شامل جمع‌بندی، محدودیت‌های روش و پیشنهاداتی برای کارهای آتی می‌شود.

۱-۶) جمع‌بندی

این پژوهش با هدف ارائه یک رویکرد نوین برای تعریف و ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد در شهرهای هوشمند، از روش مهندسی مدل‌رانده استفاده کرده است. در این رویکرد، یک زبان مدل‌سازی خاص دامنه با نام SciMark توسعه داده شده که با استفاده از چارچوب مدل‌سازی اکلیپس و ابزارهایی مانند ویرایشگر گرافیکی سیریوس و زبان شیء اپسیلون پیاده‌سازی شده است. این زبان مدل‌سازی از طریق فرامدل ساختاریافته خود، امکان تعریف شاخص‌های کلیدی عملکرد به‌صورت دقیق، ساختاریافته و خودکار را فراهم کرده و دقت و سرعت فرآیندهای مدل‌سازی و ارزیابی را افزایش داده است.

ویژگی‌های این رویکرد شامل کاهش زمان توسعه، کاهش پیچیدگی محاسبات، و افزایش دقت در ارزیابی شاخص‌ها است. علاوه بر این، نمایش گرافیکی نتایج محاسبات، دسترسی سریع‌تر و درک بهتر کاربران را فراهم می‌کند. این پژوهش با ارائه زبانی برای مدل‌سازی شاخص‌های کلیدی عملکرد، بستر جدیدی برای تحلیل و تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت شهری ایجاد کرده است که می‌تواند به مدیران شهری در تحلیل وضعیت موجود و برنامه‌ریزی برای آینده کمک کند. زبان مدل‌سازی SciMark به مدیران شهرهای هوشمند کمک می‌کند تا به‌صورت خودکار و دقیق شاخص‌های مربوط به هوشمندی و پایداری شهر را محاسبه و ارزیابی کنند. نتایج محاسبات به‌صورت گرافیکی نمایش داده می‌شود تا کاربران بتوانند در یک نگاه وضعیت فعلی شاخص‌ها را مشاهده و در صورت لزوم اقدامات مناسب را انجام دهند. رویکرد پیشنهادی می‌تواند با کاهش خطاهای انسانی و سرعت‌بخشیدن به ارزیابی‌ها، نیازهای مدیران شهری برای تحلیل‌های دقیق و واکنشی

در محیط‌های پیچیده را برطرف سازد. این روش امکان ارزیابی و مقایسه شاخص‌ها بین شهرهای مختلف را نیز فراهم کرده و به مدیران در تصمیم‌گیری‌های راهبردی کمک می‌کند.

۶-۲) محدودیت‌های روش پیشنهادی

با وجود مزایای قابل‌توجه، روش پیشنهادی دارای محدودیت‌هایی است که باید در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد. مهم‌ترین محدودیت این رویکرد، عدم امکان تعریف محاسبات پویا و انعطاف‌پذیر مشابه با فرامدل MIKADO است. دلیل اصلی این محدودیت، استفاده از فرمول‌های از پیش تعریف‌شده برای شاخص‌ها است که هرچند سرعت و دقت را افزایش می‌دهد، اما انعطاف‌پذیری لازم برای تعریف شاخص‌های جدید یا اعمال تغییرات خاص را کاهش می‌دهد.

این موضوع به‌ویژه در شرایطی که نیاز به تعریف شاخص‌های عملکردی با محاسبات غیرقابل پیش‌بینی وجود دارد، ممکن است محدودیت‌هایی برای توسعه‌دهندگان و مدیران شهری ایجاد کند. بنابراین، این محدودیت می‌تواند گسترش‌پذیری این چارچوب را تحت تأثیر قرار دهد و نیازمند توجه جدی در توسعه‌های آتی است.

۶-۳) پیشنهادات برای کارهای آتی

برای غلبه بر محدودیت‌های ذکرشده، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آتی بر روی توسعه‌ی قابلیت‌های پویای این چارچوب متمرکز شوند. در این راستا، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند به شناسایی و تولید خودکار فرمول‌های جدید کمک کند و ابزارهایی برای تعریف فرمول‌ها توسط کاربران بدون نیاز به دانش کدنویسی فراهم آورد. ترکیب روش تعریف خودکار شاخص‌ها با قابلیت‌های پویا مشابه فرامدل MIKADO می‌تواند انعطاف‌پذیری و قابلیت تطبیق چارچوب را افزایش دهد.

