مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۶۳-۷۲

Original Article

ادغام خودکار مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و داده‌های بهنگام حس‌گر به منظور ارتقای مدیریت تسهیلات ساختمان

سید مجتبی متقی بور (کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی علوم و فناوری بین رشته‌یی، دانشگاه تربیت مدرس
حسین تقدس* (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران
احسان‌اله اشتهاردیان (دانشیار)
دانشکده‌ی هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس

در صنعت ساختمان بیشتر توجهات معطوف به مرحله‌ی طراحی و ساخت است. در حالی که طولانی‌ترین و پرهزینه‌ترین مرحله از دوران حیات پروژه، مرحله‌ی بهره برداری از ساختمان است. موجود بودن، در دسترس قرار داشتن، به‌روزرسانی و قابل اعتماد بودن اطلاعات راجع به ساختمان و همچنین وجود ابزار مناسب برای مدیریت این اطلاعات، مسئله‌یی حیاتی برای مدیریت کارآمد تسهیلات ساختمان است. در دوران بهره‌برداری اطلاعات ساختمان نظیر دما، رطوبت و مقدارگازهای محیطی که بیانگر وضعیت واقعی و بهنگام ساختمان‌اند، توسط حس‌گرها قابل اندازه‌گیری‌اند. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) نیز بستر مناسب برای مدیریت این اطلاعات را فراهم می‌کند. با ادغام داده‌های بهنگام حس‌گر و BIM، زمینه برای بصری‌سازی، پایش و پردازش سطح عملکرد ساختمان به صورت بهنگام و خودکار فراهم خواهد شد. در نتیجه بازخوردهایی از وضع موجود در اختیار قرار می‌گیرد که با ارتقای قابلیت‌های تعمیر و نگهداری و ایمنی، به بهبود سطح عملکرد ساختمان کمک می‌کند. طرح پیشنهادی در یک ساختمان دوطبقه با کاربری مسکونی اعتبارسنجی شد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، داده‌های حس‌گر، مدیریت تسهیلات (FM)، اطلاعات بهنگام.

m.motaghipour@modares.ac.ir
htaghaddos@ut.ac.ir
eshtehardian@modares.ac.ir

۱. مقدمه

با پایان یافتن مرحله‌ی ساخت، بهره‌برداری از ساختمان آغاز می‌شود. در این مرحله تسهیلات مختلف خدمات مکانیکی، برق و ابنیه، ساختمان را قابل بهره‌برداری و استفاده می‌سازند. بهره‌برداری، حفظ سطح عملکرد، کارایی و قابل اعتماد بودن این تسهیلات همراه با هزینه‌هایی است. در آمریکا حدود ۸۵٪ از هزینه‌های چرخه‌ی حیات ساختمان در مرحله‌ی بهره‌برداری صورت می‌پذیرد.[۱] (شکل ۱). در حالی که طبق تخمین مؤسسه‌ی بین‌المللی علوم ساختمانی[۱]، دو سوم از هزینه‌هایی که در دوران بهره‌برداری صورت می‌پذیرد، اتلاف هزینه هستند.[۲] مثلاً مؤسسه‌ی بین‌المللی استانداردها و فناوری[۲] گزارش می‌دهد که در صنعت ساخت آمریکا سالانه ۱۵٫۸ میلیارد دلار اتلاف هزینه صورت می‌گیرد که حدود ۱۰٫۶ میلیارد دلار آن مربوط به دوران بهره‌برداری از ساختمان است.[۳] این هزینه‌ها عموماً از فرایندهای مدیریت ناکارآمد ساختمان، سامانه‌های مدیریت تسهیلات اضافی، هزینه‌ی آموزش این سامانه‌ها، کارآمدی پایین آنها، دوباره‌کاری‌ها و غیره ناشی می‌شوند.[۴]

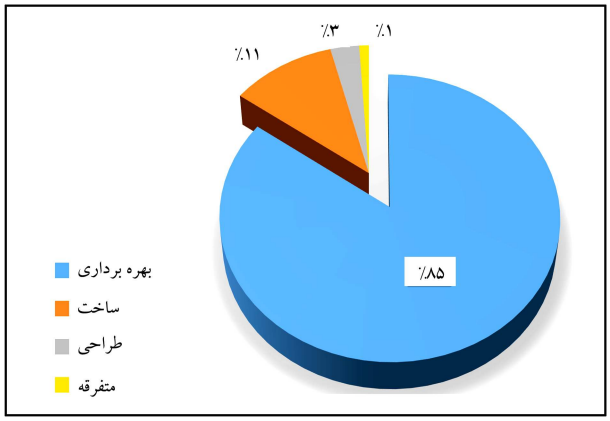
مدیریت تسهیلات کارآمد ساختمان با مدیریت مواردی نظیر تعمیر و نگهداری،[۵] انرژی و فضا،[۶و۷] ارزیابی و پایش،[۷و۸] موارد اضطراری،[۹] برنامه‌ریزی برای نوسازی[۸و۹] و ایمنی[۱۰] در ساختمان، ضمن کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، سطح عملکرد ساختمان و آسایش ساکنان را افزایش می‌دهد.

مدیریت تسهیلات فعالیت‌های چندرشته‌یی را دربرمی‌گیرد و به اطلاعات گسترده‌یی که در بخش‌های مختلف معماری، سازه و تأسیسات ساختمان ایجاد می‌شوند، نیاز دارد. بنابراین برای مدیریت کارآمد تسهیلات، در اختیار قرار داشتن اطلاعات نقش اساسی ایفا می‌کند.[۱۱،۷] قسمتی از این اطلاعات مربوط به سطح عملکرد و وضعیت واقعی ساختمان است. اطلاعات عملکردی مختلف نظیر دما، میزان سروصدا، کیفیت هوا، مقدارگازهای آلاینده، مقدار مصرف انرژی و میزان روشنایی، عموماً از طریق حس‌گر قابل اندازه‌گیری‌اند. از طرفی BIM [۳] تمام طول حیات پروژه

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۸/۴، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱/۳، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۰.
DOI:10.24200/J30.2020.54331.2633

جدول ۱. ابعاد BIM.

ابعاد	بعد اضافه شده	توصیف	کاربرد	منبع
۳D		شامل یک مدل ۳بعدی از داده‌هایی می‌شود که در واقع یک نماینده دیجیتال از ساختمان می‌باشد	تمام طول عمر ساختمان	[۱۴و۱۵]
۴D	زمان‌بندی	لینک کردن زمان‌بندی (زمان) و اطلاعات به اشیا مدل ۳بعدی به منظور تعیین توالی در طول زمان ساخت صورت می‌پذیرد. با شبیه‌سازی فعالیت‌هایی که در طول زمان ساخت صورت می‌پذیرد به ارتقا برنامه زمان‌بندی و کیفیت و ایمنی ساخت کمک می‌شود	ساخت	[۱۶]
۵D	هزینه	اضافه کردن اطلاعات مربوط به هزینه به المان‌های مدل ۳بعدی، می‌تواند به تخمین هزینه‌ها، مانیتور کردن جریان نقدینگی و اتخاذ تصمیم‌سازی‌هایی بر اساس مقادیری که به طور مستقیم از مدل استخراج می‌شود کمک کند	برنامه‌ریزی اولیه طراحی ـ ساخت بهره‌برداری	[۱۷]
۶D	پایداری	با ضمیمه کردن اطلاعات محیطی به مدل BIM با هدف بررسی عملکرد ساختمان صورت می‌پذیرد	تمام طول عمر ساختمان	[۱۸و۱۹]
۷D	مدیریت تسهیلات	از طریق ادغام تمام اطلاعات مربوط به اجزای ساختمان در تمام طول مدت حیات پروژه با مدل BIM بدست می‌آید. اطلاعاتی نظیر محل عبور لوله‌ها، اطلاعات مربوط به اجزای ساختمان که توسط شرکت‌های سازنده اجزا تامین شده‌اند	تمام طول عمر ساختمان	[۱۰،۲۰-۲۲]



شکل ۱. هزینه‌های چرخه‌ی حیات ساختمان.[۱]

(طراحی ـ ساخت ـ بهره‌برداری) را تحت تأثیر قرار می‌دهد[۱۲] و یکپارچه‌سازی[۴]، هماهنگ کردن[۵]، ثبات[۶] و در دسترس قرار داشتن[۷] اطلاعات را فراهم می‌کند.[۵] بنابراین ادغام داده‌های حس‌گر که بیانگر وضعیت واقعی عملکرد ساختمان هستند با مدل BIM که بستری برای مدیریت این اطلاعات است، قابلیت‌های جدیدی برای مدیریت تسهیلات ساختمان ایجاد خواهد کرد. در این پژوهش، BIM فقط به عنوان بستری برای نمایش به‌کار نمی‌رود، بلکه از قابلیت‌های آن برای مشخص کردن دقیق محل مشکل در مدل و همچنین فراهم کردن اطلاعات مورد نیاز برای رفع مشکل استفاده می‌شود.

