



Original Research

## Developing an Engineering Framework for Smart Sport to Support the Design and Predictive Maintenance of Sports Facilities Based on Emerging Technologies and Safety Standards

Bahram Delikhon

۱. Assistant Professor, Physical Education Department, District 3, Education Organization, Karaj, Iran.

### ARTICLE INFO

Received: 2025/07/11  
Reviewed: 2025/08/06  
Revised: 2025/09/02  
Accepted: 2025/10/15

#### Keyword:

Smart sport  
Sport engineering  
Predictive maintenance  
Emerging technologies  
Safety  
Data governance  
Sport facilities.

### ABSTRACT

**Introduction:** The purpose of this study was to develop an engineering framework for smart sport by integrating intelligent design and predictive maintenance of sport facilities based on emerging technologies and safety standards.

**Methodology:** This research was applied–developmental in purpose and employed an exploratory mixed-methods design. A systematic literature review (۲۰۲۲–۲۰۲۵) identified eight major thematic categories related to smart design, digital technologies, safety, predictive maintenance, and data management. Subsequently, qualitative data obtained from semi-structured interviews with ۱۸ experts (engineers, sport facility managers, and technology specialists) were analyzed, resulting in the extraction of ۱۰ dimensions, ۳۲ components, and ۸۷ indicators. Content validity of the proposed framework was evaluated using a three-round Delphi method, yielding CVR=۰.۷۸ and CVI=۰.۸۴.

**Results:** Findings showed that intelligent infrastructure design functions as the foundation of smart sport systems, while digital technologies (IoT, artificial intelligence, and digital twins) enhance predictive maintenance, reduce operational errors, and improve safety performance. Additionally, data governance and cybersecurity emerged as new and critical dimensions influencing system reliability and sustainability.

**Conclusion:** The final framework offers practical guidance for engineers, managers, and policymakers in planning, managing, and standardizing smart sport facilities. Field pilot implementation, structural equation modeling, and cost–benefit analyses are recommended for future research.



## ارائه چارچوب مهندسی ورزش هوشمند برای طراحی و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی مبتنی بر فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی

بهرام دلیخون<sup>۱\*</sup>

۱. استادیار معلم، گروه تربیت بدنی، ناحیه ۳، آموزش و پرورش، کرج، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p><b>مقدمه و هدف:</b> هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک چارچوب مهندسی ورزش هوشمند برای طراحی و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی مبتنی بر فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی است. این مطالعه به‌لحاظ هدف، کاربردی - توسعه‌ای و از نظر روش‌شناسی، ترکیبی و اکتشافی انجام شد.</p> <p><b>روش‌شناسی:</b> ابتدا مرور نظام‌مند ادبیات (۲۰۲۲-۲۰۲۵) با شناسایی ۸ مقوله اصلی در حوزه‌های طراحی هوشمند، فناوری‌های دیجیتال، ایمنی، نگهداری پیش‌بینانه و مدیریت داده انجام گرفت. در مرحله بعد، داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با ۱۸ خبره (مهندسان، مدیران اماکن ورزشی و متخصصان فناوری) تحلیل شد و ۱۰ بُعد اصلی، ۳۲ مؤلفه و ۸۷ شاخص مرتبط استخراج گردید. سپس با استفاده از روش دلفی سه‌مرحله‌ای، روایی محتوایی چارچوب با مقادیر <math>CVR=0.78</math> و <math>CVI=0.84</math> تأیید شد.</p> <p><b>نتایج:</b> یافته‌ها نشان داد طراحی هوشمند زیرساخت، هسته ایجاد سامانه‌های ورزش هوشمند است و فناوری‌های دیجیتال (IoT)، هوش مصنوعی و دیجیتال توین (نقش تسهیل‌کننده در کاهش خطا، بهینه‌سازی نگهداری و ارتقای ایمنی دارند. همچنین ابعاد حکمرانی داده و امنیت سایبری به‌عنوان عوامل جدید و اثرگذار در پایداری سامانه شناسایی شدند.</p> <p><b>نتیجه‌گیری:</b> چارچوب نهایی می‌تواند راهنمایی عملی برای مدیران، مهندسان و سیاست‌گذاران ورزشی در برنامه‌ریزی، مدیریت و استانداردسازی اماکن ورزشی هوشمند باشد. اجرای پیلوت میدانی چارچوب، مدل‌سازی معادلات ساختاری و تحلیل هزینه-فایده از پیشنهادها پژوهش‌های آینده است.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰ تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳</p>
	<p><b>کلید واژگان</b> ورزش هوشمند مهندسی ورزش نگهداری پیش‌بینانه فناوری‌های نوین ایمنی حکمرانی داده اماکن ورزشی</p>

