



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

A Health-Oriented Three-Layer Hybrid BIM–LCA Conceptual Model for Addressing Sick Building Syndrome: Evidence from Four Case Studies

Majid Boyouni¹, Farhad Saeedi^{2*}

1. Master Student. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Science & Research Branch

2*. Faculty member, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Science & Research Branch.

Received: 24 April 2026; Revised: 28 May 2026; Accepted: 31 May 2026; Published: 22 June 2026

Abstract

Sick Building Syndrome is a major concern because of its direct impact on the health and productivity of building occupants. Addressing this issue requires a new framework for analysis, control, and management. In this context, adopting health-oriented technologies to manage and monitor indoor environments is essential. Previous research shows that Building Information Modeling and Life Cycle Assessment have been widely applied over the last decade, but mainly from the perspectives of energy efficiency and sustainability. Much less attention has been paid to user health or the real-time monitoring of comfort, and no integrated health-oriented framework combining these two technologies has yet been introduced. This study presents a three-layer hybrid BIM–LCA conceptual model with a health-oriented perspective. The model provides a coherent structure by examining causal paths between environmental and physical conditions, analytical technologies, and human outcomes. Its key innovation is the integration of real-time monitoring with a focus on occupant health, enabling continuous control of indoor environments and offering decision-makers a practical tool for reducing SBS symptoms. The research methodology is based on a systematic review combined with qualitative and quantitative analyses of prior studies. The model was validated using data from two international studies and two local case studies conducted by the author. Results demonstrate that the model effectively represents causal relationships among environmental, managerial, and human variables, and that it can be generalized to diverse design and operational contexts. This research provides a comprehensive framework for addressing SBS through the integration of BIM and LCA.

Keywords: Sick Building Syndrome, Building Information Modeling, Life Cycle Assessment, Conceptual Model, Construction.

Cite this article as Boyouni,M and Saeedi,F . (2026). A Health-Oriented Three-Layer Hybrid BIM–LCA Conceptual Model for Addressing Sick Building Syndrome: Evidence from Four Case Studies. (e244569). Civil and Project, 8(4), e244569 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.583289.1443>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: saeedi.pm@iaau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

ارائه مدل مفهومی سه لایه ترکیبی BIM-LCA با رویکرد سلامت محور در مواجهه با سندروم ساختمان بیمار: شواهدی از چهار پروژه منتخب

مجید بویونی^۱، فرهاد سعیدی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده ابن سینا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲. عضو هیئت علمی دپارتمان مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۰۴ اردیبهشت ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۰۷ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ تیر ۱۴۰۵

چکیده

سندروم ساختمان بیمار (SBS)^۱، در حال حاضر یکی از اصلی ترین چالش های موجود درباره تاثیر مستقیم و عمیق محیط های ساخته شده بر سلامت و میزان بهره وری ساکنین یک ساختمان می باشد و نیازمند یک چارچوب نوین برای تحلیل، کنترل و مدیریت است. (Isman et al., 2024; Sarkhosh et al., 2021) راستای دستیابی به این چارچوب نوین نیازمند استفاده از فناوری های متنوع و متعددی خواهیم بود تا با نگرش سلامت محور داده های بدست آمده از این فناوری ها را در راستای کنترل و مدیریت محیط های ساخته شده بکار ببریم. با نگاهی به پژوهش های پیشین در می یابیم که فناوری هایی نظیر مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM)^۲ و ارزیابی چرخه حیات (LCA)^۳ اگرچه در دهه اخیر بصورت مستمر و گسترده در پژوهش ها بکار رفته اند لیکن نگاه به آنها اکثرا از نگرش انرژی و پایداری بوده است و کمتر نگاه و نگرشی از جنس سلامت ساکنین و پایش لحظه ای برای آسایش ساکنین در آنها لحاظ گردیده است و تاکنون هیچ چارچوب یکپارچه و سلامت محور که این دو فناوری را در راستای پایش و کنترل پیامدهای انسانی تلفیق کند، ارائه نشده است. (Teng et al., 2022; D'Amico et al., 2020) این مقاله برای نخستین بار یک مدل مفهومی سه لایه ترکیبی BIM-LCA با رویکرد سلامت محور معرفی می کند، مدلی که سعی بر آن دارد تا با بررسی مسیرهای علی میان شرایط محیطی و کالبدی یک ساختمان، فناوری های BIM و LCA و پیامدهای انسانی، یک ساختار منسجم ارائه نماید. نوآوری کلیدی این مدل در پایش لحظه ای داده ها با نگرش سلامت محور انسانیت، که امکان پایش، کنترل و مدیریت لحظه ای یک ساختمان را در جهت بالا نگاه داشتن کیفیت لحظه ای محیط در جهت سلامت ساکنین را بوجود می آورد و بدین ترتیب، معیاری عملی برای ارزیابی و کاهش علائم SBS در اختیار تصمیم گیران قرار می دهد. روش این تحقیق مبتنی بر مرور نظام مند و تحلیل کیفی، کمی مطالعات پیشین است و در نهایت با بررسی داده های کمی دو مطالعه بین المللی (D'Amico et al., 2020; Licina & Yildirim, 2021) و دو مطالعه محلی که توسط نویسندگان انجام گردیده است، اعتبارسنجی مدل ارائه شده بررسی گشت. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی توانسته است با دقت بالا روابط علی میان متغیرهای محیطی، مدیریتی و انسانی را بازنمایی کند و قابلیت تعمیم در سناریوهای متنوع طراحی و بهره برداری را داشته باشد. به طور کلی، این پژوهش نخستین گام در معرفی یک چارچوب جامع و بی سابقه برای مواجهه با SBS از رهگذر تلفیق BIM و LCA است. یافته های این مقاله نشان می دهد که مدل پیشنهادی می تواند افق تازه ای برای طراحی و بازسازی سلامت محور بگشاید و شالوده ای برای تحقیقات آتی و توسعه کاربردهای بین المللی در حوزه معماری و مهندسی فراهم سازد.