در ادامه ابتدا مبانی نظری، ابزارها، مفاهیم، تعاریف مرتبط با موضوع پژوهش و همچنین تاریخچه‌یی از موضوع ارائه شده است. سپس چارچوب طرح پیشنهادی، مراحل و فرایندها، حوزه‌های کاربرد و دستاوردهای آن تشریح شده است. در انتها نیز چارچوب پیشنهادی در یک ساختمان نمونه پیاده‌سازی و اعتبارسنجی شده است.

۲. ادبیات پژوهش

۱.۲. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان یکی از روش‌هایی است که به دلیل امکان ایجاد پایگاه داده[۸] برای اجزای ساختمان و ارائه‌ی شناسنامه‌های اطلاعاتی غنی، امکان اتخاذ تصمیم‌های بهینه برای کاهش هزینه، زمان ساخت و بهینه‌سازی مصرف انرژی را فراهم می‌آورد.[۱۳] BIM مرتباً در حال توسعه و بهبود است و ویژگی‌های جدیدی به آن اضافه می‌شود. کاربرد آن در مرحله‌ی طراحی و ساخت از مرحله‌ی تحقیقات خارج شده و به‌صورت وسیعی گسترش پیدا کرده است. اگرچه کاربرد آن در مدیریت تسهیلات در حال توسعه است و تحقیقات در این زمینه در حال گسترش هستند.[۴]

بسته به اهدافی که دنبال می‌شود، BIM می‌تواند ابعاد مختلفی داشته باشد (جدول ۱). مدل دو بعدی به طرح‌هایی مثل پلان و مقطع اشاره دارد. با اضافه شدن ارتفاع مدل سه‌بعدی شکل می‌گیرد که به‌منظورهای مختلفی نظیر پرداخت صحنه[۹] و شناسایی تصادم‌ها[۱۰] کاربرد دارد. بعد چهارم یکپارچه شدن زمان با مدل سه‌بعدی است. زمان در این مفهوم[۱۱] به دو کاربرد ۱. انیمیشن ۲. ترتیب و توالی ساخت[۱۲] اشاره دارد که به برنامه‌ریزی پروژه، مرحله‌بندی[۱۳] و تعیین ترتیب و توالی ساخت کمک می‌کند.[۱۶] با اضافه شدن بعد هزینه مدل پنج‌بعدی شکل می‌گیرد که می‌تواند به‌منظور تخمین هزینه در طول طراحی مفهومی استفاده شود.[۱۷] بعد ششم مباحث مرتبط با پایداری را دربرمی‌گیرد. ادغام BIM با مدیریت تسهیلات در مدل هفت بعدی صورت می‌پذیرد که در آن اطلاعات مختلف مربوط به مرحله‌های مختلف حیات پروژه با این مدل ادغام می‌شود. برای مدیریت تسهیلات ساختمان معمولاً به یک مدل با سطح طراحی بالا نیاز است که در آن جزئیات از ساختمان موجود باشد. تمام اطلاعات مربوط به اجزای ساختمان نظیر اطلاعات ساخت، نگهداری و تعمیرات و مدت زمان ضمانت در مدل BIM قرار داده می‌شود. لی و همکاران[۲۱]

یک بستر در بستر تارنما ـ محور مدل BIM ساختمان را در دسترس قرار دادند. در این بستر با کلیک بر روی هرکدام از اجزای مدل، مقدار مصرف انرژی آن نمایش داده می‌شود. چن و همکاران[۲۲] یک چارچوب برای بهبود مدیریت تسهیلات ساختمان بر محور مدل BIM ارائه دادند. در این چارچوب فعالیت‌های مرتبط با مدیریت نگهداری ساختمان به‌صورت خودکار زمان‌بندی شده است.

۲.۲. مدیریت تسهیلات

کیفیت زندگی ساکنان ساختمان درکنارکیفیت ساخت‌وساز و طراحی، متأثر ازکیفیت مدیریت بهره برداری از ساختمان است. مدیریت تسهیلات توسط انجمن جهانی مدیریت تسهیلات IFMA [۱۴] به عنوان «یک حرفه که فعالیت‌های میان رشته‌یی را به‌منظور تضمین عملکرد صحیح محیط ساخته شده، از طریق یکپارچه‌سازی افراد، مکان، فرایندها و فناوری فراهم کرده است» تعریف شده است. از این‌رو می‌توان استنباط کرد که مدیریت تسهیلات امکان استفاده بهینه از یک پروژه را پس از تکمیل آن در فرایند بهره‌برداری به‌منظور اطمینان از حفظ و بهبود کارکرد تسهیلات ساختمان فراهم می‌سازد. در کشورهای توسعه‌یافته با پایان یافتن دوره‌ی احداث (ساخت)، بودجه‌ی بیشتری را صرف نگهداری زیرساخت‌ها می‌کنند؛ مثلاً درکشور آمریکا، از سال‌های گذشته این مسئله مشهود است. در سال ۱۹۹۷ هزینه‌ی صرف شده برای فعالیت‌های تعمیر و ارتقای زیرساخت‌ها، حدود ۲۵ درصد بیشتر از هزینه‌ی صرف شده برای ساخت‌وسازهای جدید آمریکا است.[۲۳]

درگذشته معمولاً از اسناد کاغذی به‌منظور مدیریت تسهیلات ساختمان استفاده می‌شد. اما امروزه سامانه‌های رایانه‌یی جایگزین آن شده‌اند. سامانه‌های گسترده‌ی رایانه‌یی توسط شرکت‌های مختلف به‌منظور مدیریت تسهیلات ساختمان توسعه داده شده‌اند. از جمله‌ی این سامانه‌ها می‌توان به CMMS [۱۵]، IWMS [۱۶]، BMS [۱۷]، CAFM [۱۸] اشاره کرد که هرکدام از این سامانه‌ها از بسترهای نرم‌افزاری با قابلیت‌ها و اهداف خاص خود برخوردارند. Quick Base ،ServiceNow ،iLab Core Facility نمونه‌هایی از این بسترهای نرم‌افزاری هستند. به‌طورکلی هرکدام از این نرم‌افزارها قابلیت‌های مشخصی دارند و بخش محدودی از فعالیت‌های مرتبط با مدیریت تسهیلات را هدف قرار داده‌اند.

از قابلیت‌های بالایی که در ابزارهای اینترنت اشیاء (IOT) [۱۹] وجود دارد نیز می‌توان در خدمت مدیریت تسهیلات ساختمان استفاده کرد. مثلاً می‌توان داده‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات مختلف ساختمان را در برچسب‌های RFID [۲۰] (radio frequency identification)[۲۱] ذخیره‌سازی و به مدل یا نرم‌افزار مورد نظر ارسال کرد.[۲۴] بارکدهای دو بعدی نظیر QR [۲۲] را به تجهیزات ضمیمه کرد تا کاربر با اسکن کردن بارکد دوبعدی به وسیله‌ی گوشی هوشمند خود به اطلاعات مختلف آن تجهیزات دسترسی پیدا کند.[۴] همچنین سامانه‌ی BMS [۲۳] می‌تواند اطلاعات بهنگام راجع به ساختمان در اختیار قرار دهد و بسترهای لازم برای کنترل و مدیریت ساختمان را فراهم سازد.[۲۵]

۳.۲. نحوه‌ی تبادل اطلاعات

به‌طورکلی تبادل داده بین دو نرم‌افزار به سه طریق امکان‌پذیر است.[۲۶] در اتصال مستقیم[۲۴] از یک نرم‌افزار عملکردی واسط[۲۵] برای استخراج داده از یک نرم‌افزار و نوشتن[۲۶] داده بر روی نرم‌افزار دیگر استفاده می‌شود. در شیوه‌ی تبادل خصوصی[۲۷] جریان انتقال داده توسط شرکت‌های توسعه‌دهنده‌ی نرم‌افزار اندیشیده شده است؛ به این معنی که بین دو نرم‌افزار پیش‌بینی انتقال صورت پذیرفته است. شیوه‌ی تبادل عمومی[۲۸] صورت باز است و شامل زبان‌هایی همچون فایل متنی، IFC [۲۹] و XML می‌شود. در حال حاضر یک رویکرد کلی و استاندارد به منظور ادغام داده‌های بهنگام حس‌گر با مدل BIM وجود ندارد. به این منظور باید به چالش‌های بازیابی اطلاعات از خارج مدل غلبه کرد.[۲۷و۲۸]