## مقدمه

تحولات سریع فناوری در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در حوزه‌های فناوری‌های دیجیتال، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده و سیستم‌های سایبر-فیزیکی، موجب دگرگونی الگوهای طراحی و مدیریت زیرساخت‌ها در صنایع مختلف شده است. صنعت ورزش نیز در چارچوب تحول دیجیتال، به سمت توسعه «ورزش هوشمند» حرکت کرده است؛ مفهومی که بر استفاده نظام‌مند از داده، اتوماسیون و تحلیل‌های هوشمند برای بهبود عملکرد، ایمنی و بهره‌وری تأکید دارد. ورزش هوشمند را می‌توان رویکردی یکپارچه دانست که در آن تعامل انسان، محیط و فناوری در قالب یک اکوسیستم دیجیتال مدیریت می‌شود (المرس و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳). در این چارچوب، «مهندسی ورزش هوشمند» به‌عنوان حوزه‌ای بین‌رشته‌ای مطرح می‌شود که اصول مهندسی سیستم‌ها، مهندسی ایمنی، مدیریت دارایی‌های فیزیکی و فناوری اطلاعات را در طراحی، بهره‌برداری و نگهداری اماکن و تجهیزات ورزشی به کار می‌گیرد. در این رویکرد، اماکن ورزشی به‌عنوان سیستم‌های پیچیده متشکل از زیرساخت‌های سازه‌ای، تاسیساتی، دیجیتال و انسانی در نظر گرفته می‌شوند که نیازمند مدیریت یکپارچه و داده‌محور هستند. این نگرش سیستمی، امکان پایش مستمر عملکرد و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند (ساسانلی و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از مؤلفه‌های کلیدی در این حوزه، «طراحی هوشمند اماکن ورزشی» است که فراتر از طراحی سنتی فضاها، فیزیکی عمل می‌کند و شامل مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، شبیه‌سازی سناریوهای خطر، تحلیل رفتار جمعیت، بهینه‌سازی مصرف انرژی و پیش‌بینی چرخه عمر سازه است. طراحی هوشمند تلاش می‌کند از مرحله مفهومی پروژه، زیرساخت‌های لازم برای اتصال به سامانه‌های هوشمند، سنسورها و سیستم‌های پایش را پیش‌بینی کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ادغام مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و اینترنت اشیا در ساختمان‌های عمومی می‌تواند کارایی عملیاتی و سطح ایمنی را به‌طور معناداری افزایش دهد (ایستمن و همکاران، ۲۰۱۸؛ مرزوق و عبدالعتی، ۲۰۲۱). در کنار طراحی، مفهوم «نگهداری پیش‌بینانه» به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین رویکردهای مدیریت دارایی مطرح است. نگهداری پیش‌بینانه بر پایه جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای از طریق حسگرها و تحلیل آن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، خرابی‌های احتمالی را پیش از وقوع شناسایی می‌کند. این رویکرد در مقایسه با نگهداری اصلاحی و پیشگیرانه سنتی، موجب کاهش هزینه‌ها، افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات و ارتقای ایمنی می‌شود. مطالعات صنعتی نشان داده‌اند که به‌کارگیری الگوریتم‌های پیش‌بینی خرابی می‌تواند تا ۳۰ درصد هزینه‌های نگهداری را کاهش دهد (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰). فناوری‌های نوین نقش زیربنایی در