کلمات کلیدی: سندروم ساختمان بیمار، مدل سازی اطلاعات ساختمان، ارزیابی چرخه حیات، مدل مفهومی، ساخت و ساز.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: saeedi.pm@iaui.ac.ir

¹ Sick Building Syndrome

² Building Information Modeling

³ Life Cycle Assessment

۱- مقدمه

سندروم ساختمان بیمار (SBS) به عنوان یکی از مهم ترین چالش های عصر حاضر در محیط های ساخته شده، نه تنها سلامت جسمی و روانی ساکنان را تهدید می کند، بلکه پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی نیز دارد. (M. Sarkhosh et al. 2021 & Niza IL et al. 2023) تحقیقات بسیاری به این نتیجه رسیده اند که کیفیت پایین محیط داخلی شامل تهویه ناکافی، حضور ذرات معلق و ترکیبات آلی فرار^۴ (VOC) می تواند به بروز علائمی نظیر سردرد، خستگی، تحریک چشم و مشکلات تنفسی منجر شود. (Isman et al. 2024 & J. Hu et al. 2022 & I. Nezis 2022) در اغلب موارد این علائم با ترک محیط از بین می روند و همین مسئله موید ارتباط مستقیم شرایط محیطی ساختمان و سطح سلامت ساکنین است. در دهه اخیر فناوری های نوین نظیر مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM) و ارزیابی چرخه حیات (LCA) و همچنین بحث یکپارچه سازی این دو فناوری بصورت بسیار گسترده و در حیطه انرژی و پایداری ساختمان ها بکار گرفته شده اند، (Y. Teng et al. 2022 & P. Inharwararak et al. 2023)

اما امروز نظام مند ادبیات پیرامون حکایت از این دارد که نگرش سلامت محور این دو فناوری به پیامدهای انسانی در سطح بسیار ابتدایی و اولیه قرار دارد و تنها نمونه تحقیقات بسیار پراکنده ای به چشم می خورد. (D, Amico et al. 2020 & Walaa S et al. 2022 & Wang M. et al. 2022) این خلأ پژوهشی نشان دهنده نیاز مبرم به چارچوب هایی است که بتوانند سلامت ساکنین را به عنوان متغیر محوری در تصمیم گیری های طراحی، ساخت و بازسازی در نظر بگیرند. در این پژوهش سعی شده تا با ارائه یک مدل مفهومی سه لایه از ترکیب BIM و LCA با رویکرد سلامت محور، یک نگاه نوآورانه و فراتر از تحلیل های سنتی بوجود آید. مدلی که فرصت پایش، کنترل و مدیریت لحظه ای داده های تولید شده توسط BIM و LCA را در راستای کاهش علائم SBS فراهم می آورد. این مدل با ارائه عوامل چهارگانه محیطی، کالبدی، انسانی و مدیریتی (در لایه اول)، ابزارهای فناوری و مدیریتی در قالب فناوری های BIM و LCA (در لایه دوم) و پیامدهای انسانی (در لایه سوم) و ترسیم مسیرهای علی میان این متغیرها، ساختاری منسجم برای تحلیل جامع و سیستماتیک SBS ارائه و عرضه می نماید.

برای آزمون اصالت و اعتبار اولیه این مدل، پژوهش حاضر به تحلیل چهار پروژه منتخب پرداخته است. دو پروژه بین المللی که داده های گسترده ای از کیفیت محیطی، بهره گیری از BIM و شاخص های انسانی ارائه کرده اند (D, Amico et al. 2021 & D. Licina et al. 2020) و دو پروژه بومی که توسط نویسندگان انجام شده اند. این ترکیب، امکان ارزیابی مدل را هم در بستر جهانی و هم در زمینه محلی فراهم ساخته است. در این مقاله سعی گردیده تا بعد از معرفی مدل مفهومی و اصالت سنجی آن توسط داده های واقعی از چهار پروژه به بررسی ظرفیت مدل برای تبیین روابط علی و ارائه راهکارهای عملی در کاهش علائم SBS پرداخته شود. در ادامه، ابتدا چارچوب نظری و مدل مفهومی پیشنهاد می گردد و معیارهای انتخاب پروژه ها بیان خواهد شد. سپس یافته های حاصله از تحلیل پروژه ها ارائه شده و در نهایت به بخش بحث و تفسیر خواهیم پرداخت. در پایان، نتیجه گیری و مسیرهای پیشنهادی برای تحقیقات آتی بیان خواهد شد.

۲- چارچوب نظری و مدل مفهومی

سندروم ساختمان بیمار (SBS) یکی از جدی ترین مسائل در حوزه محیط های داخلی است که آثار آن بر سلامت جسمانی، روانی و بهره وری کاربران به طور گسترده گزارش شده است. (Isman et al. 2024 & M. Sarkhosh et al. 2021) در سال های اخیر، مطالعات مختلف نشان داده اند که عوامل متعددی مانند کیفیت هوای داخلی، تهویه، دما، رطوبت، آلودگی های شیمیایی و زیستی می توانند محرک اصلی بروز SBS باشند. (J. Hu et al. 2022) این پژوهش ها گرچه نقش بسیار جامع و کاملی در مشخص نمودن محرک های سندروم ساختمان بیمار (SBS) داشته اند اما اکثراً بصورت تک بعدی به تولید داده

⁴ Volatile Organic Compound

پرداخته‌اند و کمتر توانسته‌اند پلی میان داده‌های محیطی و کنترل لحظه‌ای داده‌ها در جهت مدیریت سلامت محور محیط ایجاد نمایند.

از طرفی مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM) طی دهه اخیر توانسته به یکی از مهمترین فناوری‌های حوزه ساخت تبدیل شود. این فناوری امکان تجسم دیجیتال ساختمان (دوقلوی دیجیتال)، شبیه سازی عملکرد و مدیریت داده‌ها را به کاربر خود می‌دهد. (Y. Teng et al. 2022) همچنین کاربردهای بسیار متنوعی همچون بهینه سازی مصرف انرژی، تسهیل در دستیابی به طراحی پایدار و دستیابی به گواهی ساخت سبز نیز در متون پیشین ذکر گردیده است. (D, Amico et al. 2020) با این حال، استفاده از BIM در حوزه سلامت کاربران و به‌ویژه در تحلیل مستقیم علائم SBS هنوز محدود است. نمونه‌هایی مانند پروژه D'Amico نشان داده‌اند که BIM می‌تواند برای پیش‌بینی کمی کیفیت هوای داخلی^۵ (IAQ) و تحلیل آلاینده‌ها در فرآیند طراحی به کار گرفته شود، اما این مطالعات بیشتر در سطح طراحی باقی مانده‌اند و به مسیرهای انسانی کمتر پرداخته‌اند.