۴.۲. ادغام BIM و داده‌های حس‌گر به‌منظور مدیریت تسهیلات

ادغام BIM و مدیریت تسهیلات به‌منظور بهره‌برداری و نگهداری ساختمان دارای محاسن مختلفی نظیر کاهش فرایندهای دستی مدیریت اطلاعات، بهبود صحت اطلاعات تسهیلات، افزایش سرعت و کارآمدی دسترسی به اطلاعات و شناسایی تصادم‌هاست.[۲۹] از طرفی اندازه‌گیری به موقع سطح عملکرد ساختمان می‌تواند منجر به بهبود عملکرد ساختمان شود.[۳۰] مثلاً در زمینه‌ی مدیریت انرژی، اطلاع از مقدار مصرف انرژی بخش‌های مختلف ساختمان می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی شود. به عبارتی«کاهش مصرف انرژی = اطلاعات + انرژی».[۳۱] با یکپارچه‌سازی داده‌های حس‌گر و مدل BIM، داده‌های حس‌گر مانند یک مخزن اطلاعات برای مدل BIM عمل می‌کنند. در این حالت BIM ماهیت پویا پیدا می‌کند. چون مقدار این اطلاعات با گام‌های مشخص در طول زمان تغییر می‌کنند و مقدار ثابتی ندارند.[۳۲]

کنسک[۳۳] سه راه مختلف ادغام داده‌های حس‌گر با مدل BIM را از طریق Rhino، API Revit و Dynamo بررسی کرد و نشان داد که امکان چنین ادغامی به روش‌های مختلف وجود دارد. مطالعات صورت‌پذیرفته نشان می‌دهد که اولین تلاش‌های جدی به منظور ادغام BIM و حس‌گرها در سال ۲۰۰۵ و در مرحله‌ی ساخت ساختمان صورت پذیرفته است.[۳۴] مفهوم مدیریت تسهیلات و پایش انرژی مصرفی در ساختمان با ادغام این دو بخش در سال ۲۰۰۸ آغاز شد.[۳۵و۳۶] سوپرابهاس و همکاران[۳۷] داده‌های حس‌گر را به داده‌های استخراج شده در شکل COBie (construction operations building information exchange)[۳۰] اضافه کرد تا ضمن بصری‌سازی وضعیت ساختمان در صورت بروز مشکل اقدام لازم توسط تیم تسهیلات ساختمان صورت پذیرد. WILLS و همکاران[۳۸] ادغام داده‌های حس‌گر و مدل BIM را در یک پایگاه داده به‌منظور مدیریت تسهیلات ساختمان مورد ارزیابی قرار دادند. داده‌های حس‌گر از طریق CAFM [۳۱] به پایگاه داده اضافه شد و اطلاعات مدل BIM نیز به آن منتقل شد. ناکاما و همکاران[۳۹] به بررسی مشکلات CAFM نظیر وجود وقفه‌ی زمانی[۳۲] در به‌روزرسانی اطلاعات، هزینه و زمان‌بر بودن ترکیب آن با IT و نیاز به جمع‌آوری مقدار زیادی از اطلاعات در این سامانه‌ها پرداخت. به همین سبب پیشنهاد BIM تارنما ـ محور[۳۳] را ارائه داد که در آن وظایف و اموری که به‌منظور نگهداری باید صورت بپذیرند در مدل BIM ایجاد می‌شود؛ سپس مدل BIM تبدیل به یک مدل تارنما ـ محور می‌شود که داده‌های حس‌گر از طریق تارنما قابل مشاهده و بصری‌سازی هستند. چنگ و همکاران[۴۰] دما و رطوبت ثبت شده‌ی ساختمان را از طریق Dynamo به مدل BIM اضافه کردند.

۱.۴.۲. کاربردها

ـ پایش و بصری‌سازی: ارتباط نزدیک بین فهمیدن و بصری‌سازی وجود دارد؛ مثلاً در زبان انگلیسی وقتی افراد موضوعی را متوجه می‌شوند می‌گویند دیدم (به جای فهمیدم). با پایش و بصری‌سازی وضعیت ساختمان، مدیر تسهیلات ساختمان به‌صورت بهنگام از وضعیتی که ساختمان در آن قرار دارد آگاه می شود.

این امر تصمیم‌هایی را که راجع به ساختمان اتخاذ می‌شود، بر اساس وضعیت واقعی ساختمان بهبود می‌بخشد. پیوند BIM با اطلاعات حس‌گرها می‌تواند امکان پایش بهنگام و خودکار ساختمان را فراهم سازد. این بصری‌سازی از طریق AR [۳۴] [۴۱] یا ابزارهای BIM [۴۲،۴۳] صورت می‌پذیرد.

ـ مکان‌یابی اجزا و تجهیزات ساختمان: مکان‌یابی مسئله‌یی پرتکرار و زمان‌بر به منظور تعمیر و نگهداری یا مدیریت تجهیزات است. به‌خصوص در مجموعه‌های بزرگ نظیر بیمارستان‌ها، به‌طور معمول کارکنان تسهیلات ساختمان نیاز به مکان‌یابی محل قرارگیری اجزا و تجهیزات ساختمان پیدا می‌کنند. به‌این‌منظور می‌توان یک تگ RFID به تجهیزات ضمیمه کرد. سپس با برقراری ارتباط بین مدل BIM و RFID، محل قرارگیری تجهیزات را در مدل BIM بصری‌سازی کرد.[۴۴] راه کار دیگر استفاده از سامانه‌ی GIS است که در ترکیب با BIM محل قرارگیری تجهیزات را در مدل بصری‌سازی می‌کند.[۴۵]

ـ قابلیت بهره‌برداری و نگهداری: راهبردهایی که به منظور تعمیر و نگهداری در پیش گرفته می‌شود، براساس FEMP [۳۵] به سه دسته‌ی کلی زیر تقسیم می‌شود:

- تعمیر و نگهداری واکنشی: در این حالت هیچ تلاشی یا اقدامی به‌منظور نگهداری تسهیلات از قبل صورت نمی‌پذیرد و صرفاً بعد از رخ دادن خرابی و زمانی که جزئی از خدمت‌رسانی خارج شد، تعمیرات صورت می‌پذیرد.
- تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه: اقدامات مطابق با یک برنامه‌ی زمان‌بندی شده یا برنامه‌ی مبتنی برکار دستگاه است که به‌منظور تشخیص، پیشگیری و کاهش آسیب جزء یا سیستم، از طریق کنترل خرابی تا سطح قابل پذیرش انجام می‌شود. این رویکرد شامل تعمیرات دوره‌یی یا تعویض در فواصل زمانی تعریف شده است.
- تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌شده: اقداماتی که شروع یک سازوکار آسیب را تشخیص می‌دهند. به عبارت دیگر قبل از بروز هرگونه آسیب قابل توجه در وضعیت فیزیکی اجزا، عوامل مخرب حذف یا کنترل می‌شوند. در واقع در این حالت نشانه‌ها و علائم احتمال بروز یک خرابی برای تعویض پیش از خرابی، تحت پیگرد قرار می‌گیرند. از برخی آزمون‌ها نظیر تحلیل لرزش، گرماسنجی مادون قرمز استفاده می‌شود.

عامل اصلی در انتخاب راهبرد نگهداری مناسب برای هر سازمان، ریسکی است که در صورت خرابی آن تسهیل بر سازمان تحمیل می‌شود. بنابراین بر اساس اهمیت و حساسیت تسهیلات مختلف سازمان، می‌توان این راهبردها را با یکدیگر ترکیب کرد.

یکی از مهم‌ترین رکن‌های مدیریت تسهیلات در دوران بهره‌برداری از ساختمان، به کمینه رساندن تمام هزینه‌های مرتبط با استفاده از تسهیلات[۴۶] و هم‌چنین هزینه‌های نگهداری است.[۴۷] ادغام BIM و حس‌گرها می‌تواند بستری برای کمک به مدیریت تعمیر و نگهداری از طریق دسترسی بهنگام به داده‌ها فراهم کند[۶] که این امر در راهبردهای پیش‌گیرانه و پیش‌گویانه کاربرد دارد. حس‌گرها اطلاعات بهنگامی راجع به وضعیت ساختمان در اختیار قرار می‌دهند.[۴۸] پردازش داده‌های حس‌گر با استفاده از API در امر شناسایی و تشخیص زودهنگام مشکل کمک می‌کند. مثلاً در صورتی‌که یک پارامتر (مثل دما) به صورت غیر عادی تغییر کند، نشان‌دهنده‌ی وقوع مشکل یا خرابی است.