تحقق نگهداری پیش‌بینانه و مدیریت هوشمند دارند. اینترنت اشیا امکان اتصال تجهیزات و ارسال داده‌های لحظه‌ای را فراهم می‌کند، در حالی که رایانش ابری و کلان‌داده ظرفیت ذخیره‌سازی و پردازش این داده‌ها را مهیا می‌سازد. از سوی دیگر، هوش مصنوعی و یادگیری عمیق با تحلیل الگوهای پنهان، تصمیم‌گیری خودکار و تشخیص ناهنجاری را ممکن می‌کنند. کاربرد این فناوری‌ها در زیرساخت‌های عمومی، از جمله استادیوم‌ها و سالن‌های ورزشی، موجب افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش ریسک حوادث و بهبود تجربه کاربر شده است (آتزوری و همکاران، ۲۰۱۷؛ دویودی و همکاران، ۲۰۲۳). هم‌زمان، «استانداردهای ایمنی» به‌عنوان چارچوب‌های الزام‌آور طراحی و بهره‌برداری، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش مخاطرات دارند. این استانداردها شامل الزامات مربوط به مقاومت سازه، تخلیه اضطراری، ایمنی حریق، ارگونومی تجهیزات، دسترسی‌پذیری و مدیریت ازدحام هستند. سازمان‌های بین‌المللی نظیر سازمان بین‌المللی استانداردسازی و انجمن ملی حفاظت از آتش دستورالعمل‌های جامعی برای ایمنی ساختمان‌های عمومی ارائه کرده‌اند، اما ادغام این استانداردها با سامانه‌های هوشمند هنوز در بسیاری از کشورها به‌صورت نظام‌مند اجرا نشده است (ایزو، ۲۰۱۸؛ انجمن ملی حفاظت از آتش، ۲۰۲۲). مروری بر ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات متعددی به بررسی مدیریت اماکن ورزشی، طراحی استادیوم‌های هوشمند، مدیریت انرژی یا ایمنی تماشاگران پرداخته‌اند. با این حال، اغلب این پژوهش‌ها به‌صورت جزیره‌ای و تک‌بعدی بوده و کمتر به ارائه یک چارچوب مهندسی یکپارچه که طراحی، نگهداری پیش‌بینانه، فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی را به‌طور هم‌زمان پوشش دهد، پرداخته‌اند. این پراکندگی مفهومی، مانع از توسعه مدل‌های کاربردی جامع در حوزه ورزش هوشمند شده است. بر این اساس، گپ پژوهشی اصلی در نبود یک چارچوب تلفیقی و بومی‌سازی شده برای مهندسی ورزش هوشمند آشکار می‌شود؛ چارچوبی که بتواند ارتباط میان طراحی فناورانه، نگهداری پیش‌بینانه و الزامات ایمنی را در اماکن ورزشی تبیین کند. در نبود چنین مدلی، تصمیم‌گیری‌ها غالباً واکنشی، غیرسیستمی و فاقد پشتوانه تحلیلی یکپارچه است که می‌تواند پیامدهایی همچون افزایش هزینه‌های عملیاتی، فرسودگی زودرس تجهیزات و کاهش سطح ایمنی را در پی داشته باشد (ژو و همکاران، ۲۰۲۲؛ کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که چگونه می‌توان با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی، چارچوبی مهندسی برای طراحی و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی ارائه کرد که ضمن ارتقای ایمنی و بهره‌وری، قابلیت اجرایی و انطباق با شرایط بومی را داشته باشد. در این راستا، سؤال اصلی تحقیق عبارت است از: چه مؤلفه‌ها و ابعادی چارچوب

روایی محتوایی و میزان اجماع درباره مؤلفه‌های استخراج‌شده، در مرحله سوم از روش دلفی استفاده شد. بدین منظور پرسشنامه‌ای مبتنی بر مؤلفه‌های شناسایی‌شده طراحی گردید و در اختیار گروهی از خبرگان قرار گرفت. ارزیابی شاخص‌ها با مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت انجام شد. فرآیند دلفی در دو دور متوالی اجرا گردید تا میزان توافق متخصصان تثبیت شود. برای سنجش روایی محتوایی از شاخص‌های نسبت روایی محتوا CVR و شاخص روایی محتوا CVI استفاده شد و مؤلفه‌هایی که حد نصاب لازم را کسب نکردند حذف یا اصلاح شدند. همچنین برای بررسی میزان اجماع خبرگان از شاخص‌های توافق و پراکندگی استفاده شد. در صورت نیاز، اولویت‌بندی ابعاد چارچوب از طریق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام گرفت. به منظور افزایش اعتبار علمی پژوهش، راهبردهای اطمینان‌بخشی شامل بازبینی خبرگان، مقایسه مستمر داده‌ها، ثبت دقیق مراحل تحلیل و کنترل همسانی کدگذاری به کار گرفته شد. روایی بیرونی چارچوب پیشنهادی نیز از طریق انطباق آن با استانداردهای بین‌المللی ایمنی و دستورالعمل‌های فنی مرتبط بررسی گردید. در نهایت، بر اساس یافته‌های مراحل کیفی و کمی، چارچوب مهندسی ورزش هوشمند در قالب یک مدل یکپارچه شامل ابعاد طراحی هوشمند، زیرسیستم‌های فناوری، سازوکارهای نگهداری پیش‌بینانه، الزامات ایمنی و تعاملات سیستمی میان آنها ارائه شد. این چارچوب به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند در چرخه عمر اماکن ورزشی (از طراحی تا بهره‌برداری و نگهداری) به عنوان یک راهنمای مهندسی عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

