



Research paper

(Received 14 Nov. 2024

Accepted 16 Sep. 2025)

Identifying and prioritizing Internet of Things (IoT) capabilities for the operation and maintenance of mining tunnels using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method

Vajiheh Bahrami¹, Reza Fattahi^{*2}, Hanieh Bahrami³

¹Master's Student in Industrial Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Higher Education Complex of Bam, Bam, Iran

³Bachelor's Student in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Higher Education Complex of Bam, Bam, Iran

Abstract

Tunnel operation and maintenance includes a set of activities carried out to maintain the safety, proper functioning, and useful life of tunnels during operation. This research aims to identify and prioritize IoT applications in the operation and maintenance of tunnels using multi-criteria decision-making methods. The Delphi method was employed to identify the criteria and sub-criteria. After implementing the Delphi method, the main criteria were categorized into three groups, and their respective sub-criteria were identified. Subsequently, data were collected using pairwise comparison questionnaires and analyzed using the Analytic Hierarchy Process. The results revealed that the security criterion, with a weight of 0.6404, holds the highest level of importance, followed by the maintenance and repair criterion with a weight of 0.2332, and the processing criterion with a weight of 0.1265, ranking second and third, respectively. Among the sub-criteria of security, the visibility of personnel and machinery ranked first. In the maintenance and repair sub-criteria, preventive maintenance of the tunnel structure ranked first, and updating information and data ranked last. Additionally, among the sub-criteria for tunnel processing operations, field analysis, exploration, and anomaly reporting ranked first, while preventing the waste of mineral resources ranked last compared to other sub-criteria. These results indicate that in high-risk environments such as mining tunnels, safety and preventive maintenance take precedence, while mineral resource efficiency is considered a lower priority.

Keywords: Internet of Things (IOT), Multi-criteria decision-making (MCDM) methods, Analytic hierarchy process (AHP) method, Maintenance, Tunnel construction

* Corresponding Author: Reza Fattahi
Email: r.fattahi@bam.ac.ir
Phone: +989131997640



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۴

شناسایی و اولویت‌بندی قابلیت‌های اینترنت اشیاء در بهره‌برداری و نگهداشت تونل‌های معدنی با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

وجیهه بهرامی^۱، رضا فتاحی^{۲*}، هانیه بهرامی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران
^۳دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

چکیده

بهره‌برداری و نگهداری تونل‌ها شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌ها است که برای حفظ ایمنی، عملکرد صحیح و طول عمر مفید تونل‌ها در طول بهره‌برداری انجام می‌شود. این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی کاربردهای اینترنت اشیاء در حوزه بهره‌برداری و نگهداشت تونل‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره انجام می‌شود. برای شناسایی معیارها و زیرمعیارهای پژوهش، از روش دلفی استفاده شده است. پس از اجرای روش دلفی، معیارهای اصلی در سه دسته نهایی طبقه‌بندی شدند و زیرمعیارهای مرتبط با هر یک نیز شناسایی گردیدند. در مرحله بعد، داده‌ها با استفاده از پرسشنامه‌های مقایسات زوجی جمع‌آوری و با روش تحلیل فرآیند سلسله مراتبی تجزیه و تحلیل شدند. نتایج پژوهش نشان داد که معیار امنیت با وزن ۰٫۶۴۰۴، بیشترین اهمیت را دارد و پس از آن، معیارهای نگهداری و تعمیرات با وزن ۰٫۲۳۳۲ و فرآوری با وزن ۰٫۱۲۶۵، به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. در میان زیرمعیارهای امنیت، قابل رویت بودن افراد و ماشین‌آلات در رتبه اول قرار گرفت. همچنین، در زیرمعیارهای نگهداری و تعمیرات، نگهداری پیشگیرانه سازه تونل در رتبه نخست و بروزرسانی اطلاعات و داده‌ها در رتبه آخر قرار گرفتند. در بخش عملیات فرآوری نیز، آنالیز میدانی، اکتشاف و گزارش آنومالی در رتبه اول و جلوگیری از هدررفت مواد معدنی در رتبه آخر نسبت به سایر زیرمعیارها قرار گرفت. این نتایج نشان می‌دهد که در محیط‌های پرخطر مانند تونل‌های معدنی، امنیت و نگهداری پیشگیرانه از اولویت بالاتری برخوردار هستند، در حالی که بهره‌وری مواد معدنی در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: اینترنت اشیاء، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، نگهداری و تعمیرات، ساخت تونل

۱- مقدمه

در سال ۱۹۹۹ اصطلاح جدیدی به نام اینترنت اشیاء پدید آمد که توسط کوین اشتون بریتانیایی که در حوزه بهینه سازی زنجیره تامین کار می کرد، ابداع شد [۱]. مفهوم اتصال وسایل و اشیاء به یکدیگر از طریق اینترنت، بدان معناست که هر چیزی در هر جایی، می تواند به اینترنت متصل شده و هوشمند گردد. بنابراین اینترنت اشیاء را می توان به عنوان یک شبکه بزرگ با انواع مختلف اشیاء متصل، که قادر به برقراری ارتباط با یکدیگر و تبادل اطلاعات صرف نظر از اینکه متعلق به یک گروه هستند یا خیر، درک کرد [۲]. هدف اینترنت اشیاء ایجاد پل ارتباطی بین جهان واقعی و دنیای مجازی است [۳]. اینترنت اشیاء به موضوعی رو به رشد تبدیل شده است که به سرعت در حال توسعه است [۴].

اینترنت اشیاء بیان می کند که چگونه محصولات و خدمات، توسعه و توزیع شوند و چطور زیرساخت ها مدیریت و نگهداری گردند. اینترنت اشیاء از نظارت بر انرژی در کارخانه ها جهت ردیابی زنجیره تامین گرفته تا بهینه سازی عملکرد تجهیزات و ایمنی کارگران را افزایش می دهد. امروزه، نظارت مؤثر و هماهنگی تولید بر زنجیره تامین، سامانه های حمل و نقل، بهداشت، ساخت و ساز، امنیت، عملیات و خودکارسازی صنعتی در میان همه بخش ها و فرآیندها اهمیت ویژه ای دارد [۵]. اینترنت اشیاء ایجاد کننده همگرایی چند رشته مانند: شبکه، سخت افزار تعبیه شده، طیف رادیویی، محاسبات سیار، فناوری های ارتباطی، فناوری های نرم افزار، فناوری های حساس، بهره وری انرژی، مدیریت اطلاعات و تجزیه و تحلیل داده ها است.

رشد سریع اینترنت اشیاء توسط چهار پیشرفت کلیدی در فناوری های دیجیتال هدایت می شود. یکی از این موارد، کاهش هزینه و کوچک سازی دستگاه های میکرو ارگانیزم هایی مثل مبدل ها (حسگرها و محرک ها)، واحدهای پردازش (به عنوان مثال، میکروکنترلرها، ریز پردازنده ها)، سامانه بر روی یک تراشه و گیرنده ها است. فاکتور دوم، سرعت و انبساط سریع اتصال بیسیم است. سوم توسعه ذخیره سازی داده و ظرفیت پردازش سامانه های محاسباتی است. در نهایت، چهارم ظهور برنامه های کاربردی، نوآورانه و تجزیه و تحلیل، از جمله پیشرفت هایی در فن های یادگیری ماشین برای پردازش داده های بزرگ است. این چهار محرک در لایه های انبوهی از فناوری های اینترنت اشیاء حضور دارند. به عنوان مثال، اینترنت اشیاء ممکن است مبدل هایی داشته باشد که داده ها را در شرایط فیزیکی و محیطی جمع آوری می کنند. این دستگاه ها داده ها را بر روی یک شبکه ارتباطی سیمی یا بیسیم به سرورها و کامپیوترها انتقال می دهند و آن ها را با استفاده از نرم افزار و تجزیه و تحلیل نرم افزاری ذخیره و پردازش می کنند. داده تجزیه و تحلیل شده می تواند برای تشخیص خطا، کنترل، پیش بینی، نظارت، و بهینه سازی فرایندها در سامانه به کار برده شود [۴].