ـ مدیریت موارد اضطراری و ایمنی: لازمه‌ی مدیریت موارد اضطراری، اطلاع از وضعیتی است که ساختمان در آن قرار دارد و ابزاری برای بصری‌سازی آن است. این امر از طریق ادغام داده‌های حس‌گر با مدل BIM صورت می‌پذیرد. تاکنون پژوهش‌هایی در خصوص استفاده از BIM و داده‌های حس‌گر به‌منظور تشخیص محل قرارگیری حادثه‌دیدگان و نمایش آن در مدل، با هدف محاسبه‌ی کوتاه‌ترین مسیر خروج با استفاده از اطلاعات ساختمان که به‌صورت بهنگام در مدل BIM قرار دارند[۴۹] و پایش سلامت و ایمنی ساختمان صورت پذیرفته است.[۵۰]

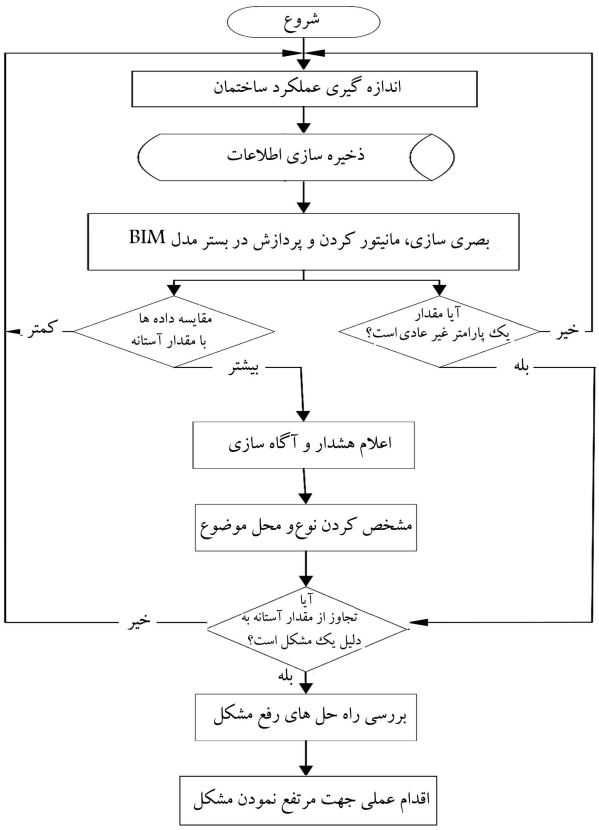
ـ کنترل و مدیریت مصرف انرژی: تحقیقات صورت پذیرفته در زمینه‌ی ادغام حس‌گرها و مدل BIM به‌منظور مدیریت انرژی مصرفی، به‌طور عمده بر بصری‌سازی و پایش بهنگام مصرف انرژی، تحلیل عملکرد انرژی و معیار انرژی [۳۶] متمرکز است.[۵۱] از این طریق می‌توان ضمن بصری‌سازی مصرف انرژی بخش‌های مختلف ساختمان، با نصب اعمالگر یا استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مصرف انرژی ساختمان را کنترل کرد.[۵۲،۵۳] هم‌چنین داده‌های ثبت شده‌ی حس‌گر می‌تواند معیاری برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی های انرژی باشد. با استفاده از BIM و سناریوی «چه می‌شود اگر» می‌توان نحوه‌ی عملکرد مصرف انرژی را در شرایط و پیکربندی‌های مختلف شبیه‌سازی کرد و با مقدار مصرف انرژی واقعی ثبت شده توسط حس‌گرها مقایسه کرد. این امر به شناسایی راه حلی که بیشترین کارآمدی انرژی را دارد، کمک می‌کند.

۵.۲. خلأ تحقیقاتی

در پژوهش‌های قبلی، بصری‌سازی داده‌های حس‌گر از طریق ابزارهای BIM و ذخیره‌سازی این داده‌ها در پایگاه داده به‌منظور تحلیل‌ها و گزارش‌دهی صورت پذیرفته است. پردازش داده‌ها بر روی داده‌های تاریخی و ثبت شده صورت پذیرفته است. پردازش داده‌ها در بستر مدل BIM به‌صورت بهنگام و خودکار، جنبه‌ی نو بودن تحقیق حاضر را دربرمی‌گیرد. در این پژوهش یک چارچوب ارائه شده است تا داده‌هایی که توسط حس‌گر اندازه‌گیری شده‌اند، به‌صورت بهنگام و خودکار در بستر مدل BIM بصری‌سازی، پایش و پردازش شوند. پردازش بر روی داده‌ها با استفاده از رابط برنامه‌نویسی (API) [۳۷] صورت پذیرفته است. در نتیجه بازخوردهایی [۳۸] از اطلاعات در اختیار قرار می‌گیرد که به بهبود سطح عملکرد ساختمان کمک می‌کند. هم‌چنین قسمتی از اموری که توسط تیم تسهیلات باید صورت بپذیرد، می‌تواند به‌صورت خودکار صورت پذیرد.

۳. چارچوب طرح پیشنهادی

هدف چارچوب پیشنهادی (شکل۲) کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از ساختمان و در عین حال افزایش سطح عملکرد ساختمان است. این امر از طریق مدیریت کارآمد ساختمان، حذف دوباره‌کاری‌ها، در دسترس قرار داشتن اطلاعات، اطلاع بهنگام از وضعیت ساختمان، استفاده‌ی بهینه از تسهیلات و حذف سامانه‌های مدیریت تسهیلات اضافی صورت می‌پذیرد. سطح عملکرد ساختمان از نظر دما، رطوبت و گازهای محیطی توسط حس‌گرهای اندازه‌گیری، در یک پایگاه داده ذخیره‌سازی و با مدل BIM یکپارچه‌سازی می‌شود. از طریق این یکپارچه‌سازی، امکان بصری‌سازی و پایش وضعیت واقعی ساختمان، توسط رابط کاربری [۳۹] ایجاد شده، فراهم می‌شود. پردازش داده‌ها به‌صورت بهنگام و خودکار در بستر این رابط کاربری، با استفاده از API صورت می‌پذیرد تا درصورتی که مقدار یک پارامتر از حد آستانه تجاوز کند یا داده‌ی غیرعادی رخ دهد، نوع و محل مشکل در مدل بصری‌سازی و مشخص شود. مدیر تسهیلات ساختمان موضوع را بررسی می‌کند و ضمن ارزیابی مسئله، در

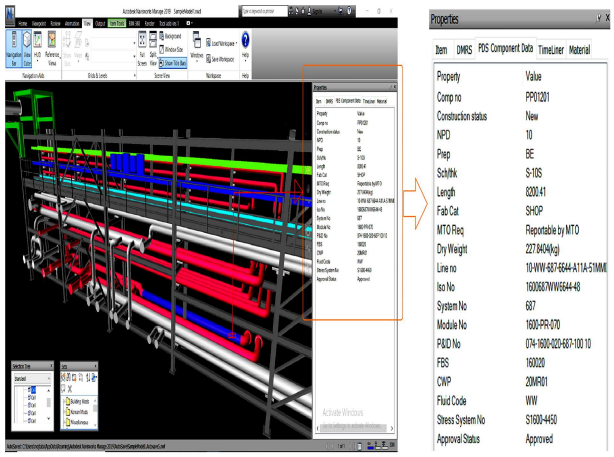


شکل ۲. روندنمای چارچوب پیشنهادی.

صورت نیاز اقدام مناسب را انجام می‌دهد. مثلاً در صورتی که گاز منواکسیدکربن[۴۰] در محیط از حد مجاز فراتر رود، می‌تواند باعث مرگ خاموش ساکنان ساختمان شود یا مقدار رطوبت در مجاورت یک لوله می‌تواند نشان‌دهنده‌ی وقوع نشتی در لوله باشد. در این موارد و موارد مشابه، با اندازه‌گیری وضعیت عملکرد ساختمان از طریق حس‌گرها و پردازش داده‌ها (مقایسه با مقدار مجاز) می‌توان اقدام متناسب را به‌منظور برطرف کردن مشکل اتخاذ کرد. منظور از داده‌ی غیرعادی این است که مثلاً در صورتی که سامانه‌ی گرمایشی خانه روشن باشد ولی مقدار دمای اندازه‌گیری شده توسط حس‌گر در محدوده‌ی مطلوب قرار نگیرد، این امر نشان می‌دهد که در سامانه‌ی گرمایشی خانه مشکلی رخ داده است.