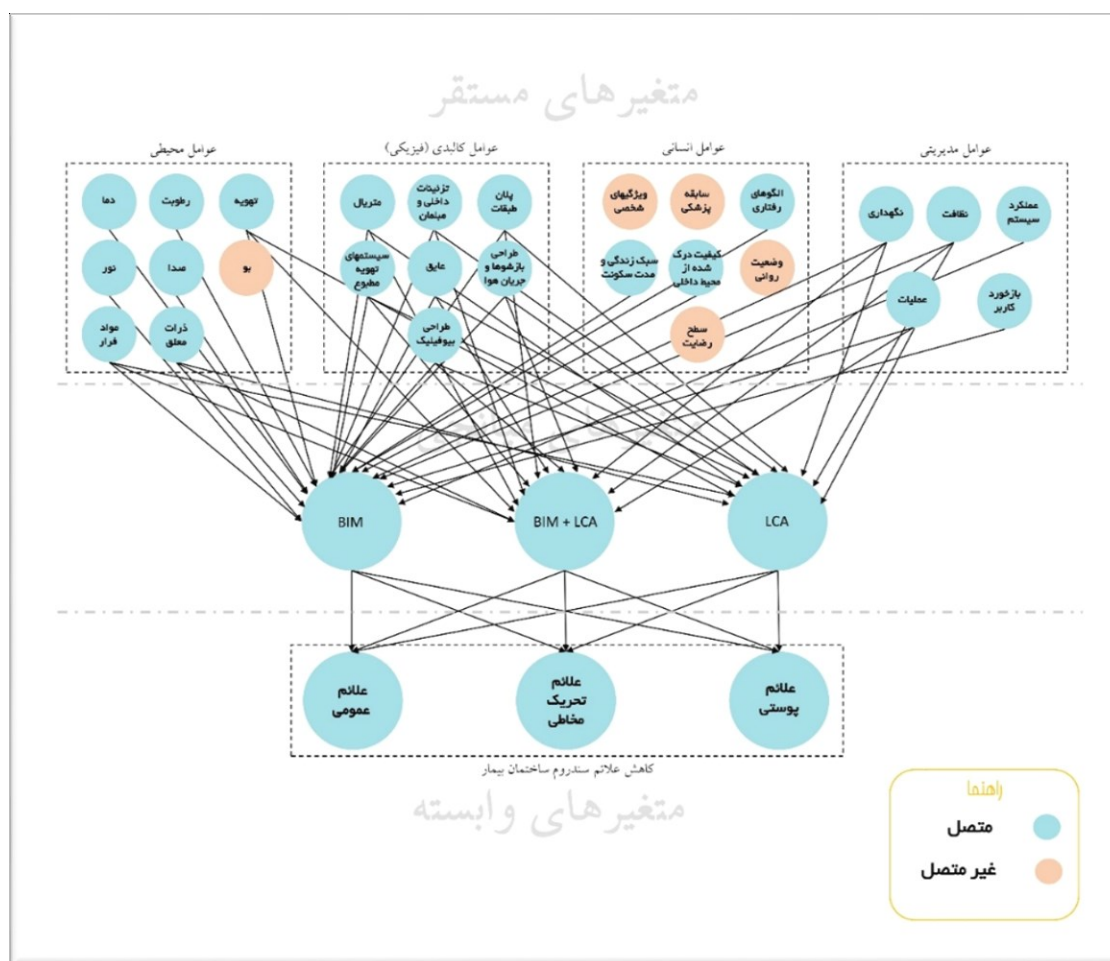
از سوی دیگر، ارزیابی چرخه حیات (LCA) ابزاری کلیدی برای تحلیل جامع اثرات زیست‌محیطی مصالح و فرآیندهای ساختمانی است. (Y. Teng et al. 2022) در این چارچوب، اثرات ناشی از تولید، حمل‌ونقل، اجرا، بهره‌برداری و تخریب مصالح بررسی می‌شوند و شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی اثر بر سلامت انسان و محیط تعریف می‌شود. (Z. Filali et al. 2024) پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که برخی از علائم انسانی ناشی از SBS، به‌طور مستقیم با آلاینده‌های ناشی از مصالح مرتبط هستند و LCA می‌تواند در انتخاب مواد سالم‌تر و کم‌انتشار نقش مؤثری داشته باشد. (W.S.E. Ismaeel et al. 2022) اما گذری بر ادبیات پیشین نشان می‌دهد که تمرکز اصلی تحقیقات بر تأثیرات مواد ساختمانی بر محیط زیست بوده است و نگرش سلامت محوری انسان نقشی در تحقیقات پیشین نداشته است. این دقیقاً نقطه‌ای است که ضرورت یکپارچه سازی BIM و LCA از آن آغاز می‌شود زیرا هر یک از این فناوری‌ها ظرفیت بسیار زیادی در حوزه خود دارند اما به تنهایی و بدون یکپارچه سازی، قدرت لازم برای یک تحلیل جامع و سلامت محور در لحظه را نخواهند داشت. تاکنون تلاش‌های پراکنده‌ای در این زمینه انجام گردیده است. به عنوان مثال ترکیب BIM با داده‌های کیفیت هوا (D, Amico et al. 2020) و یا ترکیب LCA با مدل‌های تصمیم یار^۶ (DSS) در جهت بازسازی پایدار. (W.S.E. Ismaeel et al. 2022) با این حال کماکان هیچ یک از این مطالعات یک چارچوب جامع و منسجم با نگرش سلامت محور را که در آن داده‌های محیطی، مصالح و شرایط بهره‌برداری بصورت لحظه‌ای با پیامدهای انسانی در ارتباط باشند، ارائه نداده‌اند.

در پاسخ به این خلأ، این مقاله اقدام به معرفی یک مدل مفهومی سه لایه با ترکیب BIM – LCA نموده است. در این مدل در لایه اول چهار دسته متغیرهای مستقل که همگی از عوامل کلی تأثیرگذار بر بروز علائم سندروم ساختمان بیمار هستند شناسایی و معرفی گشته‌اند. چهار دسته اصلی شامل متغیرهای محیطی، کالبدی (فیزیکی ساختمان)، انسانی و مدیریتی هستند که مجموعاً ۲۷ عامل شناسایی شده را در خود جای داده‌اند. لایه دوم معرف کلیه ابزارهای دیجیتال و مدیریتی BIM، LCA و ترکیب این دو است و در نهایت لایه سوم پیامدهای انسانی همچون کاهش علائم SBS را شامل می‌شود. مسیرهای علی در این مدل نشان می‌دهند که داده‌های محیطی و کالبدی پس از پردازش در لایه دوم، به‌طور مستقیم بر شرایط انسانی اثر می‌گذارند.

نوآوری اصلی مدل در جامعیت و سلامت‌محوری آن است. مطالعات و رویکردهای پیشین اکثراً بر صرفه جویی انرژی یا کاهش اثرات زیست محیطی تأکید داشتند اما این مدل امکان پایش، کنترل و مدیریت لحظه‌ای داده‌ها را در راستای کاهش علائم SBS فراهم می‌آورد. این ویژگی می‌تواند این مدل را به یک نقشه راه برای مطالعات آتی، طراحی، بهره‌برداری و بازسازی سلامت محور ساختمان‌ها مبدل سازد. مقاله حاضر نخستین معرفی این مدل به همراه اعتبار سنجی اولیه آن از طریق بررسی داده‌های واقعی چهار پروژه بین المللی و محلی است که در آنها با مستقیماً فناوری‌های BIM و LCA بکار رفته و یا اقداماتی غیر سیستماتیک انجام شده که منطبق بر اصول کلی این دو فناوریست.