فناوری های اینترنت اشیاء دارای پتانسیل افزایش بهره وری تاکتیکی، اثر بخشی، ایمنی و صرفه جویی هزینه ها، در دراز مدت هستند [۲]. یکی از مهمترین نکات در شرایط فعلی استفاده از تکنولوژی روز مانند مکانیزه کردن کلیه عملیات حفاری و همچنین اتوماسیون ماشین آلات به عنوان یک راهکار اساسی در کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری حفر تونل می باشد. در کشور ما به علت برخی محدودیت های داخلی و خارجی امکان استفاده از آخرین تکنولوژی های ارائه شده نیست، به طور مثال استفاده از ربات و ماشین آلات خودران در حال حاضر با توجه به نیروی انسانی ارزان در کشور منطقی نمی باشد، اما می توان با گسترش استفاده از روش های حفر اصولی و به کمک تجهیزات موجود و استفاده از فناوری هایی که مقرون به صرفه بوده و نیاز به سرمایه زیادی ندارند مانند فناوری اینترنت اشیاء، هزینه ها را کاهش و ایمنی و بهره وری را افزایش داد. هدف از این مقاله شناسایی و رتبه بندی کاربرد تکنولوژی اینترنت اشیاء در حفر تونل های معدنی از زمان ساخت تا بهره برداری و نگهداشت می باشد. در ادامه نیز به معرفی انواع تونل پرداخته شده است.

۱-۱- انواع تونل

از انواع تونل های پر کاربرد در حوزه های مهندسی می توان به تونل معدنی، تونل پیشاهنگ، تونل حمل و نقل، تونل تاسیسات شهری، تونل-زیرگذر، تونل پایه ای، تونل انتقال آب، تونل زهکشی، تونل انحراف آب، مسیر سرپوشیده و تونل باد اشاره کرد. در ادامه به معرفی کاربرد و ویژگی های برخی از این تونل ها می پردازیم.

(۱) **تونل معدنی:** استخراج ذخایر معدنی معمولاً به دو روش سطحی و زیرزمینی انجام می گیرد. تونل، یکی از بخش های ثابت در اکثر معادن زیرزمینی است. تونل های معدنی به منظور جابجایی کارکنان (ورود و خروج)، اتصال طبقات مختلف به یکدیگر (رمپ)،

دسترسی به کارگاه‌ها، حرکت ماشین‌آلات و انتقال مواد استخراجی توسط تجهیزات باربری (لوکوموتیو، واگن، نوار نقاله و غیره) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲) **تونل حمل و نقل:** تونل‌های حمل و نقل، از متداول‌ترین و شناخته‌شده‌ترین سازه‌های مورد استفاده برای جابجایی افراد و بار در محیط‌های شهری و غیر شهری توسط جاده یا راه‌آهن هستند. این سازه‌ها با عبور از درون کوه‌ها، زیر زمین و زیر آب، مسیر مورد نیاز برای عبور وسایل نقلیه شخصی و عمومی نظیر اتوبوس و قطار را فراهم می‌کنند. امروزه با افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و افزایش تعداد وسایل نقلیه، مسئله ترافیک به یک معضل همگانی تبدیل شده است. تونل‌های ترابری، سازه‌هایی هستند که می‌توانند بخش قابل توجهی از این مشکل را برطرف کنند. از مزیت‌های این نوع تونل‌ها می‌توان به کاهش طول مسیر، افزایش سرعت جابجایی، امکان اجرای طبقاتی و کاهش میزان مصرف سوخت اشاره کرد.

۳) **تونل تاسیسات شهری:** یکی از پرکاربردترین تونل‌های مورد استفاده در محیط‌های شهری، بخصوص در کلان‌شهرها، شهرهای توسعه یافته و شهرهای صنعتی، تونل تاسیسات است. این نوع از تونل‌ها به منظور انتقال خطوط آب، برق، گاز، تلفن، فاضلاب و دیگر خدمات شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. تونل‌های تاسیسات شهری، زیرساخت‌های مورد نیاز برای راه‌اندازی تاسیسات مکانیکی (مانند تاسیسات بهداشتی و الکتریکی) ساختمان‌های مسکونی و اداری را تامین می‌کنند. این تونل‌ها باعث انتقال ایمن و باکیفیت خدمات بدون شلوغ کردن فضای شهر می‌شوند. علاوه بر ساختمان‌های مسکونی و اداری، تونل‌های تاسیسات، در کارخانه‌های صنعتی اجرای پایپینگ و مجتمع‌های بزرگ نظیر دانشگاه‌ها، بیمارستان‌ها، آزمایشگاه‌ها و غیره کاربرد دارند.

۴) **تونل باد:** تونل باد، سازه‌ای توخالی است که به منظور شبیه‌سازی عملکرد اشیا پرند نظیر هواپیماها یا وسایل نقلیه در برابر جریان هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اغلب موارد، چندین فن قدرتمند در تونل‌های باد تعبیه می‌شوند و هوا را در طول تونل به جریان در می‌آورند. شی مورد آزمایش در یک محل مشخص به خوبی ثابت می‌شود. این شی می‌تواند یک مدل کوچک‌تر یا نمونه واقعی از وسیله مورد آزمایش نظیر ماشین، هواپیما، فضاپیما و غیره باشد.

۵) **تونل‌های چند منظوره:** برخی از تونل‌ها برای چندین کاربری مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این تونل‌ها، تونل‌های چند منظوره می‌گویند. تونل اسمارت در کشور مالزی، اولین تونل چندمنظوره است که به عنوان مسیر حمل و نقل وسایل نقلیه موتوری و مجرای کنترل‌کننده جریان سیل به کار گرفته می‌شود. این تونل، دارای دو طبقه مجزا است. طبقه پایین، کنترل جریان سیل‌های معمولی را بر عهده دارد. در صورت رخ دادن سیل‌های شدید، ورودی طبقه بالا بسته می‌شود و هر دو این تونل‌ها برای کنترل جریان آب‌های اضافی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

ایجاد شبکه متشکل از وسایل ارتباط متقابل، امکان مدیریت مؤثرتر همه دستگاه‌های متصل را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. اینترنت اشیا این امکان را فراهم می‌سازد تا اشیا از راه دور بر روی زیر ساخت‌های شبکه قرار گرفته و کنترل شوند. بنابراین فرصت‌هایی را برای ادغام مستقیم دنیای فیزیکی در سیستم‌های کامپیوتری ایجاد می‌کند که در نتیجه کارایی، دقت و مزایای اقتصادی را افزایش می‌دهد [۴]. اینترنت اشیا توسط حسگرها و محرک‌ها تقویت می‌شود که آن را به یک سیستم فیزیکی سایبری تبدیل می‌کند. این سیستم شامل فناوری‌هایی مانند شبکه‌های هوشمند، خانه‌های هوشمند، حمل و نقل هوشمند، شهرهای هوشمند و همچنین آموزش هوشمند هستند [۶]. اکنون اشیا محیط اطراف نیز با استفاده از فناوری‌های ارتباطی به ویژه اینترنت قادر به اتصال به یکدیگر و کنترل فعالیت‌های یکدیگر بدون دخالت انسان شده‌اند [۷].