ارتباط بین پایگاه داده و مدل BIM از طریق کدنویسی به زبان VB.NET برقرار شده است. داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت خودکار و بهنگام در جداول پایگاه داده قرار می‌گیرند. بین عناصر مختلف مدل و پایگاه داده، ارتباط برقرار می‌شود. به این معنا که هر داده‌ی اندازه‌گیری شده به فضا یا المان مشخصی از مدل اختصاص پیدا کرده است. برخی از داده‌ها به شکل یگانه[۴۱] در نظر گرفته شده‌اند تا مقدار آنها ثابت باشد و فرایند اختصاص داده شدن داده‌ها تسهیل شود. در نهایت کد نوشته شده در قالب یک افزونه به نوار ابزار مدل اضافه می‌شود. این افزونه[۴۲] برای همیشه در مدل باقی خواهد ماند. کاربر با هر بار کلیک بر روی افزونه، در پنجره‌ی ظاهر شده ارتباط با پایگاه داده‌ی خارجی را می‌تواند مدیریت کند. از طریق این پنجره امکان برقراری ارتباط یا قطع ارتباط وجود دارد. با هر بار تغییر در مقدار داده‌های ثبت شده توسط حس‌گرها، این داده‌های به شکل خودکار در مدل به‌روزرسانی خواهند شد.

دسترسی به اطلاعات مختلفی که به‌منظور رفع مشکل مورد نیاز هستند، مسئله‌یی



شکل ۳. اطلاعات ثبت شده لوله در مدل BIM.

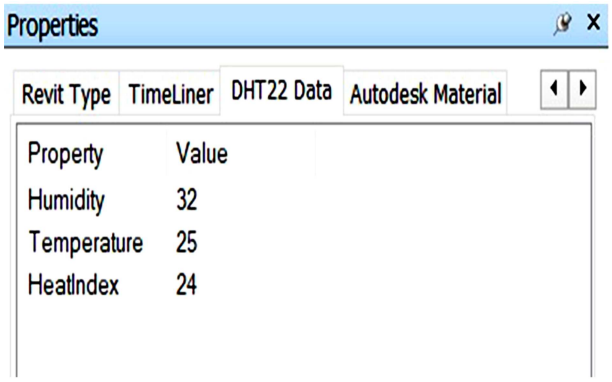
پیچیده است. اطلاعات به شکل اسناد کاغذی غیر قابل اعتماد، متکی به ذهن افراد، خارج از دسترس، ناقص و... هستند یا در بعضی موارد مدت زمان زیادی تلف می‌شود تا از منابع مختلف اطلاعات جمع‌آوری شود. اما در مواردی که یک مشکل محیطی توسط چارچوب پیشنهادی شناسایی شد، اطلاعات مختلفی از ساختمان که به‌منظور رفع مشکل مورد نیاز هستند، از طریق مدل BIM در دسترس خواهند بود. مثلاً در صورتی که آتش‌سوزی رخ دهد، محل قرارگیری شیرهای آتش‌نشانی، مسیرهای ورود و خروج، روابط مختلف فضایی و... در دسترس هستند یا در صورتی‌که نشتی توسط چارچوب پیشنهادی شناسایی شد، نقشه و جانمایی قرارگیری لوله‌های ساختمانی، جنس لوله‌ها و... از طریق این مدل می‌تواند در دسترس قرار گیرد. در واقع مزیت استفاده از BIM در این چارچوب این است که هم بصری‌سازی و مقایسه‌ی پارامترها به‌صورت بهنگام در بستر این مدل قابل انجام است و هم وقتی که مشکل شناسایی شد، اطلاعاتی که به‌منظور رفع مشکل مورد نیاز است نیز به صورت منسجم و یکپارچه از طریق این مدل در دسترس قرار دارند. مثلاً با کلیک بر روی هر کدام از لوله‌های مدل، پنجره ویژگی‌ها[۴۳] مطابق با شکل ۳ نمایش داده می‌شود. در زبانه‌های مختلف این پنجره اطلاعات مختلفی از جمله جنس، طول، قطر، شماره‌ی استاندارد ISO مرتبط، چگالی، شماره‌ی خط لوله، مدت زمان گارانتی، شماره‌ی لوله، تاریخ نصب و تأمین‌کننده در دسترس قرار خواهد داشت. مطابق با اهدافی که دنبال می‌شود می‌توان پارامترهای مختلفی را در این پنجره تعریف کرد تا با کلیک بر روی هر گزینه از مدل نمایش داده شوند. این اطلاعات به صورت منسجم و در لحظه از طریق مدل در دسترس‌اند. قسمتی از اموری که باید توسط تیم تسهیلات به صورت دستی انجام شود، در این چارچوب به صورت خودکار صورت می‌پذیرد. مثلاً ممکن است که مقدار دمای آب لوله‌های موتور خانه، به‌صورت دوره‌یی توسط تیم تسهیلات ساختمان کنترل شود. اما در چارچوب پیشنهادی این پارامتر به‌صورت بهنگام توسط حس‌گرها اندازه‌گیری و از طریق یکپارچه‌سازی با مدل BIM، در رابط گرافیکی کاربری نمایش داده می‌شوند.

۴. اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی

به‌منظور اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی، یک ساختمان دوطبقه با کاربری مسکونی برای مطالعه‌ی موردی انتخاب شد. نرم‌افزار Navisworks Manage ۲۰۱۹ که

جدول ۲. مقادیر مجاز پارامترهای ساختمان.

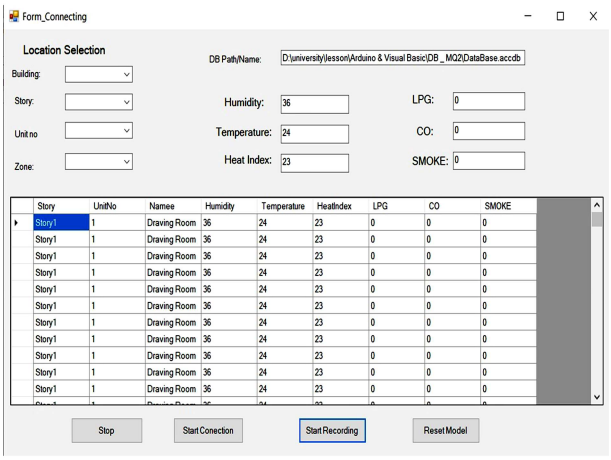
پارامتر	واحد	حد نرمال	کنترل شده در مطالعه‌ی موردی
دما	°C	۱۸-۲۵	بله
رطوبت	٪	۵۰-۹۰	بله
منواکسیدکربن	ppm	< ۲۰	بله
دی‌اکسیدکربن	ppm	< ۸۰۰۰	خیر
متان	LEL	< ۱۰	خیر
روشنایی	lx	≥ ۳۰۰	خیر
گاز مایع	ppm	< ۱۰	بله
دود	ppm	< ۱۰	بله
سر و صدا	db	≤ ۷۰ (روز) ≤ ۵۵ (شب)	خیر



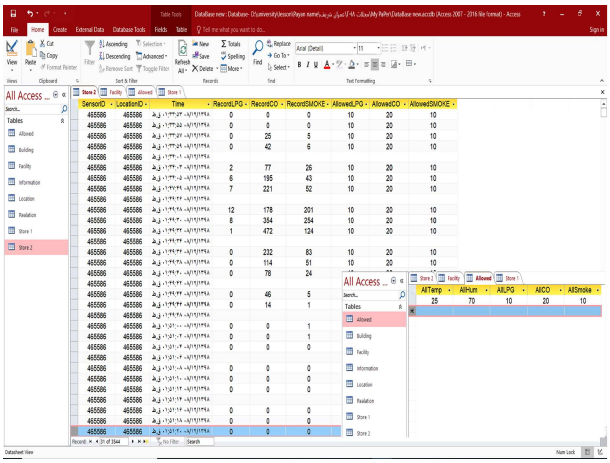
شکل ۴. نمایش داده‌های حس‌گر در زبانه‌ی Property.

یکی از ابزارهای رایج BIM است، برای مدیریت و پیمایش مدل در نظر گرفته شد. در این مطالعه از حس‌گر MQ۲ به‌منظور اندازه‌گیری گازهای محیطی و حس‌گر DHT۲۲ به‌منظور اندازه‌گیری دما، رطوبت و آسایش دمایی استفاده شده است. دلیل انتخاب این حس‌گرها در دسترس بودن، دقت مناسب و کم‌هزینه بودن آنها بوده است. مقادیر مجاز برای هر کدام از پارامترهایی که توسط حس‌گرها قابل اندازه‌گیری هستند، در جدول ۲ مشخص شده‌اند. این مقادیر به‌عنوان حد مطلوب برای هر کدام از پارامترها تعریف شده است تا مقایسه بین داده‌های ثبت شده‌ی حس‌گر و حدود مجاز تعیین شده صورت پذیرد.