⁵ Indoor Air Quality

⁶ Decision Support System



شکل ۱ - مدل مفهومی ارائه شده

۲-۱- معرفی مدل مفهومی

مدل مفهومی معرفی شده، دارای یک ساختار سه لایه‌ای است که هدف آن توضیح روابط علی میان شرایط چهارگانه بوجود آورنده سندروم ساختمان بیمار، فناوری‌ها و ابزارهای دیجیتال و مدیریتی و پیامدهای انسانی ناشی از این ترکیب در خلال کنترل و مدیریت این عوامل است. این مدل با مرور نظام‌مند ادبیات و تحلیل تطبیقی پژوهش‌های پیشین طراحی شده و تلاش دارد تصویری جامع و سلامت‌محور از فرآیندهای مؤثر بر SBS ارائه دهد. حال به توضیح مختصری از هریک از این سه لایه خواهیم پرداخت:

- لایه اول: متغیرهای ورودی (محیطی، کالبدی، انسانی، مدیریتی)

این لایه شامل تمامی شرایط محیطی، فیزیکی، ویژگی‌های شخصی انسانی و در نهایت تصمیمات مدیریتی در یک ساختمان است. مجموعاً ۲۷ متغیر (۲۷ گره) در قالب ۴ دسته اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند. از مهمترین متغیرهای این لایه به توجه به دسته‌بندی آنها عبارتند از: (Isman et al. 2024 & J. Hu et al. 2022)

❖ الف) عوامل محیطی^۷

این دسته شامل گره‌هایی است که مستقیماً بر شرایط فیزیکی، شیمیایی و کیفیت هوای داخلی فضا اثرگذار هستند. تعداد گره‌های این دسته در مدل مفهومی نهایی هشت مورد است:

- (۱) دما
- (۲) رطوبت نسبی
- (۳) تهویه
- (۴) نور
- (۵) نویز
- (۶) بو
- (۷) ترکیبات آلی فرار
- (۸) ذرات معلق با قطر کمتر از ۲,۵ میکرون^۸

❖ ب) عوامل کالبدی^۹

عوامل کالبدی به کیفیت طراحی، ساختار و اجزای فیزیکی ساختمان مربوط می‌شوند. در مدل مفهومی نهایی، هفت گره به این دسته اختصاص یافته است:

- (۱) مصالح ساختمانی
- (۲) پوشش‌های داخلی و مبلمان
- (۳) نقشه پلان و جانمایی فضاها
- (۴) سیستم تهویه و سرمایش و گرمایش^{۱۰}
- (۵) عایق‌کاری حرارتی و صوتی
- (۶) بازشوها و طراحی جریان هوا
- (۷) طراحی بیوفیلیک^{۱۱}

⁷ Environmental Factors

⁸ Particulate Matter

⁹ Physical Factors

¹⁰ HVAC Systems

¹¹ Biophilic Design

❖ (ج) عوامل انسانی^{۱۲}

این دسته به ویژگی‌های فردی، سوابق سلامت، رفتار و ادراک کاربران از محیط داخلی مربوط می‌شود. هفت گره در این گروه تعریف شده است:

- (۱) ویژگی‌های فردی
- (۲) سوابق پزشکی
- (۳) الگوهای رفتاری
- (۴) سبک زندگی و مدت حضور در فضا
- (۵) ادراک ذهنی کیفیت فضا
- (۶) وضعیت روانی
- (۷) سطح رضایت از محیط

❖ (د) عوامل مدیریتی^{۱۳}

این دسته شامل گره‌هایی است که به سیاست‌ها، عملکردهای نگهداری، بهره‌برداری و دریافت بازخورد از کاربران مربوط می‌شوند. پنج گره مدیریتی در مدل مفهومی لحاظ شده است:

- (۱) نگهداری تجهیزات و زیرساخت‌ها
- (۲) برنامه نظافت و کنترل آلاینده‌ها
- (۳) بهره‌برداری و مدیریت انرژی
- (۴) عملکرد سیستم‌ها
- (۵) بازخورد کاربران

• لایه دوم: ابزارهای تحلیلی و مدیریتی (BIM-LCA)

در این لایه، فناوری‌های داده محور بعنوان متغیر میانجی میان عوامل بروز سندروم (لایه اول) و پیامدهای انسانی (لایه سوم) قرار می‌گیرند. مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM)، به عنوان ابزاری برای مدلسازی، شبیه‌سازی و مصورسازی داده‌ها، امکان پایش و کنترل شرایط محیطی را در بستر سه بعدی فراهم می‌سازد. (D, Amico et al. 2020 & Alavi et al. 2022) ارزیابی چرخه حیات (LCA) نیز با تحلیل چرخه عمر مصالح و فرآیندها، آثار تجمعی و بلندمدت بر سلامت را شناسایی می‌کند. (Z. Filali et al. 2024) سایر ابزارهای مکمل ناشی از یکپارچه سازی این دو فناوری نیز در این لایه قرار می‌گیرند تا ظرفیت تصمیم‌گیری و مداخله در لحظه و به موقع را افزایش دهند.

¹² Human Factors

¹³ Management Factors

• لایه سوم: پیامدهای انسانی

خروجی این لایه از مدل مستقیماً شامل پیامدهای انسانی می‌شود و شامل تغییرات میزان علائم و نشانه‌های سندروم ساختمان بیمار (SBS) بر ساکنین است. این لایه بازتابی مستقیم و غیر مستقیم از تغییر شرایط محیطی و اقدامات مدیریتی است که نقش کاملاً کلیدی برای اعتبارسنجی مدل بعده دارد. (D. Licina et al. 2021 & W.S.E. Ismaeel et al. 2022)

ارتباط میان این سه لایه در قالب مسیرهای علی تعریف می‌شود و هر یک از این مسیرها نماینده یک پژوهش از مجموعه پژوهش‌های پیشین می‌باشد. در واقع داده‌های بدست آمده از متغیرهای لایه اول وارد لایه دوم می‌شوند و در آنجا توسط سیستم‌ها و نرم افزارهای این لایه تحلیل، پایش و شبیه سازی شده و در مورد این اطلاعات تصمیم‌گیری می‌شود و در نهایت باعث تاثیر بر روی متغیرهای لایه سوم می‌شوند. وجود مسیرهای علی از گره‌های یک لایه به لایه دیگر مبین وجود یک پژوهش پیشین و ارائه داده‌های لازم در رابطه با تاثیر متغیرها بر یکدیگر می‌باشد. بدین ترتیب، مدل پیشنهادی قادر است نه تنها وضعیت موجود را توصیف کند، بلکه امکان پیش‌بینی و مداخله را نیز فراهم می‌سازد. نوآوری اصلی مدل در آن است که برای نخستین بار، BIM و LCA به‌طور همزمان و در یک چارچوب سلامت‌محور برای مدیریت علائم SBS به‌کار گرفته شده‌اند. این ترکیب باعث می‌شود که هم اثرات کوتاه‌مدت (مانند کیفیت لحظه‌ای هوا) و هم اثرات بلندمدت (مانند انتخاب مصالح کم‌انتشار) در یک ساختار واحد دیده شوند. افزون بر این، تأکید بر پایش و کنترل لحظه‌ای داده‌ها ویژگی متمایز دیگری است که مدل حاضر را از تلاش‌های پیشین جدا می‌سازد.