تأثیرات زیست محیطی کاربردهای اینترنت اشیا در ساخت تونل استفاده از فناوری اینترنت اشیا (IoT) در حوزه ساخت تونل، علاوه بر بهبود فرآیندهای ساخت و افزایش ایمنی، تأثیرات مثبت قابل توجهی بر محیط زیست دارد. بر اساس مطالعات پیشین، کاربرد IoT در این حوزه منجر به کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، و بهینه‌سازی مصرف منابع طبیعی شده است. برخی از این تأثیرات به صورت کمی و با استناد به تحقیقات انجام‌شده ارائه می‌شود: ۱. کاهش مصرف انرژی: بر اساس مطالعه استفاده از سیستم‌های IoT برای نظارت هوشمند بر تجهیزات و فرآیندهای ساخت تونل، منجر به کاهش ۱۵ درصدی مصرف انرژی در مقایسه با روش‌های سنتی شده است. این کاهش انرژی عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی عملکرد ماشین‌آلات و کاهش زمان کارکرد آن‌ها در حالت بی‌بار است. ۲. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: با استفاده از سنسورهای IoT برای مدیریت بهینه‌ی فرآیندهای ساخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای (به ویژه CO₂) به میزان ۲۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش عمدتاً به دلیل کاهش مصرف سوخت در ماشین‌آلات و بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل مواد ساختمانی است ۳. کاهش ضایعات مواد ساختمانی: بر اساس تحلیل‌های ارائه‌شده استفاده از

IoT در نظارت بر مصرف مواد ساختمانی (مانند سیمان و فولاد) منجر به کاهش ۱۲ درصدی ضایعات مواد شده است. این کاهش ضایعات نه تنها هزینه‌های پروژه را کاهش می‌دهد، بلکه تأثیرات منفی زیست محیطی ناشی از دفع ضایعات را نیز به حداقل می‌رساند. ۴. بهینه‌سازی مصرف آب: استفاده از سیستم‌های IoT برای مدیریت مصرف آب در فرآیندهای ساخت تونل، منجر به کاهش ۱۰ درصدی مصرف آب شده است. این کاهش به دلیل نظارت دقیق بر مصرف آب و جلوگیری از هدررفت آن در مراحل مختلف ساخت است. ۵. کاهش آلودگی صوتی و گرد و غبار: بر اساس گزارش‌های ارائه‌شده توسط سازمان‌های محیط زیستی، استفاده از IoT برای کنترل و نظارت بر تجهیزات ساخت تونل، منجر به کاهش ۳۰ درصدی آلودگی صوتی و ۲۵ درصدی کاهش گرد و غبار در محیط‌های کاری شده است.

۲- مرور ادبیات

در ادامه به بیان برخی از تحقیقات صورت گرفته در خصوص کاربردهای اینترنت اشیا پرداخته شده است.

رضانی و موحدی صفت [۸] به رتبه بندی تهدیدهای اینترنت اشیا در محیط نظامی پرداختند. یافته‌ها نشان داد که برای سنجش تهدیدها از پنج معیار زمان لازم جهت اثرگذاری تهدید، میزان خسارت وارده در صورت وقوع تهدید، میزان تأثیر تهدید بر حوزه تصمیم‌گیری، میزان تأثیر تهدید در نتیجه نبرد و میزان بازگشت‌پذیری اثر تهدید، استفاده شده است. براساس نتایج این تحقیق، در سازمان‌های نظامی از میان تهدیدهای مختلف فناوری اینترنت اشیا، تهدیدهای مبتنی بر نقض امنیت فیزیکی سامانه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند.

زندیه و گرامی [۹] در مطالعات خود به تأثیرات اینترنت اشیا بر فرآیند نوآوری و خدمات در سازمان‌ها پرداخته اند. طبق نتایج به دست آمده در این تحقیق استفاده از اینترنت اشیا بر جهت‌گیری شرکتی یا نوآوری مادی و همچنین نوآوری غیر مادی، در سازمان فناوری محور تأثیر مثبت و معناداری دارد.

قنبر نژاد و همکاران [۱۰] به مطالعه کاربردها و چالش‌های اینترنت اشیا در محیط‌های یادگیری پرداختند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بعد فرهنگی-آموزشی از نظر متخصصان بیشترین تأثیرگذاری را در پذیرش و کاربرد اینترنت اشیا در محیط یادگیری دارد و بعد از آن عوامل اقتصادی، ساختاری-انسانی، زیرساختی-فنی و بعد فردی به ترتیب بیشترین تأثیرگذاری بر کاربرد اینترنت اشیا در محیط‌های یادگیری را دارند.

بهرامی زنوز و همکاران [۱۱] به شناسایی و اولویت‌بندی کاربرد اینترنت اشیا در دولت باز پرداختند. یافته‌های پژوهش آن‌ها نشان داد که بیست و یک عامل بر کاربرد اینترنت اشیا در دولت باز تأثیر داشته که قابل تقسیم به پنج دسته فنی، اقتصادی، حقوقی-قانونی، امنیتی و اجتماعی-فرهنگی می‌باشند. همچنین، دسته فنی و عوامل تأمین زیرساخت، تدوین استانداردها، تنظیم قوانین و مقررات، تأمین نیروی متخصص و حفظ امنیت داده‌ها به ترتیب از بیشترین اولویت برخوردار می‌باشند.

رونقی و حسینی [۱۲] به شناسایی و رتبه بندی خدمات اینترنت اشیا در حوزه سلامت پرداختند. یافته‌های این پژوهش اهمیت مدیریت بیماری‌های مزمن، خدمات پزشکی فوری غیرمستقیم، تشخیص زمین خوردن سالمندان، اطلاعات بیماران، ناسازگاری دارو و اطلاعات سلامت کودکان در میان خدمات اینترنت اشیا را نشان داد. در نتیجه مشخص گردید که سیاست گزاران در حوزه فناوری اینترنت اشیا در ابتدا باید به نقش این فناوری در نجات جان افراد واقف باشند و در اولویت بعد سرمایه گذاری در اینترنت اشیا می‌تواند به کنترل و نظارت رفتارهای سالمندان، بیماران و کودکان یاری رساند. همچنین، شناسایی و آگاهی از اولویت خدمات اینترنت اشیا به سیاست گزاران و مدیران حوزه درمان و بهداشت جهت مدیریت اثر بخش تر کمک می‌کند.

میرچا و همکاران [۱۳] به توصیف یک محیط آموزشی هوشمند و مزایای IOT در آن پرداختند و مهم‌ترین مزایا و چالش‌های مربوط به پذیرش اینترنت اشیا در آموزش عالی را در طی کووید-۱۹ شناسایی و توصیف کردند. یافته‌ها نشان داد که پذیرش اینترنت اشیا در آموزش عالی تأثیر مثبتی بر تعالی در تدریس، منابع افزوده و تعالی در یادگیری دارد. از نظر حمایت مدیریتی و نگرش نسبت به تغییر، سیاست‌های آموزشی بر پذیرش اینترنت اشیا در دانشگاه‌ها تأثیر دارد، اما این تأثیر نسبتاً کم است. پذیرش اینترنت اشیا در دانشگاه‌ها نیز تأثیر مثبتی بر اتصال درون و برون دانشگاهی دارد و منجر به چالش‌های مربوط به امنیت و یکپارچگی داده‌ها می‌شود.