با برقراری ارتباط بین پایگاه داده و مدل BIM، داده‌های حس‌گر به‌صورت خودکار و بهنگام در مدل BIM به‌روزرسانی می‌شوند. بصری‌سازی این داده‌ها در مدل به دو صورت امکان‌پذیر است: ۱. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حس‌گرها، در پنجره Property اضافه شده‌اند (شکل ۴). با کلیک بر روی تسهیل مورد نظر، اطلاعات مربوط به آن در این پنجره نمایش داده می‌شود. این اطلاعات با گام‌های زمانی تعیین شده، به‌روزرسانی می‌شوند. ۲. رابط گرافیکی کاربری به مدل اضافه شده است (شکل ۵). اطلاعات مختلف به‌صورت بهنگام و خودکار در این پنجره بصری‌سازی می‌شوند. در این مرحله اطلاعات مختلفی که توسط حس‌گر اندازه‌گیری شده‌اند، فقط نمایش داده می‌شوند تا مدیر تسهیلات ساختمان از سطح عملکرد مطلع باشد. کاربر می‌تواند از طریق ابزارهای قرار داده شده در پنجره‌ی رابط گرافیکی کاربر، بین بلوک‌های ساختمانی، طبقات، واحدها و مناطق[۴۴] ساختمان



شکل ۵. بصری‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حس‌گرها در رابط گرافیکی.

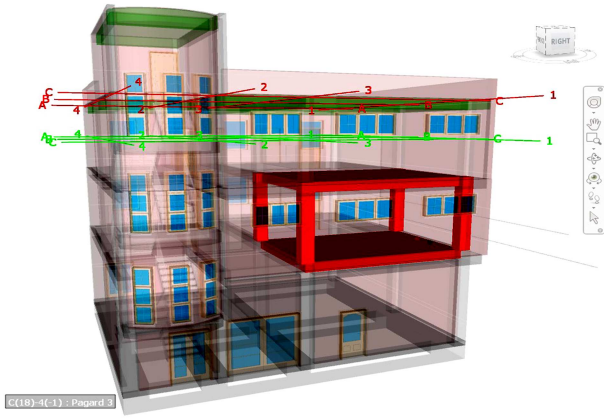


شکل ۶. ذخیره‌سازی داده‌های حس‌گر در پایگاه داده Microsoft Access و نمایش و تعیین حدود مجاز پارامترهای محیطی.

پیمایش[۴۵] کند تا تعیین کند داده‌های مربوط به کدام فضا در این پنجره نمایش داده شوند.

داده‌های حس‌گر به‌صورت بهنگام و خودکار، با گام‌های زمانی مشخص در پایگاه داده Access ذخیره‌سازی می‌شوند (شکل ۶). این پایگاه داده در واقع مثل یک مخزن برای مدل BIM عمل می‌کند و پارامترهای مورد نیاز برای بصری‌سازی، پایش و پردازش سطح عملکرد واقعی ساختمان از طریق مدل BIM را فراهم می‌کند. گام‌های زمانی برای ثبت داده‌ها قابل تنظیم‌اند. متناسب با نوع و اهمیت پارامتر مورد اندازه‌گیری می‌توان گام‌های زمانی را تنظیم کرد. در این مطالعه‌ی موردی گام‌های زمانی برای ثبت داده در حالت عادی با فواصل زمانی پنج دقیقه‌یی تنظیم شده است. اما در صورتی که مقدارگازهای محیطی اندازه‌گیری شده از مقدار مجاز تجاوز پیدا کند، ثبت داده‌ها با فواصل زمانی دو ثانیه‌یی صورت می‌پذیرد. دلیل انتخاب دو ثانیه این است که گام‌های زمانی اندازه‌گیری پارامترها در حس‌گر DHT۲۲ با فواصل دوثانیه‌یی و حس‌گر MQ۲ با فواصل یک‌ثانیه‌یی است. در نتیجه بیشترین مقدار به عنوان گام زمانی مناسب در نظرگرفته شده است.

در پایگاه داده علاوه بر داده‌های اندازه‌گیری شده، حدود مجاز پارامترهای محیطی قابل مشاهده است. حدود مجاز در جدول جداگانه قرارگرفته‌اند که مقدار آنها تنظیم شدنی است. تغییر مقدار آنها توسط کاربر از این جهت حائز اهمیت



شکل ۷. بصری‌سازی محل مشکل در مدل BIM.

است که مثلاً در طول سال مقدار دمای مطلوب محیطی ممکن است دستخوش تغییراتی شود. در نتیجه کاربر می‌تواند حد مجاز دما را در فصول مختلف سال تعیین و مشاهده کند. حس‌گرها سطح عملکرد ساختمان را از طریق اندازه‌گیری پارامترهای مختلف ساختمان اندازه‌گیری می‌کنند و سپس داده‌های ثبت شده را به پایگاه داده ارسال می‌کنند. بین اطلاعات مختلف پایگاه داده و بخشی از مدل که اطلاعات به آن مربوط است از طریق کد API ارتباط برقرار شده است . به این صورت، هر حس‌گر به یکی از تسهیلات ساختمان اختصاص پیدا کرده است و داده‌های ثبت‌شده توسط آن حس‌گر به آن تسهیل نسبت داده شده است. حس‌گر MQ۲ به اتاق نشیمن واقع در طبقه‌ی اول اختصاص پیدا کرده است. داده‌های حس‌گر از طریق افزونه اضافه شده به مدل تحلیل و پردازش شده است. در صورتی که مقدار داده‌ی اختصاص داده شده به تسهیل مورد نظر در محدوده‌ی مجاز قرار نگیرد، ضمن ارائه‌ی پیغام هشدار به مدیر تسهیلات ساختمان، محلی که در آن مشکل رخ داده است، در مدل مشخص می‌شود. شکل ۷ بیانگر حالتی است که مقدار گاز منو اکسیدکربن در فضای نشیمن از حد مجاز تجاوز کرده است. در نتیجه ضمن کاهش شفافیت سایر قسمت‌های مدل، اتاق مورد نظر با رنگ قرمز در مدل مشخص شده است تا اقدام متناسب توسط تیم تسهیلات ساختمان صورت پذیرد.

۵. بحث

امروزه ابزارهای مختلفی نظیر حس‌گر و BIM با اهداف گوناگونی در خدمت صنعت ساخت وجود دارند. هر کدام از این ابزارها قابلیت‌ها و محدودیت‌هایی دارند. در این پژوهش تلاش شده است که از طریق ادغام حس‌گر و BIM، ضمن رفع این محدودیت‌ها از طریق هم‌افزایی، قابلیت‌های جدیدی برای مدیریت ساختمان ایجاد شود که منجر به ارتقای سطح عملکرد ساختمان شود. چارچوب پیشنهادی مزیت‌های زیر را دارد:

- از انعطاف‌پذیری برخوردار است؛ به این معنی که بسته به اهدافی که دنبال می‌شود می‌توان پارامترهای مختلف در ساختمان را از طریق آن پردازش کرد.
- از یک پایگاه داده بهره‌مند است که داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط حس‌گرها در آن ذخیره‌سازی می‌شود.
- هزینه‌ی پیاده‌سازی این سیستم پایین است.
- داده‌های حس‌گر، به‌صورت خودکار و بهنگام اطلاعات مربوط به سطح عملکرد ساختمان را در اختیار قرار می‌دهند و دیگر نیازی به جمع‌آوری دستی داده‌ها نیست.
- اطلاعات بهنگام ساختمان با اطلاعات مرحله‌ی طراحی و ساخت ساختمان در مدل BIM به‌صورت یکپارچه و منسجم قرار می‌گیرند.
- هم شناسایی و ارزیابی مشکل، هم اطلاعات مورد نیاز برای رفع مشکل، به صورت منسجم و یکپارچه در بستر مدل BIM مهیا می‌شود.
- پردازش سطح عملکرد ساختمان بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده، به صورت خودکار و بدون دخالت عامل انسانی صورت می‌گیرد.

سیستم‌های تجاری‌سازی شده‌ی متنوعی برای مدیریت تسهیلات ساختمان وجود دارند. یکی از کارامدترین و کامل‌ترین این سیستم‌ها، BMS است. برتری و وجه تمایز چارچوب پیشنهادی نسبت به سیستم BMS این است که:

- هزینه‌ی پیاده‌سازی آن به مراتب ارزان‌تر است و به تجهیزات کمتری نیاز دارد.
- بسترهای نرم‌افزاری سیستم BMS قابلیت نمایش سه‌بعدی دارند، اما سطح جزئیات و قابلیت‌های[۴۶] مدل سه‌بعدی BIM بسیار فراتر از نرم‌افزارهای نمایش سه‌بعدی BMS است.
- از طریق نرم‌افزارهای BMS فقط شناسایی مشکل امکان‌پذیر است؛ اما در چارچوب پیشنهادی بعد از شناسایی مشکل، اطلاعاتی که به‌منظور رفع مشکل مورد نیاز است به‌صورت یکپارچه، منسجم و در لحظه، از طریق مدل BIM در دسترس قرار دارند. مثلاً در صورتی که توسط نرم‌افزارهای سیستم BMS، نشتی لوله‌ها شناسایی شد، اطلاعاتی مثل نقشه جانمایی لوله‌ها، مدت زمان گارانتی و جنس لوله قابل شناسایی نیست. اما در چارچوب پیشنهادی بعد از شناسایی خرابی، تمام این اطلاعات به صورت منسجم و یکپارچه و در همان لحظه از طریق مدل BIM در دسترس قرار دارند.