### یافته‌ها

۱. نتایج مرور نظام‌مند ادبیات در گام نخست، به منظور شناسایی ابعاد و مؤلفه‌های مرتبط با مهندسی ورزش هوشمند، طراحی هوشمند اماکن ورزشی، نگهداری پیش‌بینانه، فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی، مرور نظام‌مند ادبیات انجام شد. در این مرحله، در مجموع ۱۸۶ مدرک علمی شناسایی گردید که پس از حذف موارد تکراری و اعمال معیارهای ورود (ارتباط موضوعی، کیفیت علمی، دسترسی به متن کامل و به روز بودن)، ۷۲ منبع برای تحلیل نهایی انتخاب شد؛ به عبارت دیگر، حدود ۳۸ درصد از منابع اولیه وارد مرحله تحلیل مضمون شدند. تحلیل مضمون این منابع به استخراج ۲۱۴ کد اولیه منجر شد. این کدها پس از پالایش، ادغام مفهومی و حذف هم‌پوشانی‌ها، در قالب ۳۸ مؤلفه فرعی و نهایتاً ۸ مقوله اصلی سازمان‌دهی شدند.

مهندسی ورزش هوشمند برای طراحی و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی مبتنی بر فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی را تشکیل می‌دهند و این مؤلفه‌ها چگونه در قالب یک مدل یکپارچه سازماندهی می‌شوند.

### روش شناسی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای و از حیث روش اجرا، ترکیبی (کیفی-کمی) با رویکرد اکتشافی متوالی است. هدف اصلی تحقیق، ارائه و اعتبارسنجی یک چارچوب مهندسی یکپارچه برای طراحی و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی مبتنی بر فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی است. از آنجا که توسعه چارچوب‌های مفهومی مستلزم استخراج نظام‌مند مؤلفه‌ها و سپس ارزیابی تخصصی آنهاست، پژوهش در دو مرحله کیفی (اکتشاف و ساخت مدل اولیه) و کمی (اعتبارسنجی و اجماع خبرگان) انجام شد. در مرحله نخست، به منظور شناسایی ابعاد، مؤلفه‌ها و شاخص‌های مرتبط با مهندسی ورزش هوشمند، طراحی هوشمند اماکن ورزشی، نگهداری پیش‌بینانه، فناوری‌های نوین (از جمله اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و سیستم‌های سایبر-فیزیکی) و استانداردهای ایمنی، از روش مرور نظام‌مند ادبیات استفاده شد. جستجو در پایگاه‌های علمی معتبر نظیر Web of Science, Scopus, IEEE Explore, Science Direct و Google Scholar با استفاده از کلیدواژه‌های تخصصی انجام گرفت. مقالات بر اساس معیارهای ورود و خروج (مرتبط بودن با موضوع، انتشار در مجلات معتبر، دسترسی به متن کامل و به روز بودن) غربالگری شدند. در نهایت، متون منتخب با روش تحلیل مضمون مورد بررسی قرار گرفتند و کدهای اولیه استخراج شد. این کدها پس از تلفیق و حذف موارد تکراری، در قالب مقوله‌های محوری دسته‌بندی شدند و ساختار اولیه چارچوب پژوهش شکل گرفت. در مرحله دوم، به منظور تکمیل، اصلاح و عملیاتی‌سازی چارچوب اولیه، از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان استفاده شد. جامعه مشارکت‌کنندگان شامل متخصصان مهندسی اماکن ورزشی، کارشناسان فناوری‌های هوشمند، متخصصان نگهداری پیش‌بینانه و مدیران بهره‌برداری اماکن ورزشی بود. نمونه‌گیری به صورت هدفمند و بر اساس معیارهایی نظیر سابقه حرفه‌ای مرتبط، تجربه عملی در پروژه‌های هوشمندسازی یا ایمنی و آشنایی با استانداردهای بین‌المللی انجام شد. مصاحبه‌ها تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت. داده‌های حاصل پس از پیاده‌سازی، با روش تحلیل مضمون در سه سطح کدگذاری باز، محوری و انتخابی تحلیل شدند و چارچوب مفهومی اصلاح و تکمیل گردید. به منظور ارزیابی