عابد و همکاران [۱۴] به بررسی تأثیرات و آینده اینترنت اشیا با هدف بررسی پذیرش این فناوری توسط کاربران در دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی عربستان با استفاده از مدل پذیرش فناوری پرداختند که آن‌ها را به استفاده از این فناوری تشویق می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که اینترنت اشیا تأثیر مثبتی بر فرآیند آموزشی و مؤسسات دانشگاهی داشته است. در مورد آینده اینترنت اشیا و در مورد سودمندی درک شده و سهولت استفاده از این فناوری، توافق قوی بین افراد مورد مطالعه وجود داشت.

ماجد و علی [۱۵] به بررسی چگونگی تأثیر اینترنت اشیا در هوشمند سازی دانشگاه‌ها پرداختند. در نتیجه اینترنت اشیا طیف متنوعی از پارامترها را برای دانشگاه‌ها تعریف می‌کند که فرصت‌هایی را برای هوشمند ساختن آن‌ها شناسایی می‌کند و موجب ترغیب تعامل جدید بین اشیا و افراد می‌شود. این تحقیق بر ساخت اتاق‌های هوشمند، پارکینگ هوشمند و همچنین ارائه آموزش هوشمند به دانش آموزان تمرکز داشت.

محمدزاده و همکاران [۱۶] به شناسایی و اولویت بندی چالش‌های توسعه فناوری اینترنت اشیا در ایران با رویکرد تحلیل شبکه‌ای فازی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که عوامل تکنولوژیکی، مسائل حریم خصوصی و امنیتی، عوامل مرتبط با کسب و کار، چالش‌های قانونی و مقرراتی و عناصر فرهنگی عوامل اصلی تأثیرگذار بر توسعه فناوری اینترنت اشیا هستند و بین آن‌ها همبستگی وجود دارد. چالش‌های «فناوری» و «حریم خصوصی و امنیت» مهم‌ترین عواملی هستند که بر اینترنت اشیا تأثیر می‌گذارند. همچنین «مدل کسب و کار»، «معماری و طراحی» و «آموزش و پرورش» به ترتیب به عنوان مهمترین عوامل فرعی رتبه بندی شدند.

ورما و سود [۱۷] به ارزیابی عملکرد دانش آموزان با به کارگیری اینترنت اشیا به جای روش‌های سنتی پرداختند. در واقع این پژوهش به مقایسه ارزشیابی تجربی نمره عملکرد دانش آموزان توسط سیستم پیشنهادی با سیستم ارزیابی عملکرد سنتی می‌پردازد. نتایج حاصل از الگوریتم‌های داده کاوی نشان داد که سیستم پیشنهادی مبتنی بر اینترنت اشیا، عملکرد دانش آموزان را به طور کارآمدتر ارزیابی می‌کند.

در حوزه ساخت و عملیات‌های مربوط به تونل، گانش و همکاران [۱۸] پژوهشی با عنوان طراحی شبکه‌های حسگر زیرزمینی بی سیم برای نجات تونل‌ها ارائه کرده اند. این طرح شامل توسعه دستگاه‌های ارتباطی تخصصی متناسب با ارتباطات خاکی است. با پرداختن به چالش‌های مرتبط با ارتباطات متداول در محیط‌های تونلی، سیستم ارتباطی خاکی قصد دارد خدمات اضطراری را متحول کند و به‌عنوان یک خط حیاتی برای افراد گرفتار در زیر زمین عمل کرده و اثربخشی کلی عملیات نجات را بهبود بخشد. ژو و همکاران [۱۹] در مورد امکان سنجی و پتانسیل استفاده از IOT در صنعت معدن، به‌ویژه معادن ذغال سنگ تحقیقی ارائه کرده اند. این تحقیق نشان داد که بخش بزرگی از حسگرها و سیستم‌های ارتباطی نصب شده در معادن زغال سنگ می‌توانند به طور بالقوه در سیستم‌های IOT با تغییرات کم یا بدون تغییر ادغام شوند. علاوه بر این، با بحث در مورد یک سیستم نمونه اولیه NIOSH که بر اساس بردهای میکروکنترلر منبع باز کم هزینه و منبع باز توسعه یافته بود، مثالی برای یک برنامه کاربردی IoT ویژه ماینینگ ارائه شده است. این سیستم در یک معدن به صورت آزمایشی نصب شد.

درگاهی و رستم آبادی [۲۰] در تحقیق خود به تحلیل وضعیت پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های انحراف سد بهشت آباد پرداختند نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از روش کرنش بحرانی به این علت که تونل‌ها عمدتاً محوره می‌باشند نسبت به روش جابجایی مجاز نتایج واقع‌گرایانه تری را ارائه می‌دهد. ارزیابی‌ها نشان داد که سیستم نگهداری پیشنهادی به وسیله روش‌های تجربی برای تونل‌ها در سه مقطع در حالت کمینه مناسب نبوده و باعث ناپایداری تونل‌ها شده و برای سایر مقاطع مناسب بوده و پایداری تونل‌ها را تأمین می‌کند.

پورهاشمی و همکاران [۲۱] به ارزیابی و مدیریت ریسک ایمنی در ساخت تونل‌های ترافیکی تهران پرداختند. مدیریت ریسک ایمنی ساخت این تونل با چالش‌های مختلف از جمله: (۱) عبور از زیر کانال انتقال فاضلاب شهری، قنات و لوله‌های تاسیسات، (۲) عبور از مناطق پرترافیک با روباره اندک، (۳) سازه‌های سطحی با حساسیت بالا و (۴) تغییر مقطع هندسی تونل همراه بود. به منظور پیاده سازی مدل مدیریت ریسک ایمنی، در ابتدا با استفاده از مطالعات جامع ژئوتکنیک و زمین شناسی مهندسی، یک پایگاه داده تهیه و مدل زمین شناسی مسیر تونل ترسیم شد. در ادامه مناطق پرخطر، سازه‌های زیر سطحی و سطحی حساس به جابجایی، شناسایی و سطح هشدار با توجه به نوع و اهمیت هر کدام از این سازه‌ها تعریف شد. علاوه بر این، از مدل سازی عددی اجزاء محدود به منظور مدلسازی روش حفاری و طراحی سیستم نگهداری با رویکرد انتخاب روش بهینه در کنترل جابجایی‌ها بهره برده شد. نتایج مدلسازی عددی با استفاده

از یک سیستم رفتارنگاری، صحت سنجی و اصلاح شد. در نهایت با بهره‌گیری از این مدل، ساخت تونل با حداقل ریسک و مطابق با برنامه زمان بندی انجام شد.