از محدودیت‌های چارچوب پیشنهادی می‌توان به این مورد اشاره کرد که کاربر آن باید از دانش ابتدایی نسبت به رایانه برخوردار باشد. دسترسی به این نرم‌افزار در این چارچوب فقط از طریق رایانه‌ی شخصی امکان‌پذیر است که به‌عنوان زمینه‌ی تحقیقاتی آینده می‌توان این امر را از طریق تلفن همراه هوشمند و ابزارهایی مانند آن میسر کرد.

۶. نتیجه‌گیری

وضعیت عملکرد و شرایط واقعی ساختمان از طریق حس‌گرها قابل اندازه‌گیری است. BIM به‌دلیل برخورداری از هوشمندی، قابلیت همکاری و انعطاف‌پذیری بستری برای مدیریت این اطلاعات را فراهم می‌کند. با ادغام داده‌های حس‌گر و مدل BIM، می‌توان وضعیت عملکرد ساختمان را بصری‌سازی، پایش و پردازش کرد. این امر منجر به مواردی نظیر مدیریت موارد اضطراری، شناسایی زودهنگام خرابی‌ها، افزایش قابلیت اطمینان در ساختمان، بازدهی بالاتر تسهیلات ساختمان می‌شود. مزیت دیگر این ادغام این است که بازدیدهایی که باید به‌صورت دوره‌یی و دستی توسط گروه تسهیلات صورت پذیرد، در این چارچوب به‌صورت خودکار و بهنگام پایش می‌شوند. از دیگر دستاوردهای چارچوب پیشنهادی این است که داده‌های حس‌گر با گام‌های زمانی مشخص در پایگاه داده Mi-۲۰۱۶ crosoft Accessذخیره‌سازی شده است. از اطلاعات ثبت‌شده‌ی حس‌گرها

در پایگاه داده می‌توان در تحلیل، گزارش‌نویسی و تشکیل فرایندهای استدلال مبتنی‌بر مورد (CBR) استفاده کرد. مزیت استفاده از BIM در این چارچوب این است که علاوه‌بر نمایش و بصری‌سازی وضعیت ساختمان و محلی که دچار خرابی شده است، می‌توان اطلاعات مختلفی نظیر جانمایی لوله‌ها در کف‌ها و دیوارها، محل قرارگیری شیرهای آتش‌نشانی، مسیرهای ورود و خروج، دستورالعمل های مرتبط با نگهداری تجهیزات و مدت زمان گارانتی را از مدل استخراج کرد.

در چارچوب پیشنهادی داده‌های حس‌گرها به‌صورت بهنگام و خودکار در پایگاه داده‌ی Microsoft Access ۲۰۱۶ذخیره‌سازی می‌شوند. داده‌های تاریخی کاربردهای مختلفی دارند. مهم‌ترین کاربرد آن تحلیل داده‌ها با روش‌هایی نظیر جدول اتحاد[47]، معیارها[48]، خطوط عملکردی[49] است. تحلیل داده‌های ذخیره شده، به شناسایی خرابی‌های پرتکرار، پیش‌بینی وقوع خرابی تجهیزات ساختمان و پیش‌گیری از وقوع خرابی‌های غیرمنتظره می‌تواند کمک کند. داده‌های ثبت شده به منظور گزارش‌دهی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. از گزارش‌دهی بر اساس بازیابی اطلاعات تاریخی ذخیره شده، توسعه دهنده‌های آیین‌نامه‌ها و استانداردها بهره‌مند می‌شوند. از دیگر کاربردهای داده‌های تاریخی، استفاده از آنها به‌عنوان منبعی برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی انرژی است. نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی انرژی را می‌توان با مقدار مصرف انرژی واقعی ثبت شده مقایسه کرد. هرچه نتایج شبیه‌سازی به مقادیر ثبت شده نزدیک‌تر باشند، نتایج شبیه‌سازی معتبرتر خواهند بود. یکی از رکن‌های اصلی استدلال مبتنی‌بر مورد (CBR)[50] تشکیل پایگاه داده‌یی غنی از داده‌های ثبت شده‌ی قبلی است. بنابراین داده‌های ذخیره‌سازی‌شده در حس‌گر می‌تواند در تشکیل فرایندهای CBR کمک کننده باشد. سیستم CBR به‌طور معمول بر اساس: ۱. شناسایی وضعیت مشکل موجود، ۲. جست‌وجوی موارد قبلی مشابه با مشکل رخ داده، ۳. بازیابی مشابه‌ترین مورد به منظور حل مشکل موجود، ۴. ارزیابی کردن راه حل ارائه شده و ۵. به‌روز رسانی سیستم با یادگیری از تجربه‌ی حاصل شده عمل می‌کند. چارچوب پیشنهادی در یک ساختمان دوطبقه با کاربری مسکونی پیاده‌سازی و اعتبارسنجی شد. در این مطالعه‌ی موردی داده‌های حس‌گر با گام‌های زمانی که قابل تنظیم است با مدل BIM یکپارچه‌سازی شد. ضمن بصری‌سازی پارامترهای مختلف ساختمان نظیر دما و گازهای محیطی در رابط کاربری ایجاد شده در مدل و زبانه‌ی Property، این داده‌ها با استفاده از کد API پردازش شدند تا در صورتی که مقدار داده‌ی ثبت‌شده در محدوده‌ی مجاز قرار نداشته باشد، ضمن اعلام هشدار، محل و نوع مشکل در مدل بصری‌سازی می‌شود. در واقع پایش داده‌های غیرعادی و غیرمجاز منجر به ارتقای سطح عملکرد ساختمان می‌شود.

تقدیر و تشکر

از حمایت‌های مرکز تحقیق و توسعه‌ی تکنوسا در دانشگاه تهران، در مراحل مختلف این پژوهش قدردانی و تشکر می‌شود.

پانوشت‌ها

1. national institute of building sciences (NBS)
2. national institute of standards and technology (NIST)
3. building information modeling (BIM)
4. integration
5. coordinated
6. consistent
7. accessible
8. data base
9. rendering
10. clash detection
11. context
12. construction sequencing
13. phasing
14. international facility management association (IFMA)
15. computerized maintenance management system (CMMS)
16. computer-aided facility management (IWMS)
17. building management system (BMS)
18. integrated workplace management system (IWMS)
19. internet of thing (IOT)
20. tag
۲۱. سامانه بازشناسی با امواج رادیویی (به اختصار RFID) سامانه شناسایی بی سیمی است که قادر به تبادل داده به وسیله برقراری ارتباط بین یک برچسب که به یک کالا، تجهیز، شی و ... متصل شده است و یک باز خوان (Reader) است.
22. quick response (QR)
23. building management system (BMS)
24. direct links
25. application performance interfaces
26. write
27. proprietary file exchange
28. data model exchange public product
29. industry foundation classes (IFC)
۳۰. یک فرمت استاندارد به منظور تبادل و مدیریت اطلاعات در فاز بهره‌برداری است.
31. computer aided facility management (CAFM)
32. delay
33. web-base
34. augmented reality
35. federal energy management program
36. energy benchmarking
37. application programming interface (API)
38. feedback
39. user-interface
40. Carbon Monoxide (CO)
41. primary key
42. plugin

43. property
44. zone
45. switch

۴۶. مثال رندرگیری

47. league tables
48. benchmarks
49. performance lines
50. case-based reasoning (CBR)

منابع (References)