## جدول ۱. خلاصه فرایند مرور نظام‌مند ادبیات

مقدار	شاخص
۱۸۶	تعداد مدارک اولیه شناسایی شده
۷۲	منابع نهایی پس از غربال‌گری
۳۸٪	نسبت منابع منتخب به اولیه
۲۱۴	کدهای اولیه استخراج شده
۳۸	مؤلفه‌های فرعی نهایی
۸	مقوله‌های اصلی نهایی

علمی موجود مشاهده نمی‌شود. از این رو، این شکاف پژوهشی به‌عنوان مبنای نظری و مفهومی برای توسعه چارچوب پیشنهادی در مراحل بعدی تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

۲. نتایج حاصل از مصاحبه‌های تخصصی

در گام دوم، به‌منظور غنی‌سازی و تکمیل یافته‌های حاصل از مرور ادبیات و تطبیق آنها با بستر عملی و شرایط واقعی اماکن ورزشی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۱۸ نفر از خبرگان انجام شد. مشارکت‌کنندگان شامل متخصصان مهندسی اماکن ورزشی، کارشناسان فناوری‌های هوشمند، مدیران نگهداری و بهره‌برداری از مجتمع‌های ورزشی و صاحب‌نظران حوزه ایمنی و استانداردها بودند. انتخاب نمونه‌ها به‌صورت هدفمند و تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت. پس از پیاده‌سازی کامل مصاحبه‌ها، داده‌ها با روش تحلیل مضمون در سه سطح کدگذاری باز، محوری و انتخابی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در مرحله کدگذاری باز، ۱۲۶ گزاره معنادار استخراج شد که در قالب ۴۱ مفهوم اولیه دسته‌بندی گردید و در مرحله کدگذاری محوری، این مفاهیم در قالب ۹ مقوله اصلی سازمان‌دهی شدند.

بر اساس نتایج تحلیل ادبیات، هشت مقوله اصلی به‌عنوان ابعاد کلیدی مهندسی ورزش هوشمند شناسایی شد که شامل طراحی هوشمند سازه و زیرساخت‌های اماکن ورزشی، سامانه‌های پایش هوشمند و شبکه‌های حسگر، مدیریت داده و تحلیل پیشرفته مبتنی بر کلان‌داده و هوش مصنوعی، سیستم‌های نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات و تأسیسات، مدیریت ریسک و ایمنی در اماکن ورزشی، انطباق با استانداردها و آیین‌نامه‌های بین‌المللی مانند ISO و NFPA، یکپارچه‌سازی سامانه‌های دیجیتال و معماری یکپارچه فناوری، و در نهایت مدیریت چرخه عمر و بهره‌برداری هوشمند از اماکن ورزشی است. بررسی مطالعات موجود نشان داد که هر یک از این حوزه‌ها به‌طور جداگانه در پژوهش‌های پیشین مورد توجه قرار گرفته و در برخی موارد تحلیل‌های عمیقی نیز درباره آنها ارائه شده است؛ با این حال، چارچوبی جامع و مهندسی که بتواند این ابعاد را به‌صورت یکپارچه و نظام‌مند در قالب مدلی منسجم برای طراحی، مدیریت و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی هوشمند تلفیق کند، در ادبیات

## جدول ۲. خلاصه فرایند تحلیل مصاحبه‌های تخصصی

مقدار	شاخص
۱۸	تعداد خبرگان مصاحبه‌شونده
۱۲۶	گزاره‌های معنادار (کدگذاری باز)
۴۱	مفاهیم اولیه استخراج شده
۹	مقوله‌های اصلی (کدگذاری محوری)