با بررسی پژوهش‌های پیشین در حوزه کاربرد اینترنت اشیا (IoT) در ساخت و بهره‌برداری از تونل‌های معدنی، مشخص شد که این مطالعات دارای کاستی‌ها و چالش‌هایی هستند که این پژوهش به رفع آنها پرداخته است. در ادامه، این محدودیت‌ها و نوآوری‌های پژوهش حاضر به‌طور خلاصه بیان می‌شود:

بسیاری از تحقیقات گذشته به‌صورت پراکنده و بدون چارچوب مشخصی به بررسی کاربردهای IoT در تونل‌های معدنی پرداخته‌اند. این موضوع باعث شده است که نتایج این مطالعات نتوانند به‌طور جامع نیازهای این حوزه را پوشش دهند. این پژوهش با ارائه یک چارچوب ساختاریافته و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) مانند AHP، این شکاف را پر کرده و به شناسایی و اولویت‌بندی دقیق‌تر کاربردهای IoT کمک می‌کند. برخی از پژوهش‌های پیشین تنها بر یک یا چند معیار خاص (مانند امنیت یا بهره‌وری) متمرکز شده‌اند و معیارهای دیگر مانند نگهداری و تعمیرات یا فرآوری را نادیده گرفته‌اند. این پژوهش با در نظر گرفتن معیارهای جامع‌تر (امنیت، نگهداری و تعمیرات، و فرآوری) و زیرمعیارهای مرتبط با هر یک، به بررسی همه‌جانبه‌ی کاربردهای IoT در تونل‌های معدنی پرداخته است. تونل‌های معدنی به دلیل شرایط کاری سخت و پرخطر، نیازمند رویکردهای خاصی هستند که در بسیاری از پژوهش‌های پیشین به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته‌اند. این پژوهش با تمرکز بر شرایط خاص تونل‌های معدنی و نیازهای منحصربه‌فرد آنها، راهکارهای عملی‌تری را ارائه می‌دهد. اگرچه برخی مطالعات به نقش IoT در بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها پرداخته‌اند، اما نقش این فناوری در افزایش ایمنی و کاهش خطرات محیطی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با تأکید بر معیار امنیت و زیرمعیارهایی مانند نظارت بر گازهای سمی و مدیریت تهویه، به این چالش مهم پاسخ داده است. بسیاری از پژوهش‌های پیشین از روش‌های تحلیلی ساده‌تری استفاده کرده‌اند که قادر به اولویت‌بندی دقیق معیارها و زیرمعیارها نیستند. این پژوهش با به‌کارگیری روش AHP به عنوان یکی از روش‌های قدرتمند MCDM، امکان اولویت‌بندی دقیق‌تر و علمی‌تر کاربردهای IoT را فراهم کرده است. برخی مطالعات پیشین به جنبه‌های اقتصادی و محیطی کاربرد IoT در تونل‌های معدنی توجه کافی نداشته‌اند. این پژوهش با در نظر گرفتن معیارهایی مانند جلوگیری از هدررفت مواد معدنی و مدیریت حفاظت از محیط زیست، به این جنبه‌ها نیز پرداخته است. این پژوهش با رفع محدودیت‌ها و چالش‌های مذکور، نوآوری‌های زیر را ارائه می‌کند:

- ارائه یک چارچوب سیستماتیک برای شناسایی و اولویت‌بندی کاربردهای IoT در تونل‌های معدنی.
- استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (AHP) برای اولویت‌بندی دقیق‌تر معیارها و زیرمعیارها.
- توجه هم‌زمان به معیارهای امنیت، نگهداری و تعمیرات، و فرآوری به‌منظور پوشش جامع‌تر نیازهای این حوزه.
- تمرکز بر شرایط خاص تونل‌های معدنی و ارائه راهکارهای عملی‌تر برای بهبود ایمنی و بهره‌وری.
- بررسی جنبه‌های اقتصادی و محیطی کاربرد IoT در تونل‌های معدنی.

۳- مواد و روش‌ها

این پژوهش از حیث هدف پژوهشی کاربردی، از لحاظ جمع‌آوری داده‌ها پژوهشی کتابخانه‌ای_میدانی و از حیث تجزیه و تحلیل داده‌ها پژوهشی آمیخته (کمی-کیفی) می‌باشد. جامعه آماری این پژوهش شامل تمامی خبرگان و صاحب‌نظران در امور استخراج، حفر، بهره‌برداری و نگهداشت تونل‌ها می‌باشد. در روش دلفی، مطالعات نشان می‌دهند که تعداد ۷ تا ۱۵ نفر معمولاً کافی است، به شرطی که: این افراد در حوزه موضوع موردنظر متخصص باشند و بتوانند نظرات تخصصی و کاربردی ارائه دهند. نمونه‌گیری این پژوهش از نوع نمونه‌گیری هدفمند (غیر تصادفی) بوده و تعداد ۸ نفر از مهندسان حوزه معدن و مهندسان عمران که سابقه کاری بالای ۵ سال داشته و حداقل دارای مدرک لیسانس بودند، به عنوان نمونه پژوهش معرفی شدند. وقتی تعداد خبرگان کم است، مدیریت نظرات آن‌ها و تحلیل پاسخ‌ها ساده‌تر می‌شود. برای رسیدن به اجماع در گروه‌های کوچک، دوره‌های کمتری لازم است و فرآیند سریع‌تر پیش می‌رود. در ابتدا برای شناسایی کاربردهای اینترنت اشیا در حوزه تونل‌ها از روش دلفی با نظرسنجی از خبرگان (نمونه پژوهش) استفاده شد.

در این پژوهش، برای اجرای روش دلفی، تعداد ۸ نفر از خبرگان و متخصصان حوزه‌های مرتبط با ساخت، بهره‌برداری و نگهداشت تونل‌ها انتخاب شدند. تمامی خبرگان دارای حداقل ۵ سال سابقه کاری در حوزه‌های مرتبط با مهندسی معدن، مهندسی عمران، مدیریت

پروژه‌های ساخت تونل، یا حوزه‌های مرتبط با فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا (IoT) بودند. کلیه خبرگان دارای مدرک تحصیلی حداقل کارشناسی ارشد در رشته‌های مهندسی معدن، مهندسی عمران، مهندسی صنایع، یا رشته‌های مرتبط با فناوری اطلاعات و اینترنت اشیا بودند. برای پوشش ابعاد بین‌رشته‌ای پژوهش، ترکیب پانل دلفی به گونه‌ای طراحی شد که شامل متخصصان از حوزه‌های مختلف باشد. این ترکیب شامل: مهندسان معدن با تجربه در استخراج و حفر تونل‌های معدنی، مهندسان عمران با تخصص در ساخت و نگهداشت تونل‌های حمل و نقل و تونل‌های شهری، متخصصان فناوری اطلاعات و اینترنت اشیا با تجربه در پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند در پروژه‌های عمرانی، متخصصان محیط زیست با تمرکز بر کاهش تأثیرات زیست محیطی پروژه‌های ساخت تونل، متخصصان ایمنی با تجربه در مدیریت ریسک و ایمنی در پروژه‌های زیرزمینی. با توجه به ماهیت روش دلفی، که بر اساس توافق و اجماع بین خبرگان عمل می‌کند، تعداد ۸ نفر به عنوان نمونه انتخاب شد. این تعداد با توجه به مطالعات پیشین که نشان می‌دهند تعداد ۷ تا ۱۵ نفر برای دستیابی به اجماع در روش دلفی کافی است، در نظر گرفته شد. علاوه بر این، با توجه به تخصص‌های متنوع و تجربه‌های گسترده‌ی خبرگان، این تعداد برای پوشش ابعاد مختلف پژوهش کافی تشخیص داده شد. برای اطمینان از دستیابی به اجماع، فرآیند دلفی در سه دور اجرا شد. در هر دور، نظرات خبرگان جمع‌آوری و تحلیل شد و در دوره‌های بعدی، نظرات اصلاحی و توافقات نهایی حاصل گردید. ضریب هماهنگی کندال در دور سوم به مقدار ۰.۸۳ رسید که نشان‌دهنده‌ی توافق قوی بین اعضای پانل بود. این مقدار نشان می‌دهد که نمونه‌ی انتخاب‌شده از نظر تعداد و ترکیب تخصصی، توانسته است به اجماع مناسبی دست یابد.