با استفاده از مدل‌های گرافیکی، می‌توان به مقایسه‌ی شهرهای هوشمند مختلف پرداخته و آن‌ها را براساس مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی عملکرد ارزیابی نمود. این امکان به مدیران شهری اجازه می‌دهد تا سطح هوشمندی و میزان پیشرفت شهرهای مختلف را در یک رتبه‌بندی به تصویر بکشند و از نمایش داده‌های مقایسه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های راهبردی بهره گیرند. مسیرهای تحقیقاتی آتی می‌توانند نقشی کلیدی در گسترش قابلیت‌های زبان مدل‌سازی پیشنهادی ایفا کنند و امکان استفاده از آن را در محیط‌های مختلف شهری و مدیریتی فراهم آورند. این گسترش می‌تواند شامل تحلیل داده‌های تاریخی، پیش‌بینی رفتار سیستم‌های شهری و تطبیق با شرایط پویای محیط باشد.

در گام بعدی، پایش و پیش‌بینی پیوسته شاخص‌های کلیدی عملکرد به‌عنوان یک بخش دیگر از برنامه‌های آتی مورد توجه است. بدین‌منظور، می‌توانیم رویکرد فعلی را به‌گونه‌ای توسعه دهیم که به‌صورت پیوسته، مقادیر شاخص‌های کلیدی عملکرد را از منابع داده باز و سرویس‌های وب به‌روزرسانی کرده و ارزیابی‌ها را به‌طور دوره‌ای یا واکنشی انجام دهد. این امر به همراه پیش‌بینی مقادیر شاخص‌ها بر اساس داده‌های واقعی و تخمینی، مدل‌های پیش‌بینی ایجاد کرده و دقت ارزیابی را افزایش خواهد داد.

همچنین، شبیه‌سازی و تحلیل روابط بین شاخص‌های کلیدی از دیگر زمینه‌های پژوهش آتی است که با استفاده از ابزارهای مدل‌سازی، می‌توان مدل‌های توصیفی و پیش‌بینی‌کننده‌ای از شهر را ایجاد کرد. این زیرساخت می‌تواند به مدیران کمک

کند تا تاثیر تغییرات شهری، مانند معرفی روش‌های جدید حمل‌ونقل، را بر شاخص‌های کلیدی مختلف شبیه‌سازی و ارزیابی کنند.

یکی از مسیرهای مهم برای پژوهش‌های آینده، افزودن قابلیت تعریف و مدیریت محاسبات پویا به فرامدل پیشنهادی است. این تغییر نه تنها انعطاف‌پذیری مدل‌سازی را افزایش می‌دهد، بلکه امکان پاسخگویی به نیازهای خاص و پویا در شهرهای هوشمند را نیز فراهم می‌سازد. افزودن قابلیت‌های پویا به فرامدل پیشنهادی، راه را برای استفاده از آن در شرایط پیچیده‌تر شهری هموار می‌سازد و ابزارهایی برای تحلیل‌های پیشرفته‌تر و شبیه‌سازی‌های بلادرنگ فراهم می‌آورد.

منابع

Al Sharif, R., & Pokharel, S. (2022). Smart city dimensions and associated risks: Review of literature. Sustainable cities and society, 77, 103542. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103542

Alonso-Martínez, D., Jiménez-Parra, B., & Cabeza-García, L. (2024). Theoretical framework to foster and assess sustainable agriculture practices: Drivers and key performance indicators. Environmental and Sustainability Indicators, 23, 100434. https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100434

Anschütz, C., Ebner, K., & Smolnik, S. (2024). Size does matter: A maturity model for the special needs of small and medium-sized smart cities. Cities, 150, 104998. https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104998

Baradaran Kazemzadeh, R. (2023). Investigating the impact of implementation ISO 9000 on Inventory of Supply Chain. *Engineering Management and Soft Computing*, *9*(1), 189-203. doi: 10.22091/JEMSC.2022.7795.1164 (in Persian)

Bastidas, V., Reychav, I., Ofir, A., Bezbradica, M., & Helfert, M. (2022). Concepts for modeling smart cities: An ArchiMate extension. *Business and Information Systems Engineering*, *64*(3), 359–373. https://doi.org/10.1007/s12599-021-00715-1

Belaid, F., Ramdani, B., & Abdellatif, M. (2024). Can Smart Cities Be Sustainable? An Emerging Field of Research. *Journal of Urban Technology*, 1–22. https://doi.org/10.1080/10630732.2024.2352992

Bettini, L., Di Ruscio, D., Iovino, L., & Pierantonio, A. (2019). Quality-driven detection and resolution of metamodel smells. IEEE Access, 7, 16364-16376. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891357

Brambilla, M., Cabot, J., & Wimmer, M. (2017). *Model-driven software engineering in practice*. Morgan & Claypool Publishers. https://doi.org/10.1007/978-3-031-02549-5

da Silva Tomadon, L., do Couto, E. V., de Vries, W. T., & Moretto, Y. (2024). Smart city and sustainability indicators: A bibliometric literature review. *Discover Sustainability*, 5(1), 143. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00328-w