۳- روش تحقیق

روش تحقیق این مقاله مبتنی بر مرور نظام‌مند و تحلیل ترکیبی داده‌های کمی و کیفی پژوهش‌های پیشین است. هدف اصلی این مقاله، معرفی مدل مفهومی ترکیبی BIM-LCA برای اولین بار و همچنین اعتبارسنجی اولیه این مدل با رویکرد سلامت محور در جهت کنترل و مدیریت علائم SBS است. برای تحقق این اعتبارسنجی، چهار پروژه منتخب شامل دو پروژه بین‌المللی با داده‌های جامع و دو پروژه بازسازی بومی انجام شده توسط نویسندگان مقاله، به عنوان شواهد تجربی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل ادبیات علمی نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر تلاش‌هایی پراکنده برای پیوند دادن کیفیت محیط داخلی، فناوری‌های دیجیتال و پیامدهای انسانی انجام شده است. به عنوان نمونه، دامیکو و همکاران، با ادغام BIM در فرایند طراحی، امکان پیش‌بینی کمی آلاینده‌های VOC در محیط داخلی را فراهم کردند. (D' Amico et al. 2020) در پژوهشی دیگر، علوی و همکاران، با ترکیب BIM، BMS^{۱۴} و CMMS^{۱۵} چارچوبی کاربرمحور برای ریشه‌یابی مشکلات سیستم‌های تهویه در فاز بهره‌برداری ارائه دادند. (Alavi et al. 2022) در سطح انسانی، لیچینا و ایلدیریم، با بررسی ساختمان‌های دارای گواهی WELL نشان دادند که طراحی سلامت‌محور می‌تواند علائم SBS را کاهش دهد و رضایت کاربران را بهبود بخشد. (D. Licina et al. 2021) همچنین اسماعیل و محمد، با توسعه یک سیستم تصمیم‌یار مبتنی بر مدل معادلات ساختاری، رابطه‌ی میان عملیات بازسازی، کیفیت هوای داخلی و علائم SBS را کمی‌سازی کردند. (W.S.E. Ismaeel et al. 2022) از سوی دیگر، پژوهشگرانی مانند فیلالی و همکاران، اهمیت چرخه عمر مصالح و کاهش اثربخشی پوشش‌های ضدقارچ در گذر زمان را نشان داده‌اند. (Z. Filali et al. 2024) این زنجیره‌ی مطالعات، هرچند ارزشمند، هنوز فاقد یک چارچوب جامع سلامت‌محور بود که بتواند همه این مسیرها را در قالبی یکپارچه توضیح دهد؛ شکافی که مدل مفهومی حاضر در پی پر کردن آن است.

¹⁴ Building Management System

¹⁵ Computerized Maintenance Management System

چهار پروژه‌ی منتخب این مقاله بر اساس پنج معیار اصلی گزینش شده‌اند:

- (۱) ارتباط مستقیم با حوزه SBS یا کیفیت محیط داخلی (IEQ)^{۱۶}
- (۲) بهره‌گیری از فناوری‌های BIM یا LCA، یا قابلیت تحلیل با این ابزارها.
- (۳) اتکا به داده‌های واقعی (اندازه‌گیری‌های محیطی، پیمایش‌های کاربری یا داده‌های مدیریتی).
- (۴) پوشش سه‌لایه‌ای مدل مفهومی (ورودی‌ها، ابزارهای میانجی، خروجی‌های انسانی).
- (۵) انتشار در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۵ به بعد در مجلات معتبر.

پس از مشخص شدن پروژه‌های منتخب، پروسه تحلیل داده‌های این پروژه‌ها طی چهار گام اصلی ذیل صورت پذیرفت:

الف. گام اول: استخراج داده‌ها از پروژه‌ها

ب. گام دوم: کدگذاری داده‌ها در سه لایه مدل مفهومی

ج. گام سوم: تطبیق مسیرهای علی با مدل مفهومی

د. گام چهارم: تحلیل تطبیقی بین پروژه‌ها

۴- یافته‌ها

این بخش به تحلیل چهار پروژه منتخب اختصاص دارد که به‌عنوان شواهد تجربی برای اعتبارسنجی اولیه مدل مفهومی سه‌لایه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف اصلی در این مرحله، بررسی میزان انطباق داده‌های واقعی با مسیرهای علی ترسیم‌شده در مدل است.

❖ پروژه اول: طراحی سلامت‌محور با پیش‌بینی کمی کیفیت هوای داخلی توسط مدلسازی اطلاعات ساختمان:

(D'Amico et al. 2020)

این پروژه در کشور ایتالیا و در قالب طراحی یک ساختمان اداری جدید برای مؤسسه CNR انجام شد. تمرکز اصلی مطالعه بر ادغام پیش‌بینی کمی کیفیت هوای داخلی با فرآیند مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM) بود. در مرحله گردآوری داده‌ها، شرایط محیطی و کالبدی متعددی همچون نرخ تهویه هوا، نوع و سطح مصالح داخلی (دیوار، کف و سقف) و نرخ انتشار آلاینده‌های آلی فرار (VOC) شناسایی شد. داده‌های مدیریتی پروژه نیز شامل الزامات طراحی منطبق بر استانداردهای CAM ایتالیا و گواهی‌های بین‌المللی پایداری مانند BREEAM و LEED بود. از سوی دیگر، هرچند شاخص‌های انسانی به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نشدند، اما هدف پروژه کاهش ریسک‌های مرتبط با سلامت کاربران از طریق کنترل میزان آلاینده‌های داخلی بود که به‌عنوان یک خروجی غیرمستقیم در نظر گرفته شد. در لایه دوم مدل مفهومی، ابزار اصلی مورد استفاده BIM بود که با بهره‌گیری از محیط Autodesk Revit و توسعه یک مدل عددی ساده‌شده (Box Model) امکان پیش‌بینی غلظت VOC را در فضاهای مختلف فراهم آورد. داده‌های مربوط به نرخ تهویه و مشخصات مصالح به این مدل وارد شد و خروجی‌ها به‌صورت رنگ‌بندی فضاها بر اساس سطح ایمنی در برابر آلاینده‌ها نمایش داده شد. این مصورسازی سه‌بعدی و عددی توانست نقش میانجی مشخصی میان داده‌های ورودی و پیامدهای انسانی ایفا کند. در نهایت، یافته‌های پروژه نشان داد که غلظت نهایی VOC در تمامی فضاها پایین‌تر از حد آستانه طراحی ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) قرار داشت و از این نظر ساختمان با الزامات سلامت‌محور سازگار بود. این نتیجه، هرچند بدون داده‌های مستقیم انسانی به دست آمد، اما به‌طور غیرمستقیم بیانگر کاهش ریسک بروز علائم سندروم ساختمان بیمار در کاربران بود. از نظر اعتبارسنجی مدل، این پروژه بیانگر این مساله است که BIM ابزاری کارآمد در جهت پیوند متغیرهای محیطی و کالبدی