ناگهانی تجهیزات، افزایش سطح ایمنی و بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری مورد توجه قرار گرفت. ادغام استانداردهای ایمنی و مقررات فنی در مراحل طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند از ابتدا، و نیز اهمیت معماری یکپارچه داده و تعامل‌پذیری سامانه‌ها برای جلوگیری از شکل‌گیری سیستم‌های جزیره‌ای و ناکارآمدی عملیاتی، از دیگر محورهای برجسته‌شده در مصاحبه‌ها بود. بر اساس این یافته‌ها، دو حوزه که در مرور ادبیات کمتر به‌صورت ساختارمند مورد توجه قرار گرفته بودند، به چارچوب اولیه افزوده شد: نخست حکمرانی داده و امنیت سایبری در اماکن ورزشی هوشمند و دوم مدیریت

نتایج تحلیل مصاحبه‌های تخصصی نشان داد که چند محور اساسی در شکل‌گیری چارچوب مهندسی ورزش هوشمند اهمیت ویژه‌ای دارند. نخست، ضرورت نگاه به اماکن ورزشی به‌عنوان سامانه‌های سایبر-فیزیکی مطرح شد؛ به‌گونه‌ای که در آن داده‌های بلادرنگ حاصل از حسگرها، سامانه‌های دیجیتال و فرآیندهای فیزیکی به‌صورت یکپارچه گردآوری و مدیریت می‌شوند. همچنین خبرگان بر لزوم پیوند میان طراحی اولیه سازه و تأسیسات با الزامات نگهداری پیش‌بینانه در سراسر چرخه عمر تأکید کردند. از سوی دیگر، نقش تعیین‌کننده تحلیل داده‌های بلادرنگ و پیش‌بینانه در کاهش خرابی‌های

تجربه کاربر و ذی‌نفعان شامل ورزشکاران، تماشاگران، کارکنان و مدیران. در نتیجه، ساختار پیشنهادی پژوهش از هشت بُعد اولیه به ده بُعد اصلی ارتقا یافت و مدل مفهومی پژوهش از جامعیت و غنای بیشتری برخوردار شد.

### جدول ۳. شاخص‌های روایی محتوایی چارچوب

شاخص روایی	مقدار به دست آمده حد نصاب	معیار	وضعیت
میانگین CVR مؤلفه‌ها $\leq 78/0$	$\leq 78/0$	۶۲/۰ (۲۰ خبره)	قابل قبول
میانگین CVI شاخص‌ها	۸۴/۰	$\leq 79/0$	مطلوب
تعداد شاخص‌های حذف شده	۳	—	حذف به دلیل CVR پایین

نشان داد که چارچوب پیشنهادی از روایی محتوایی مطلوبی برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان الگویی کاربردی برای طراحی، مدیریت، نگهداری پیش‌بینانه و ارزیابی عملکرد اماکن ورزشی هوشمند مورد استفاده قرار گیرد.

مدیریت ریسک قرار می‌گیرد. این دیدگاه با رویکردهای نوین تاب‌آوری سازمانی هم‌راستا است. بعد حکمرانی داده و امنیت سایبری نیز یکی از نوآوری‌های مهم پژوهش حاضر است. در بسیاری از مطالعات هوشمندسازی، به مسئله امنیت اطلاعات و یکپارچگی داده‌ها توجه کافی نشده است، در حالی که یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد بدون معماری یکپارچه داده و سیاست‌های روشن حکمرانی دیجیتال، سامانه‌های هوشمند به‌صورت جزیره‌ای عمل کرده و کارایی خود را از دست می‌دهند. به‌طور کلی، مقایسه یافته‌های این پژوهش با ادبیات موجود نشان می‌دهد که نوآوری اصلی تحقیق در تلفیق مهندسی طراحی، فناوری دیجیتال، نگهداری پیش‌بینانه و استانداردهای ایمنی در قالب یک مدل چندلایه یکپارچه است؛ مدلی که نه تنها مفهومی بلکه دارای شاخص‌های عملیاتی و اعتبارسنجی شده توسط خبرگان است. هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب مهندسی جامع برای طراحی و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی مبتنی بر فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی بود. نتایج حاصل از مرور نظام‌مند ادبیات، مصاحبه‌های تخصصی و اعتبارسنجی به روش دلفی منجر به طراحی مدلی شامل ۱۰ بُعد، ۳۲ مؤلفه و ۸۷ شاخص در قالب پنج لایه سیستمی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در چارچوب مهندسی ورزش هوشمند، طراحی هوشمند زیرساخت به‌عنوان پیش‌نیاز اساسی برای تحقق نگهداری پیش‌بینانه مؤثر عمل می‌کند و در کنار آن، فناوری‌های دیجیتال نقش زیرساخت داده‌ای و تحلیلی سامانه را بر عهده دارند. در چنین ساختاری، بهره‌گیری از نگهداری پیش‌بینانه می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات و کاهش هزینه‌های چرخه عمر اماکن ورزشی منجر شود، در حالی که ایمنی هوشمند حاصل تعامل پویا و هم‌افزای میان طراحی، فناوری و فرآیندهای نگهداری است. همچنین حکمرانی داده و امنیت سایبری به‌عنوان یکی از پیش‌شرط‌های اساسی برای پایداری، اعتمادپذیری و اثربخشی