Erazo-Garzon, L., Quinde, K., Bermeo, A., & Cedillo, P. (2023, October). A Domain-Specific Language and Model-Based Engine for Implementing IoT Dashboard Web Applications. In *Conference on Information and Communication Technologies of Ecuador* (pp. 412-428). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45438-7_28

Fernandes, I. C., de Sá-Soares, F., Tereso, A., & Sousa, P. (2024). Governance models for non-profit organizations: a literature review. *Procedia Computer Science*, 239, 1950-1957. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.379

Gracias, J. S., Parnell, G. S., Specking, E., Pohl, E. A., & Buchanan, R. (2023). Smart Cities—A Structured Literature Review. *Smart Cities*, *6*(4), 1719-1743. https://doi.org/10.3390/smartcities6040080

Ghazinoory, S., Roshandel, J., Parvin, F., Nasri, S., & Fatemi, M. (2024). Smart city maturity models: A multidimensional synthesized approach. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 14(1), e1516. https://doi.org/10.1002/widm.1516

Iung, A., Carbonell, J., Marchezan, L., Rodrigues, E., Bernardino, M., Basso, F. P., & Medeiros, B. (2020). Systematic mapping study on domain-specific language development tools. Empirical Software Engineering, 25, 4205-4249. https://doi.org/10.1007/s10664-020-09872-1

Jnr, B.A. (2023). Sustainable mobility governance in smart cities for urban policy development–a scoping review and conceptual model. Smart and Sustainable Built Environment. https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2023-0109

Karal, F. S., & Soyer, A. (2024). A systematic literature review: Setting a basis for smart and sustainable city performance measurement. *Sustainable Development*, 32(1), 555-573. https://doi.org/10.1002/sd.2693

Kolovos, D. S., Paige, R. F., & Polack, F. A. (2006, July). The epsilon object language (EOL). In *European conference on model driven architecture-foundations and applications* (pp. 128-142). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11787044_11

Mohammadzadeh, Z., Saeidnia, H. R., Lotfata, A., Hassanzadeh, M., & Ghiasi, N. (2023). Smart city healthcare delivery innovations: a systematic review of essential technologies and indicators for developing nations. *BMC Health Services Research*, 23(1), 1180. https://doi.org/10.1186/s12913-023-10200-8

Okonta, D. E., & Vukovic, V. (2024). Smart cities software applications for sustainability and resilience. *Heliyon*, 10(12). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32654

Rezaee, A. A., & Zahedi, M. H. (2022). Optimal metrics for evaluating reusability in web applications. *Engineering Management and Soft Computing*, *8*(1), 21-36. doi: 10.22091/JEMSC.2018.2550.1062 (in Persian)

Rodríguez Bolívar, M. P., Pereira-Piedra, I. C., & Alcaide Muñoz, L. (2024). Looking for Improving the Urban Areas: the Case of Costa Rican Cantons in Their Path to Become Smart. Journal of the Knowledge Economy, 1-55. Cardenas Rodriguez, R. (2024). *Integrative Modeling, Simulation, and Optimization Techniques for Efficient Data-Intensive Applications in Edge Computing Infrastructures* (Doctoral dissertation, Carleton University; Universidad Politécnica de Madrid). https://doi.org/10.22215/etd/2023-15873

Samimi-Dehkordi, L., Zamani, B., & Kolahdouz-Rahimi, S. (2019). Leveraging product line engineering for the development of domain-specific metamodeling languages. Journal of Computer Languages, 51, 193-213. https://doi.org/10.1016/j.cola.2019.02.006

Sanctis, M., Iovino, L., Rossi, M. T., & Wimmer, M. (2022). MIKADO: A smart city KPIs assessment modeling framework. *Software and Systems Modeling, 21*(1), 281–309. https://doi.org/10.1007/s10270-021-00917-6

Shahraki, M., & Jalali Bighdeli, A. (2023). Blockchain based micropayment for e-health IOT sensors. *Engineering Management and Soft Computing*, *9*(1), 75-89. doi: 10.22091/JEMSC.2022.7046.1153 (in Persian)

Trendowicz, A., Groen, E. C., Henningsen, J., Siebert, J., Bartels, N., Storck, S., & Kuhn, T. (2023). User experience key performance indicators for industrial IoT systems: A multivocal literature review. *Digital Business*, 3(1), 100057. https://doi.org/10.1016/j.digbus.2023.100057

Van de Ven, M., Lara Machado, P., Athanasopoulou, A., Aysolmaz, B., & Turetken, O. (2023). Key performance indicators for business models: a systematic review and catalog. *Information Systems and e-Business Management*, 21(3), 753-794. https://doi.org/10.1007/s10257-023-00650-2

Wang, R., Xu, C. K., & Wu, X. (2024). Open Government Data (OGD) as a catalyst for smart city development: Empirical evidence from Chinese cities. *Government Information Quarterly*, 41(4), 101983. https://doi.org/10.1016/j.giq.2024.101983