پس از اجرای دور اول دلفی، مقیاس‌هایی که نمره‌ای کمتر از میانه طیف لیکرت یعنی عدد ۳ کسب کرده بودند، حذف شده و ضریب کندال محاسبه شد. میزان ضریب کندال ۰/۴۶ به دست آمد که بیانگر اتفاق نظر متوسط اعضا بود. برای بررسی مجدد میزان هماهنگی و اتفاق نظر خبرگان، پس از دور دوم اجرای روش دلفی ضریب هماهنگی کندال محاسبه گردید و میزان آن ۰/۶۳ به دست آمد که بیانگر اتفاق نظر خوب اعضای پانل دلفی بود. نتیجه محاسبه ضریب کندال در دور سوم از اجرای روش دلفی عدد ۰/۸۳ به دست آمد که اتفاق نظر قوی اعضا را نشان داده و در نتیجه اجرای روش دلفی متوقف گردید و کاربردهای اینترنت اشیا در سه دسته امنیت، نگهداری و تعمیرات و فرآوری دسته بندی شده که در جدول ۱ ارائه گردید. در مجموع ۵ زیر معیار ایمنی، ۶ نگهداری و تعمیرات و ۶ عملیات فرآوری اینترنت اشیا در حوزه ساخت تونل‌های معدنی شناسایی شد. برای تقویت مبانی نظری مرتبط با معیارها و زیرمعیارهای امنیت، نگهداری و تعمیرات و فرآوری در کاربردهای اینترنت اشیا (IoT) در تونل‌های معدنی، می‌توان به تبیین هر یک از این معیارها و ارتباط آن‌ها با کاربردهای IoT پرداخت. در ادامه به توضیح این معیارها و زیرمعیارها می‌پردازیم:

۱- امنیت: در محیط‌های معدنی، به‌ویژه در تونل‌ها، امنیت یکی از مهم‌ترین مسائل است. این امنیت می‌تواند شامل امنیت فیزیکی و سایبری باشد. استفاده از IoT در این زمینه می‌تواند به بهبود امنیت و کاهش خطرات کمک کند.

• زیرمعیارها:

- امنیت فیزیکی: شامل نظارت بر ورود و خروج افراد، استفاده از دوربین‌های مداربسته و سیستم‌های تشخیص نفوذ.
- نظارت بر شرایط ایمنی: استفاده از حسگرها برای ارزیابی شرایط محیطی مانند گازهای خطرناک، لرزش زمین و غیره.

۲- نگهداری و تعمیرات: نگهداری و تعمیرات به معنای حفظ و بهبود عملکرد تجهیزات و سیستم‌ها در تونل‌های معدنی است. IoT می‌تواند با جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل آن‌ها، نیاز به تعمیرات پیشگیرانه و بهبود کارایی را شناسایی کند.

• زیرمعیارها:

- تعمیرات پیشگیرانه: استفاده از حسگرها برای نظارت بر وضعیت تجهیزات و شناسایی مشکلات قبل از وقوع خرابی.
- مدیریت دارایی: استفاده از سیستم‌های IoT برای پیگیری و مدیریت تجهیزات و ابزارهای مورد نیاز در تونل‌ها.
- تحلیل داده‌های عملیاتی: جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مربوط به عملکرد تجهیزات برای بهینه‌سازی فرآیند نگهداری.

۳- فرآوری: فرآوری در تونل‌های معدنی شامل تبدیل مواد خام به محصولات قابل استفاده است. با استفاده از IoT، می‌توان فرآیندهای تولید را بهینه‌سازی و کنترل بهتری بر روی آن‌ها داشت.

• زیرمعیارها:

- نظارت بر فرآیند: استفاده از حسگرها و دستگاه‌های IoT برای نظارت بر مراحل مختلف فرآوری و جمع‌آوری داده‌ها.
- کنترل کیفیت: ارزیابی و تجزیه و تحلیل کیفیت مواد در طول فرآوری و استفاده از داده‌ها برای بهبود فرآیند.
- بهینه‌سازی مصرف انرژی: استفاده از سیستم‌های هوشمند برای کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولید.
- جمع‌آوری داده‌ها: سیستم‌های IoT می‌توانند داده‌های مربوط به امنیت، نگهداری و فرآوری را در زمان واقعی جمع‌آوری کرده و به تحلیل و تصمیم‌گیری کمک کنند.
- تحلیل داده‌ها: با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل داده‌ها، می‌توان به شناسایی الگوها و بهبود عملکرد در تمامی زمینه‌ها پرداخت.
- خودکارسازی IoT: می‌تواند به خودکارسازی فرآیندها و کاهش نیاز به دخالت انسانی کمک کند، که این امر در بهبود کارایی و کاهش خطرات موثر است.

در نتیجه، می‌توان گفت که استفاده از IoT در تونل‌های معدنی به تقویت معیارهای امنیت، نگهداری و تعمیرات و فرآوری کمک شایانی می‌کند. با توجه به زیرمعیارهای هر یک از این معیارها و تبیین ارتباط آن‌ها، می‌توان به بهبود کارایی، ایمنی و کیفیت در عملیات معدنی دست یافت. این مبانی نظری می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای تحقیقات بیشتر و توسعه سیستم‌های هوشمند در صنعت معدن استفاده شود.

جدول ۱- معیارها و زیر معیارهای شناسایی شده در حوزه تونل‌های معدنی

معیار	نماد	زیرمعیار
امنیت	C_{11}	قابل رویت بودن افراد و ماشین‌آلات
	C_{12}	مدیریت حفاظت از محیط زیست
	C_{13}	مدیریت سیستم تهویه
	C_{14}	حسگرهای (دما، گازهای سمی، اکسیژن)
	C_{15}	نظارت بر بهداشت محیط کار
نگهداری و تعمیرات	C_{21}	مدیریت سیستم آبکشی و آب‌های زیرزمینی
	C_{22}	بروزرسانی اطلاعات و داده‌ها
	C_{23}	نگهداری پیشگیرانه ماشین‌آلات و تجهیزات
	C_{24}	ردیابی ماشین‌آلات
	C_{25}	نگهداری پیشگیرانه سازه تونل
	C_{26}	حسگرها
فرآوری	C_{31}	آنالیز میدانی، اکتشاف و گزارش آنومالی
	C_{32}	نظارت و کنترل از راه دور
	C_{33}	عملیات خودران و پیوسته
	C_{34}	اتوماسیون فرآیند فرآوری مواد معدنی
	C_{35}	مدیریت ترافیک ماشین‌آلات
	C_{36}	جلوگیری از هدررفت مواد معدنی

پس از شناسایی معیارها و زیر معیارهای پژوهش با استفاده از روش دلفی، وزن دهی و رتبه بندی آنها با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۱ (AHP) صورت گرفت. این روش جزو روش های تصمیم گیری چندمعیاره^۲ (MCDM) می باشد. روش های MCDM در مواقعی به کار می روند که معیارهای مختلفی برای اولویت بندی و ارزش گذاری گزینه ها وجود دارند و باید با توجه به آنها بهترین انتخاب صورت گیرد [۲۶-۲۲]. روش AHP توسط فردی به نام ساعتی (۱۹۹۰) ابداع شد و به مقایسه زوجی نظرات خبرگان در خصوص میزان اهمیت هر یک از ابعاد کیفیت نسبت به سایر ابعاد با استفاده از یک طیف ۹ تایی موسوم به طیف ساعتی می پردازد [۲۶-۳۲]. تخصیص امتیازهای عددی مربوط به هر معیار بر اساس جدول ۲ صورت گرفت. در ادامه گام های روش AHP جهت وزن دهی معیارها ارائه گردید.