¹⁶ Indoor Air Quality

به پیامدهای انسانی است و می‌تواند قابلیت پایش و کنترل لحظه‌ای کیفیت محیطی را در اختیار کاربر قرار دهد. این مطالعه دارای یک محدودیت اصلی بود که داده‌های انسانی بطور مستقیم وارد تحلیل نشدند و شاخص‌های سلامت بصورت غیر مستقیم استفاده شده است اما با وجود این محدودیت شواهد ارائه شده در این پروژه بیانگر این است که مدل مفهومی پیشنهادی می‌تواند بخوبی داده‌های کمی محیط را در بستر ابزارهای دیجیتال به پیامدهای سلامتی ساکنان مرتبط نماید.

لایه مدل	متغیرها / داده‌ها	یافته کلیدی
ورودی‌ها	شرایط محیطی: نرخ تهویه (AER)، غلظت VOC؛ مصالح داخلی (دیوار، کف، سقف)؛ الزامات طراحی و گواهی‌های پایداری	نوع مصالح و تهویه به‌عنوان محرک اصلی کیفیت هوا شناسایی شدند.
ابزارهای تحلیلی (میانجی)	BIM در محیط + Revit مدل عددی Box برای پیش‌بینی VOC؛ افزونه‌های Dynamo و ParaManager؛ کنترل کیفیت با Model Checker	BIM نقش میانجی بین داده‌های کالبدی-محیطی و ارزیابی سلامت را ایفا کرد.
خروجی‌های انسانی	داده مستقیم انسانی وجود نداشت؛ خروجی غیرمستقیم = کاهش ریسک بروز علائم SBS از طریق کاهش VOC	تمامی فضاها زیر حد آستانه $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ قرار گرفتند؛ نشانگر سازگاری با شرایط سلامت‌محور.
مسیر علی فعال	مصالح و تهویه - شبیه‌سازی توسط BIM - کاهش VOCs - کاهش ریسک علائم SBS	مدل مفهومی توانست رابطه ورودی-میانجی-خروجی را بازنمایی کند.
اهمیت برای اعتبار مدل	اثبات شد که BIM قادر است داده‌های کمی محیطی را به تصمیم‌های سلامت‌محور متصل کند؛ محدودیت: فقدان داده انسانی مستقیم	تأیید نقش BIM به‌عنوان ابزار تحلیلی لایه دوم.

جدول ۱- خلاصه اطلاعات پروژه اول

❖ پروژه دوم: ارزیابی تغییرات رضایت کاربران، علائم سندروم ساختمان بیمار و بهره‌وری پس از انتقال به ساختمان‌های دارای گواهی WELL. (Licina & Yildirim, 2021)

این مطالعه در کشورهای آلمان و هلند انجام شده است و از نظر بررسی همزمان شرایط محیطی، شاخص‌های انسانی و پیامدهای بهره‌وری یکی از مطالعات برجسته محسوب می‌شود. هدف این مطالعه، مقایسه وضعیت ساکنین یک ساختمان اداری معمولی بعد از انتقال به یک ساختمان اداری جدید با گواهی WELL است. داده‌های بررسی شده طی سه مرحله پیش از انتقال، بلافاصله بعد از انتقال و هفت ماه بعد از انتقال گردآوری شده و شامل پرسشنامه‌های استاندارد درباره رضایت از کیفیت محیط داخلی و علائم سندروم ساختمان بیمار بوده است. در لایه اول، متغیرهای محیطی و کالبدی همچون دما، کیفیت هوا، نور، آکوستیک و طراحی پلان استخراج گردید. در حوزه داده‌های مدیریتی نیز دستورالعمل‌های گواهی ساختمان WELL و تغییرات بازسازی ناشی از این دستورالعمل‌ها قرار گرفتند.

همچنین ویژگی‌های انسانی ساکنین نظیر شرایط جمعیت شناختی و الگوی کاری ساکنین نیز در این لایه قرار گرفتند. در لایه دوم، ابزار تحلیلی اصلی پیمایش‌های ساختاریافته و تحلیل آماری غیرپارامتریک بود. در این پروژه BIM و LCA بصورت مستقیم حاضر نبودند اما پژوهشگر با تکیه بر داده‌های دقیق و روشمند IEQ^{۱۷} و مقایسه‌های لحظه‌ای نقش میانجی را برای پیوند لایه‌های اول و پیامدهای انسانی ایفا نموده است. در لایه سوم، شاخص‌های انسانی ثبت گردیده است. نتایج این پژوهش نشان داد که پس از انتقال به ساختمان‌های دارای گواهی WELL، رضایت کاربران از کیفیت هوا، نور و دما

¹⁷ Indoor Environment Quality

افزایش یافت و علائمی مانند خستگی و تحریک چشم کاهش پیدا کرد. در نتیجه ین تغییرات میزان بهره‌وری نیز افزایش یافت. البته در کنار این بهبودها نارضایتی از شرایط آکوستیک کماکان ادامه پیدا نمود.

لایه مدل	متغیرها / داده‌ها	یافته کلیدی
ورودی‌ها	شرایط محیطی (دما، نور، کیفیت هوا، آکوستیک)؛ کالبدی (طراحی پلان، بازسازی)؛ مدیریتی (گواهی ساختمان WELL)، ؛ انسانی (ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و الگوهای کاری)	تغییر محیطی و مدیریتی به‌عنوان عامل اصلی تفاوت‌ها شناسایی شد.
ابزارهای تحلیلی (میانجی)	پیمایش‌های استاندارد ؛ تحلیل آماری طولی؛ مقایسه قبل/بعد از انتقال	ابزارهای آماری نقش میانجی را در پیوند ورودی‌ها به خروجی‌ها ایفا کردند.
خروجی‌های انسانی	علائم SBS (خستگی، تحریک چشم، سردرد)؛ رضایت از IEQ؛ بهره‌وری خوداظهاری	بهبود رضایت و کاهش علائم SBS پس از انتقال؛ بهره‌وری کاری بالاتر در برخی گروه‌ها.
مسیر علی فعال	بهبود کیفیت هوا و نور - کاهش علائم SBS؛ ارتقای: کیفیت هوای داخلی - افزایش بهره‌وری؛ ضعف آکوستیک - تداوم نارضایتی ساکنان	مدل مسیرهای مستقیم محیط - انسان را تأیید کرد.
اهمیت برای اعتبار مدل	شواهد انسانی قوی و طولی برای تأیید لایه سوم مدل؛ محدودیت: فقدان ابزار دیجیتال BIM/LCA	تأکید بر نقش داده‌های انسانی به‌عنوان ستون اصلی اعتبار مدل.