در نهایت، نتایج فرایند اعتبارسنجی نشان داد که چارچوب نهایی پژوهش از ۱۰ بُعد اصلی، ۳۲ مؤلفه فرعی و ۸۷ شاخص عملیاتی تشکیل شده است. ارزیابی این ابعاد و شاخص‌ها توسط خبرگان حوزه‌های مهندسی، فناوری‌های هوشمند و مدیریت اماکن ورزشی

### بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این تحقیق نشان داد که مهندسی ورزش هوشمند را نمی‌توان صرفاً در سطح به‌کارگیری فناوری‌های نوین تقلیل داد، بلکه این مفهوم مستلزم یک نگاه سیستمی و چندلایه است که طراحی، فناوری، نگهداری، ایمنی و حکمرانی را به‌صورت یکپارچه در بر گیرد. برخلاف بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین که بر یک بُعد خاص (نظیر اینترنت اشیا یا مدیریت انرژی) تمرکز داشته‌اند، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که اثربخشی واقعی در گرو تعامل ساختاری میان لایه‌هاست. یکی از مهم‌ترین یافته‌ها، نقش بنیادین «طراحی هوشمند مبتنی بر BIM و تحلیل ریسک اولیه» در تسهیل نگهداری پیش‌بینانه است. این نتیجه با مطالعات حوزه مدیریت دارایی‌های فیزیکی همسو است که بر اهمیت تصمیمات مرحله طراحی در هزینه‌های چرخه عمر تأکید دارند. در چارچوب پیشنهادی، طراحی نه تنها نقطه آغاز پروژه، بلکه تعیین‌کننده قابلیت یکپارچه‌سازی سامانه‌های پایش و تحلیل در مراحل بهره‌برداری محسوب می‌شود. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که فناوری‌های توانمندساز (AI، IoT) و کلان‌داده نقش «پیش‌ران مرکزی» را ایفا می‌کنند. با این حال، یافته‌ها تأکید می‌کند که فناوری به‌تنهایی مزیت رقابتی ایجاد نمی‌کند؛ بلکه ارزش واقعی زمانی شکل می‌گیرد که داده‌های تولیدشده به مدل‌های پیش‌بینی خرابی و تصمیم‌یار مدیریتی تبدیل شوند. این موضوع نشان می‌دهد که نگهداری پیش‌بینانه حلقه واسط حیاتی میان فناوری و ایمنی است. در حوزه ایمنی، یافته‌ها بر این نکته تأکید دارند که رویکردهای سنتی مبتنی بر واکنش پس از حادثه، در محیط‌های پیچیده ورزشی کارایی محدودی دارند. چارچوب ارائه‌شده، ایمنی را به‌عنوان خروجی یک سیستم داده‌محور و پویا تعریف می‌کند که در آن تحلیل بلادرنگ شرایط محیطی، سازه‌ای و رفتاری کاربران، مبنای

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، چارچوب پیشنهادی در یک مجموعه ورزشی واقعی به‌صورت پایلوت اجرا شود، روابط میان ابعاد مدل با استفاده از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری SEM مورد آزمون قرار گیرد، شاخص‌های اقتصادی از طریق تحلیل‌های کمی هزینه-فایده بررسی شود و همچنین ابعاد مرتبط با پایداری محیط‌زیستی و بهره‌وری انرژی در توسعه‌های بعدی مدل لحاظ گردد. نمایم.