جدول ۲- طبقه بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها

امتیاز عددی	مقایسه نسبی شاخصها (قضاوت شفاهی)
۹	اهمیت مطلق (Extremely preferred)
۷	اهمیت خیلی قوی (Very Strongly preferred)
۵	اهمیت قوی (Strongly preferred)
۳	اهمیت ضعیف (Moderately preferred)
۱	اهمیت یکسان (Equally preferred)
۲، ۴، ۶ و ۸	ترجیحات بین فاصله های بالا

در گام نخست تشکیل ماتریس مقایسات زوجی مطابق رابطه (۱) صورت گرفت.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن a_{ij} ترجیح عنصر i نسبت به j است. در مقایسه زوجی معیارها نسبت به یکدیگر، شرط معکوسی رابطه (۲) برقرار است.

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2)$$

ماتریس مقایسه زوجی یک ماتریس $n \times n$ بوده که n تعداد عناصری است که مورد مقایسه قرار گرفته اند. برای هر ماتریس زوجی $n \times n$ ، عناصر روی قطر مساوی یک بوده ولی سایر درایه های ماتریس باید بر اساس مقایسات زوجی بر اساس نظرات خبرگان تعیین شوند. درایه های قرینه نسبت به قطر، معکوس یکدیگر هستند.

در مرحله پایانی برای محاسبه وزن معیارها، ابتدا نرمال سازی عناصر هر ستون از تقسیم هر یک از مولفه ها بر حاصل جمع آنها صورت می گیرد. سپس بردار وزن از میانگین حسابی هر سطر به دست می آید. پس از انجام مقایسات زوجی بین معیارها و زیر معیارهای پژوهش، محاسبه نرخ ناسازگاری در مقایسات زوجی صورت گرفت. نرخ ناسازگاری مطابق گام های زیر محاسبه گردید.

گام اول: محاسبه بردار مجموع وزنی (WSV): بردار مجموع وزنی از حاصل ضرب ماتریس مقایسات زوجی (D) در بردار وزن های نسبی به دست آمده (W) با روش AHP مطابق رابطه ۳ به دست می آید.

$$WSM = D \times W \quad (3)$$

^۱Analytic Hierarchy Process (AHP)

^۲Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

^۳Weighted Sum Vector

گام دوم: محاسبه بردار سازگاری (CV): بردار سازگاری از تقسیم مولفه‌های بردار مجموع وزنی بر بردار وزن‌های نسبی حاصل می‌شود.

گام سوم: محاسبه بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسات زوجی (λ_{max}): بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسات زوجی با میانگین گیری عناصر بردار سازگاری محاسبه می‌گردد.

گام چهارم: محاسبه شاخص ناسازگاری (II): شاخص ناسازگاری مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌گردد.

$$II = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

که در این رابطه بیانگر تعداد معیارها می‌باشد.

گام پنجم: محاسبه نرخ ناسازگاری (IR): نرخ ناسازگاری مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌گردد.

$$IR = \frac{II}{IRI} \quad (5)$$

که در آن IRI^5 شاخص ناسازگاری تصادفی است و مقدار آن با توجه به تعداد معیارها از جدول ۳ استخراج می‌گردد. مقادیر این جدول، مقادیر استاندارد و از پیش تعیین شده می‌باشند که از شبیه سازی حاصل شده‌اند.

جدول ۳- شاخص ناسازگاری تصادفی

N	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
IRI	۰	۰	۰,۵۸	۰,۹۰	۱,۱۲	۱,۲۴	۱,۳۲	۱,۴۱	۱,۴۵	۱,۴۹	۱,۵۱	۱,۵۲	۱,۵۶	۱,۵۷	۱,۵۹

اگر نرخ ناسازگاری مقداری کمتر از ۰,۱ را کسب کند ($IR \leq 0.1$) باشد، بین مقایسات زوجی ناسازگاری وجود نداشته و می‌توان به نتایج اعتماد کرد. در غیر این صورت تصمیم گیرنده باید مقایسات زوجی را مورد بازنگری قرار دهد. هر چه تعداد معیارها و گزینه‌ها در مسئله تصمیم گیری افزایش یابد، احتمال ناسازگاری در مقایسات زوجی نیز بیشتر است. در ادامه در بخش چهارم این پژوهش، نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها ارائه شده‌است.

۴- یافته‌ها

در ابتدا برای تعیین میزان اهمیت هر یک از معیارها اصلی یعنی امنیت، نگهداری و تعمیرات و فرآوری، ماتریس مقایسات زوجی آن‌ها نسبت به یکدیگر تشکیل گردید. جهت تعیین امتیاز هر یک از معیارها، از میانگین گیری هندسی نظرات خبرگان استفاده گردید. پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی معیارها نسبت به یکدیگر، ماتریس نرمال شده تشکیل گردید و با میانگین گیری حسابی هر یک از سطرها ماتریس نرمال شده، وزن هر یک از معیارها به دست آمد. در جدول ۴ ماتریس نرمال شده، وزن معیارها و رتبه هر یک از آن‌ها ارائه شده‌است.

^۱Consistency Vector

^۲Eigen Value

^۳Inconsistency Index

^۴Inconsistency Ratio

^۵Inconsistency Random Index

جدول ۴- وزن دهی و رتبه بندی معیارهای اصلی با روش AHP

معیارها		C ₁	C ₂	C ₃	وزن معیارها	اولویت بندی	IR
امنیت	C ₁	۰,۶۵۲۶	۰,۶۹۷۲	۰,۵۷۱۵	۰,۶۴۰۴	۱	۰,۰۳
نگهداری و تعمیرات	C ₂	۰,۱۹۵۴	۰,۲۰۸۷	۰,۲۹۵۴	۰,۲۳۳۲	۲	
فرآوری	C ₃	۰,۱۵۲۱	۰,۰۹۴۱	۰,۱۳۳۲	۰,۱۲۶۵	۳	

مطابق جدول ۴، معیار امنیت بیشترین رتبه وزنی را داراست و در اولویت و درجه اهمیت نخست قرار می‌گیرد. سپس معیار نگهداری و تعمیرات و پس از آن معیار فرآوری به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. امنیت اینترنت اشیا در تونل‌ها به دلیل آسیب پذیری‌های بالقوه در دستگاه‌های متصل بسیار مهم است. اطمینان از در دسترس بودن، محرمانه بودن و یکپارچگی این سیستم‌ها به جلوگیری از دسترسی غیر مجاز کمک می‌کند و از داده‌های حساس محافظت می‌کند و اقدامات امنیتی قوی را در چنین محیط‌هایی ضروری می‌کند. در این مطالعه بر امنیت به عنوان یک اولویت در سیستم مدیریت ایمنی هوشمند IoT تأکید دارد که شامل کنترل دسترسی، ردیابی کارگران در زمان واقعی و مکانیسم‌های واکنش اضطراری برای اطمینان از ایمنی کارگران و جلوگیری از حوادث در محیط چالش برانگیز ساخت تونل‌های زیرزمینی عمیق است. همچنین نرخ ناسازگاری برای مقایسات زوجی ۰,۰۳ به دست آمد که مقداری کمتر از ۰,۱ و در نتیجه مقدار قابل قبولی را دارا است. یعنی بین مقایسات زوجی ناسازگاری وجود نداشته و نتایج قابل اعتماد است.