جدول ۲ - خلاصه اطلاعات پروژه دوم

❖ پروژه سوم: بهینه‌سازی نور طبیعی و کیفیت هوای داخلی در واحد مسکونی محله پل چوبی تهران، ایران (M. Boyouni, 2024)

این پروژه در یک واحد مسکونی در محله پل چوبی تهران اجرا شد و هدف آن کاهش عوامل مؤثر بر سندروم ساختمان بیمار از طریق مداخلات کالبدی و مدیریتی بود. در لایه اول، داده‌های محیطی شامل شدت نور طبیعی، غلظت CO_2 و CO و سطح نویز پکیج داخلی ثبت گردید. در بخش کالبدی، تغییرات اساسی شامل کاهش سطح بازشوها و جایگزینی پنجره‌های تک‌جداره با دوجداره UPVC انجام شد. از نظر مدیریتی، مهم‌ترین اقدام جابجایی پکیج از فضای داخلی به فضای بیرونی ساختمان بود. در کنار این موارد، متغیرهای انسانی از طریق نارضایتی ساکنین آپارتمان ثبت شد که بیانگر بروز علائمی چون سردرد، تحریک چشم و خستگی پیش از بازسازی و کاهش محسوس آن‌ها پس از مداخله بود. در لایه دوم مدل، ابزارهای پایش شامل نورسنج دیجیتال و حسگر CO_2 و CO به‌کار گرفته شد تا شرایط قبل و بعد از مداخله به‌صورت کمی ارزیابی شود. نتایج نشان داد که شدت نور از حدود ۱۴۰۰ به ۵۰۰ لوکس کاهش یافت، غلظت CO_2 از حدود ۱۴۰۰ به ۸۰۰ ppm رسید و غلظت CO نیز از ۶ به کمتر از ۱ ppm کاهش یافت. این تغییرات موجب بهبود کیفیت محیط داخلی و کاهش شکایات کاربران شد.

لایه مدل	متغیرها / داده‌ها	یافته کلیدی
ورودی‌ها	شدت نور طبیعی، غلظت CO و CO_2 ، سطح بازشوها، نوع پنجره، محل نصب پکیج، نویز پکیج، ویژگی‌های انسانی کاربران	داده‌ها نشان‌دهنده شرایط بحرانی پیش از بازسازی بودند.
ابزارهای تحلیلی (میانجی)	نورسنج دیجیتال، حسگر CO و CO_2	پایش کمی شرایط محیطی قبل و بعد از مداخله فراهم شد.
خروجی‌های انسانی	علائم: سردرد، تحریک چشم، خستگی، احساس سنگینی هوا	کاهش محسوس علائم پس از بازسازی گزارش شد.
مسیر علی فعال	شرایط محیطی و کالبدی - ابزارهای پایش - بهبود کیفیت محیطی - کاهش علائم SBS	مدل پیشنهادی به‌طور کامل تأیید شد.
اهمیت برای اعتبار مدل	نمونه‌ای بومی که نشان داد مداخلات ساده کالبدی و مدیریتی هم می‌توانند مسیرهای مدل را فعال کنند	تأیید کاربرد مدل در زمینه محلی.

جدول ۳ - خلاصه اطلاعات پروژه سوم

❖ پروژه چهارم: ارتقای کیفیت صوتی و هوای داخلی در آپارتمان مسکونی مجاور اتوبان صدر، تهران ایران (M. Boyouni, 2024)

این پروژه در یکی از ساختمان‌های مسکونی تهران انجام شد که به دلیل مجاورت مستقیم با اتوبان صدر و فقدان عایق‌بندی مناسب، با شدت نویز بسیار بالا مواجه بود و عملاً امکان استفاده سکونتی خود را از دست داده و به انبار تبدیل شده بود. در لایه اول، داده‌های محیطی شامل شدت نویز داخلی و کیفیت هوای تحت تأثیر ترافیک استخراج شد. در سطح کالبدی، دیوار تک‌لایه به ساختار دولایه با عایق پشم سنگ ارتقا یافت و پنجره‌های تک‌جداره موجود با پنجره‌های سه‌جداره ترکیب شدند تا یک ساختار دوبل ایجاد شود. از نظر مدیریتی، تغییر سیستم سرمایش از کولر آبی به اسپلیت نقش کلیدی داشت، زیرا امکان تهویه بدون نیاز به باز کردن پنجره‌ها را فراهم آورد. در بخش انسانی، ساکنان پیش از بازسازی از اختلال خواب، سردرد و خستگی شکایت داشتند و عملاً استفاده سکونتی از فضا ممکن نبود. پس از بازسازی، این علائم به‌طور محسوسی کاهش یافت و امکان بازگشت به کاربری مسکونی فراهم شد. در لایه دوم مدل مفهومی، ابزار تحلیلی اصلی صداسنج دیجیتال بود که امکان مقایسه شرایط قبل و بعد از بازسازی را فراهم کرد. نتایج نشان داد که سطح نویز داخلی از حدود ۷۰ دسی‌بل به نزدیک ۳۵ دسی‌بل کاهش یافت؛ معیاری که معادل شرایط سکونتی آرام و استاندارد است از منظر اعتبار مدل، این پروژه نشان داد که حتی در ساختمان‌های قدیمی و فرسوده نیز با مداخلات کالبدی و مدیریتی هدفمند می‌توان متغیرهای محیطی را کنترل کرد و پیامدهای انسانی ناشی از SBS را به حداقل رساند. بنابراین، مدل پیشنهادی در این پروژه بومی به‌طور کامل تأیید شد و ظرفیت خود را برای راهبری مداخلات بازسازی در بافت‌های شهری پرتراфик نشان داد.