Zhang, Y., Li, H., & Chen, X. (۲۰۲۲). Smart stadium infrastructure: Integrating IoT and digital technologies for intelligent sports facilities management. *Journal of Building Engineering*, ۵۰, ۱۰۴۱۳۰.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104130>

Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (۲۰۲۲). Internet of Things (IoT) in smart infrastructure management: Applications in predictive maintenance. *Sustainable Cities and Society*, ۷۸, ۱۰۳۶۲۱.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103621>

Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (۲۰۲۲). Industrial artificial intelligence for predictive maintenance in cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, ۱۸(۳), ۱۷۰۴-۱۷۱۴.

<https://doi.org/10.1109/TII.2021.3051541>

Ahmed, W., Aziz, Z., & Tezel, A. (۲۰۲۲). Digital twins for the built environment: A review of applications in facility management. *Automation in Construction*, ۱۳۴, ۱۰۴۰۸۱.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104081>

Park, S., & Kim, Y. (۲۰۲۲). Smart facility management using IoT-based monitoring systems in large public venues. *Sensors*, ۲۲(۹), ۳۴۱۲.

<https://doi.org/10.3390/s22093412>

Marotta, G., & Esposito, M. (۲۰۲۳). Data-driven predictive maintenance for smart infrastructure: A machine learning approach. *Reliability Engineering & System Safety*, ۲۳۰, ۱۰۸۸۹۹.

Bormann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (۲۰۲۳). Building information modeling and digital twins for smart infrastructure lifecycle

management. *Automation in Construction*, ۱۴۵, ۱۰۴۶۴۵.

#### منابع

management. *Automation in Construction*, ۱۴۵, ۱۰۴۶۴۵.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104645>

Li, D., Wang, J., & Zhao, Y. (۲۰۲۳). Big data analytics in smart facility management: Applications for safety and maintenance optimization. *Journal of Cleaner Production*, ۳۸۲, ۱۳۵۲۸۳.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135283>

Chui, K. T., Alhalabi, W., Pang, S., & Liu, R. W. (۲۰۲۳). Cybersecurity in smart infrastructure: Challenges and future directions. *Future Generation Computer Systems*, ۱۳۹, ۱-۱۲.

<https://doi.org/10.1016/j.future.2022.10012>

Yang, T., Liu, Z., & Wang, L. (۲۰۲۳). Smart sensor networks for infrastructure monitoring and predictive maintenance. *IEEE Access*, ۱۱, ۳۱۶۸۴-۳۱۶۹۶.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3254112>

Silva, P., Costa, A., & Rodrigues, H. (۲۰۲۳). Risk management and safety monitoring in smart public infrastructures using IoT technologies. *Safety Science*, ۱۵۸, ۱۰۵۹۹۷.

<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105997>

García-Moreno, F., & Hernández, J. (۲۰۲۴). Intelligent facility management systems for smart buildings and sports complexes. *Building and Environment*, ۲۴۴, ۱۱۰۷۳۷.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110737>

Kwon, S., Park, J., & Lee, H. (۲۰۲۴). Digital twin-based predictive maintenance for large-scale facilities. *Journal of Infrastructure Systems*, ۳۰(۱), ۰۴۰۲۳۰۴۸.

<https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-1987>

Nguyen, T., Nguyen, H., & Tran, Q. (۲۰۲۴). AI-enabled predictive maintenance for smart infrastructure management. *IEEE Internet of Things Journal*, ۱۱(۴), ۶۱۲۴-۶۱۳۵. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3395140>

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (۲۰۲۴). Implementing digital twins in smart cities: Architecture and applications. *Sustainable Cities and Society*, ۹۷, ۱۰۴۷۰۰. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104700>

**ارجاع:** بهرام دلیخون، ارائه چارچوب مهندسی ورزش هوشمند برای طراحی و نگهداری پیش‌بینانه اماکن ورزشی مبتنی بر فناوری‌های نوین و استانداردهای ایمنی، *مجله علوم حرکتی و رفتاری*، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۸-۱.