1. S. Taneja, A. Akcamete, B. Akinci, J. and et al. "Analysis of three indoor localization technologies to support facility management field activities", *In Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Nottingham, UK (2010).
2. Azhar S., Khalfan, M. and Maqsood, T. "Building information modelling (BIM): Now and beyond, construction economics and building", **12**(4), pp. 15-28, (2012).
3. Seul-Ki L., Hyo-Kyung, A. and Jung-Ho, Y. "An extension of the technology acceptance model for BIM-based FM", In Consturction Research Congress (2012).
4. Pishdad-Bozorgi P., Gao, X., Eastman, C. and et al. "Planning and developing facility management-enabled building information model (FM-enabled BIM), *Automation in Construction*, **87**, pp. 22-38 (2018).
5. Hu Z.-Z., Tian, P.-L., Li, S.-W. and et al. "BIM-based integrated delivery technologies for intelligent MEP management in the operation and maintenance phase", *Advances in Engineering Software*, **115**, pp. 1-16 (2018).
6. Becerik-Gerber B., Jazizadeh, F., Li, N. and et al. "Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management", *Journal of construction engineering and management*, **138**(3), pp. 431-442 (2011).
7. Cho Y.K., Alaskar, S. and Bode, T.A. "BIM-integrated sustainable material and renewable energy simulation", in Construction Research Congress Innovation for Reshaping Construction Practice, pp. 288-297 (2010).
8. Motawa I. and Almarshad, A. "A knowledge-based BIM system for building maintenance", *Automation in Construction*, **29**, pp. 173-182 (2013).
9. Arayici Y. "Towards building information modelling for existing structures", *Structural Survey*, **26**(3), pp. 210-222 (2008).
10. Wetzel E.M. and Thabet, W.Y. "The use of a BIM-based framework to support safe facility management processes", *Automation in Construction*, **60**, pp. 12-24 (2015).
11. Parn, E.A., Edwards, D.J. and Sing, M.C.P. "The building information modelling trajectory in facilities management: A review", *Automation in Construction*, **75**, pp. 45-55 (2017).
12. McArthur J. "A building information management (BIM) framework and supporting case study for existing building operations, maintenance and sustainability", *Procedia Engineering*, **118**, pp. 1104-1111 (2015).
13. Taghaddos H., Mashayekhi, A. and Sherafat, B. "Automation of construction quantity take-off: Using building information modeling (BIM)", In Construction Research Congress, pp. 2218-2227 (2016).
14. Gu N. and London, K. "Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry", *Automation in Construction*, **19**(8), pp. 988-999 (2010).
15. Turk, Z. "Ten questions concerning building information modelling", *Building and Environment*, **107**, pp. 274-284 (2016).
16. Kim C., Son, H. and Kim, C. "Automated construction progress measurement using data 4D building information model and 3D", *Automation in Construction*, **31**, pp. 75-82 (2013).
17. Lee, S.-K., Kim, K.-R. and Yu, J.-H. "BIM and ontology-based approach for building cost estimation", *Automation in Construction*, **41**, pp. 96-105 (2014).
18. S. Azhar, W.A., Carlton, D.O. and Ahmad, I. "Building information modeling for sustainable rating analysis", *Automation in Construction*, **20**(2), pp. 217-224 (2011).
19. Basbagill J., Flager, F., Lepech, M. and et al. "Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts", *Building and Environment*, **60**, pp. 81-92 (2013).
20. Hsieh C.-C., Liu, C.-Y. Wu, P.-Y. and et al. "Building information modeling services reuse for facility management for semiconductor fabrication plants", *Automation in Construction*,**102**, pp. 270-287 (2019).
21. Lee D., Cha, G. and Park, S. "A study on data visualization of embedded sensors for building energy monitoring using BIM", *International journal of precision engineering and manufacturing*, **17**, pp. 807-814 (2016).
22. Chen, C. and Tang, L. "BIM-based integrated management workflow design for schedule and cost planning of building fabric maintenance", *Automation in Construction*, **107**, p. 102944 (2019).
23. Lee, H.J. and Aktan, M.H. "Study of building deterioration", *in Proceedings of the Speciality Conference on Infrastructure Condition Assessment: Art, Science, and Practice*, pp.1-10, ASCE(1997).
24. Legner C. and Thiesse, F. "RFID-based maintenance at Frankfurt", *IEEE Airport Pervasive Computing*, **5**(1), pp. 34-39 (2006).
25. GhaffarianHoseini A. and et al. "Application of nD BIM integrated knowledge-based building management system (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **72**, pp. 935-949 (2017).
26. Redmond A., Hore, A. and Alshawi, M. and et al. Exploring how information exchanges can be enhanced through cloud BIM", *Automation in Construction*, **24**, pp. 175-183 (2012).
27. Mazairac W. and Beetz, J. "Towards a framework for a domain specific open query language for building information models", *In Proceedings of the eg-ice Workshop*, Citeseer (2012).
28. Mazairac, W. and Beetz, J. "BIMQL-An open query language for building information models", *Advanced Engineering Informatics*, **27**(4), pp. 444-456 (2013).

29. Kelly G., Serginson, M. Lockley, S. and et al. "BIM for facility management: A review and a case study investigating the value and challenges", *In Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, pp. 30-31 (2013).

30. Gerrish T., Ruikar, K., Cook, M. and et al. "BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential", *Energy and Buildings*, **144**, pp. 218-228 (2017).

31. Lawrence T. M., Watson, R.T., Boudreau, M.-C. and et al. "A new paradigm for the design and management of building systems", *Energy and Buildings*, **51**, pp. 56-63 (2012).

32. Volkov A. A. and Batov, E.I. "Dynamic extension of building information model for "smart" buildings", *Procedia Engineering*, **111**, pp. 849-852 (2015).

33. Kensek K. "Integration of environmental sensors with BIM: Case studies using arduino, dynamo, and the revit API", (2014).

34. Lam K.P. and Srivastava, V. "Living in the intelligent workplace structuring and managing building operation information", (2005).

35. Liu, X. and Akinci, B. "Requirements and evaluation of standards for integration of sensor data with building information models", *International Workshop on Computing in Civil Engineering*, (2009).

36. Guinard, A., McGibney, A. and Pesch, D. "A wireless sensor network design tool to support building energy management", *In Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, ACM*, pp. 25-30 (2009).

37. Suprabhas, K. Dib, H.N. "Integration of BIM and utility sensor data for facilities management", *ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering* (2017).

38. Wills, N. and Diaz, J. "Integration of real-time data In BIM enables FM processes", *WIT Transactions on The Built Environment*, **169**, pp. 127-133 (2017).

39. Nakama, Y. Onishi, Y. and Iki, K. "Development of building information management system using BIM toward strategic building operation and maintenance", *In Proceedings of the 20th Conference on Computer-Aided Design Research in Asia (CAADRIA 2015)*, pp. 397-406 (2015).

40. Chang, K.-M., Dzeng, R.-J. and Wu, Y.-J. "An automated IoT visualization BIM platform for decision support in facilities management", *Applied Sciences*, **8**(7), p. 1086 (2018).

41. Williams G., Gheisari, M. Chen, p.J. and et al. "BIM2MAR: An efficient BIM translation to mobile augmented reality applications", *Journal of Management in Engineering*, **31**(1), p. A4014009 (2014).

42. Kang T.-W. Choi, H.-S. "BIM perspective definition metadata for interworking facility management data", *Advanced Engineering Informatics*, **29**(4), pp. 958-970 (2015).

43. Petrushevski F., "Personalized lighting control based on a space model", *In Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing: ACM*, pp. 568-571 (2012).

44. Nical, A.K. and Wodynski, W. "Enhancing facility management through BIM 6D", *Procedia Engineering*, **164**, pp. 299-306 (2016).

45. Gupta, A. and Yilmaz, A. "Ubiquitous real-time geospatial localization", *In Proceedings of the Eighth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness*, ACM, pp. 1-10 (2016).

46. Chew, M., Tan, S. and Kang, K. "A technical evaluation index for curtain wall and cladding facades", *Structural Survey*, **22**(4), pp. 210-227 (2004).

47. Dunston, P.S. and Williamson, C.E. "Incorporating maintainability in constructability review process", *Journal of Management in Engineering*, **15**(5), pp. 56-60 (1999).

48. Ergen, E., Akinci, B. and Sacks, R. "Life-cycle data management of engineered-to-order components using radio frequency identification", *Advanced Engineering Informatics*, **21**(4), pp. 356-366 (2007).

49. Chen, A.Y. and Chu, J.C. "TDVRP and BIM integrated approach for in-building emergency rescue routing", *Journal of Computing in Civil Engineering*, **30** (5), p. C4015003 (2016).

50. Jiang Y. and et al. "BIM server requirements to support the energy efficient building lifecycle", *International Conference on Computing in Civil Engineering* (2012).

51. Tang, S., Shelden, D.R. Eastman, C.M. and et al. "A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends", *Automation in Construction*, **101**, pp. 127-139 (2019).

52. Gokce, H.U. and Gokce. K.U. "Holistic system architecture for energy efficient building operation", *Sustainable Cities and Society*, **6**, pp. 77-84 (2013).

53. Ufuk Gokce, H. and Umut Gokce, K. "Integrated system platform for energy efficient building operations", *Journal of Computing in Civil Engineering*, **28**(6), p. 05014005 (2014).