لايه مدل	متغيرها / داده‌ها	یافته کلیدی
ورودی‌ها	شدت نویز از ۷۰ به ۳۵ dB ساختار دیوار (تک‌لایه به دولایه با عایق پشم سنگ)، نوع پنجره (تک‌جداره ترکیب با سه‌جداره دوبل)، سیستم سرمایش (کولر آبی به اسپیلیت)، وضعیت کاربری (انبار به مسکونی)	داده‌های محیطی و کالبدی نشان دادند که شرایط اولیه بحرانی بوده و پس از بازسازی به سطح استاندارد رسید.
ابزارهای تحلیلی (میانجی)	صداسنج دیجیتال	امکان پایش کمی شدت نویز قبل و بعد از مداخله فراهم شد.
خروجی‌های انسانی	علائم SBS: اختلال خواب، سردرد، خستگی (قبل از بازسازی شدید، پس از بازسازی برطرف شد)	بازگشت به شرایط سکونتی مطلوب پس از مداخله.
مسیر علی فعال	ارتقای پوسته و تهویه - کاهش نویز و آلودگی - رفع علائم SBS	مدل پیشنهادی به‌طور کامل تأیید شد.
اهمیت برای اعتبار مدل	نشان داد که حتی در ساختمان‌های قدیمی و پرنویز نیز مدل می‌تواند مسیرهای مداخله را راهبری کند.	تأیید کاربرد مدل در شرایط بومی پرتراфик.

جدول ۴ - خلاصه اطلاعات پروژه چهارم

۴- بحث

چهار پروژه منتخب و یافته‌های نشان دادند که مدل مفهومی معرفی شده قابلیت انطباق با مسیرهای علی بیان شده میان متغیرهای لایه های اول تا سوم را دارا می‌باشد. دو پروژه بین المللی اول بر این امر تاکید داشتند که فناوری‌های دیجیتال نظیر BIM و همچنین پایش‌های سیستماتیک با پایش و کنترل شرایط محیطی می‌توانند پلی میان عوامل سندروم ساختمان بیمار و کاهش علائم این سندروم ایجاد نمایند. این در حالی است که دو پروژه بومی نیز بیانگر این بودند که با داده‌های محیطی محدود و روش‌های غیر سیستماتیک اما منطبق بر فرایندهای BIM و LCA نیز می‌توان با تغییر شرایط محیطی و کالبدی در چارچوب مدل، مسیرهای علی را فعال نمود و منجر به کاهش علائم سندروم ساختمان بیمار (SBS) شد. این همگرایی مبین اعتبار اولیه مدل در بستر پروژه‌ها با حجم و اقلیم متفاوت می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار از یک مدل مفهومی ترکیبی BIM-LCA سلامت محور رونمایی نمودیم و اعتبارسنجی اولیه آن را با استفاده از چهار پروژه انجام دادیم. نتایج نشان دادند که مدل توانایی ارتباط بین داده‌های محیطی، کالبدی، انسانی و مدیریتی را از طریق ابزارهای تحلیلی به پیامدهای انسانی دارد و مسیرهای علی واقعی موجود در پروژه‌ها را تایید می‌کند. البته شایان ذکر است که آزمون گسترده‌تر و جامع‌تر از مدل گام بعدی در مسیر تحقیقات آتی خواهد بود.

۶- قدردانی

از همکاری صمیمانه آقایان آزادی و پیرزادی کمال سپاسگزاری را داریم. داده‌های مربوط به پروژه‌های سوم و چهارم که در این مقاله تحلیل شده‌اند، حاصل دسترسی سخاوتمندانه و مساعدت ارزشمند این بزرگواران با نویسندگان بوده است.

منابع

Isman NII, Jalaludin J, Suhaimi NF, Hashim F, Tualeka AR. Association Between Indoor Air Quality and Sick Building Syndrome Among Workers in Food Outlets in Selangor, Malaysia. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 2024;16(4):331-341. <https://doi.org/10.20473/jkl.v16i4.2024.331-341>

Maryam Sarkhosh, Ali Asghar Najafpoor, Hosein Alidadi, Jamal Shamsara, Hanieh Amiri, Tittarelli Andrea, Fatemeh Kariminejad, Indoor Air Quality associations with sick building syndrome: An application of decision tree technology, *Building and Environment*, Volume 188, 2021, 107446, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107446>

Yue Teng, Jiayi Xu, Wei Pan, Yang Zhang, A systematic review of the integration of building information modeling into life cycle assessment, *Building and Environment*, Volume 221, 2022, 109260, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109260>

D'Amico, A., Bergonzoni, G., Pini, A., & Currà, E. (2020). BIM for Healthy Buildings: An Integrated Approach of Architectural Design based on IAQ Prediction. *Sustainability*, 12(24), 10417. <https://doi.org/10.3390/su122410417>

Dusan Licina, Serra Yildirim, Occupant satisfaction with indoor environmental quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and self-reported productivity before and after relocation into WELL-certified office buildings, *Building and Environment*, Volume 204, 2021, 108183, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108183>

Jinhua Hu, Yingdong He, Xiaoli Hao, Nianping Li, Yuan Su, Huaidi Qu, Optimal temperature ranges considering gender differences in thermal comfort, work performance, and sick building syndrome: A winter field study in university classrooms, *Energy and Buildings*, Volume 254, 2022, 111554, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111554>

Walaa S.E. Ismaeel, Ahmed Gouda Mohamed, Indoor air quality for sustainable building renovation: A decision-support assessment system using structural equation modelling, *Building and Environment*, Volume 214, 2022, 108933, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108933>

Zine Filali, N.; Braish, T.; Locoge, N.; Andres, Y. Impact of the Aging Process on the Ability of Decorative Materials Containing Biocides to Support Fungal Growth. *Buildings* 2024, 14, 3859. <https://doi.org/10.3390/buildings14123859>

Alavi, H.; Forcada, N. User-Centric BIM-Based Framework for HVAC Root-Cause Detection. *Energies* 2022, 15, 3674. <https://doi.org/10.3390/en15103674>

Niza IL, de Souza MP, da Luz IM, Broday EE. Sick building syndrome and its impacts on health, well-being and productivity: A systematic literature review. *Indoor and Built Environment*. 2023;33(2): 218-236. doi:10.1177/1420326X231191079

Ioannis Nezis, George Biskos, Konstantinos Eleftheriadis, Prodromos Fetfatzis, Olga Popovicheva, Nikolay Sitnikov, Olga-Ioanna Kalantzi, Linking indoor particulate matter and black carbon with sick

building syndrome symptoms in a public office building, Atmospheric Pollution Research, Volume 13, Issue 1, 2022, 101292, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101292>

Wang, M.; Li, L.; Hou, C.; Guo, X.; Fu, H. Building and Health: Mapping the Knowledge development of Sick Building Syndrome. Buildings 2022, 12, 287. <https://doi.org/10.3390/buildings12030287>

P Inharwararak and S Stravoravdis 2023 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1261 012002. doi:10.1088/1755-1315/1261/1/012002