پس از اولویت بندی معیارهای اصلی، زیر معیارهای هر یک از معیارهای اصلی نیز مورد بررسی و رتبه بندی قرار گرفت. مطابق روش AHP، ابتدا با میانگین گیری هندسی امتیازات خبرگان به هر یک از زیر معیارها نسبت به یکدیگر با طیف ده تایی ساعتی، ماتریس مقایسات زوجی تشکیل گردید. سپس نرمال سازی ماتریس مقایسات زوجی صورت گرفت و در نهایت وزن هر یک از زیر معیارها نیز محاسبه گردید و بر اساس وزن به دست آمده، رتبه بندی آن‌ها صورت گرفت. نتایج وزن دهی و رتبه بندی زیر معیارهای معیار امنیت مطابق جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۵- وزن دهی و رتبه بندی زیر معیارهای معیار امنیت با روش AHP

زیر معیارهای امنیت		C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	وزن	رتبه	IR
قابل رویت بودن افراد و ماشین آلات	C ₁₁	۰,۴۳۳۱	۰,۴۰۰۹	۰,۴۸۵۶	۰,۴۳۳۳	۰,۳۸۷۸	۰,۴۲۸۲	۱	۰,۰۷۳
مدیریت حفاظت از محیط زیست	C ₁₂	۰,۰۸۰۲	۰,۰۷۴۲	۰,۰۷۶۲	۰,۰۶۱۵	۰,۰۷۵۸	۰,۰۷۳۶	۵	
مدیریت سیستم تهویه	C ₁₃	۰,۱۲۶۰	۰,۱۳۷۶	۰,۱۴۱۳	۰,۱۷۱۹	۰,۱۵۳۴	۰,۱۴۶۰	۳	
حسگرهای (دما - گازهای سمی - اکسیژن)	C ₁₄	۰,۲۳۶۱	۰,۲۸۵۲	۰,۱۹۴۱	۰,۲۳۶۲	۰,۲۷۱۴	۰,۲۴۴۶	۲	
نظارت بر بهداشت محیط کار	C ₁₅	۰,۱۲۴۷	۰,۱۰۲۰	۰,۱۰۲۸	۰,۰۹۷۲	۰,۱۱۱۶	۰,۱۰۷۷	۴	

مطابق جدول ۵، بیشترین وزن و درجه اهمیت زیر معیارهای معیار امنیت به قابل رویت بودن افراد و ماشین آلات با وزن ۰,۴۲۸ و کمترین درجه اهمیت به زیر معیار مدیریت حفاظت از محیط زیست با وزن ۰,۰۷۳۶ اختصاص یافت. همچنین نرخ ناسازگاری برای مقایسات زوجی ۰,۰۷۳ به دست آمد که مقداری کمتر از ۰,۱ و در نتیجه مقدار قابل قبولی را دارا است. یعنی بین مقایسات زوجی ناسازگاری وجود نداشته و نتایج قابل اعتماد است.

نتایج حاصل از رتبه بندی و وزن دهی زیر معیارهای معیار نگهداری و تعمیرات نیز در جدول ۶ و برای زیر معیارهای معیار فرآوری در جدول ۷ ارائه گردید.

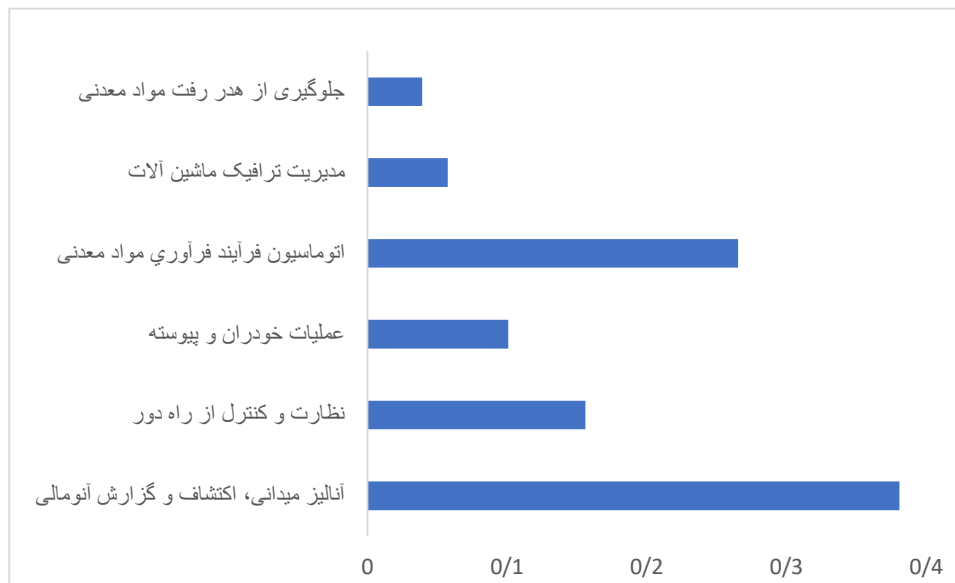
جدول ۶- وزن دهی و رتبه بندی زیر معیارهای معیار نگهداری و تعمیرات با روش AHP

زیر معیارهای تعمیر و نگهداری		C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	وزن	رتبه	IR
مدیریت سیستم آبکشی و آب های زیرزمینی	C ₂₁	۰,۰۹۹۹	۰,۰۸۹۲	۰,۱۴۲۲	۰,۰۶۶۰	۰,۱۱۴۲	۰,۰۵۸۷	۰,۰۹۵۰	۵	۰,۰۸۶
بروز رسانی اطلاعات و داده‌ها	C ₂₂	۰,۰۸۲۷	۰,۰۷۳۹	۰,۰۷۴۲	۰,۰۳۵۷	۰,۰۷۳۶	۰,۱۳۱۶	۰,۰۷۸۶	۶	
نگهداری پیشگیرانه ماشین آلات و تجهیزات معدنی	C ₂₃	۰,۱۱۷۷	۰,۱۶۷۱	۰,۱۶۷۶	۰,۱۷۰۲	۰,۳۰۵۷	۰,۰۶۹۰	۰,۱۶۶۲	۲	
ردیابی ماشین آلات	C ₂₄	۰,۱۹۵۴	۰,۲۶۷۴	۰,۱۲۷۲	۰,۱۲۹۱	۰,۰۸۷۴	۰,۱۴۶۲	۰,۱۵۸۸	۳	
نگهداری پیشگیرانه سازه تونل	C ₂₅	۰,۲۸۸۳	۰,۳۳۱۱	۰,۱۸۰۷	۰,۴۸۶۹	۰,۳۲۹۶	۰,۴۶۷۵	۰,۳۴۷۴	۱	
حسگرها	C ₂₆	۰,۲۱۶۱	۰,۰۷۱۳	۰,۳۰۸۲	۰,۱۱۲۱	۰,۰۸۹۵	۰,۱۲۶۹	۰,۱۵۴۰	۴	

مطابق جدول ۶، از بین زیر معیارهای نگهداری و تعمیرات، زیر معیار نگهداری پیشگیرانه سازه تونل با وزن ۰,۳۴۷ در رتبه نخست اهمیت و زیر معیار بروزرسانی اطلاعات و داده‌ها با وزن ۰,۰۷۸۶ در رتبه آخر از لحاظ درجه اهمیت نسبت به سایر زیر معیارها قرار گرفت. همچنین نرخ ناسازگاری برای مقایسات زوجی ۰,۰۸۶ به دست آمد که مقداری کمتر از ۰,۱ و در نتیجه مقدار قابل قبولی را دارا است. یعنی بین مقایسات زوجی ناسازگاری وجود نداشته و نتایج قابل اعتماد است.

جدول ۷- وزن دهی و رتبه بندی زیر معیارهای معیار عملیات فرآوری با روش AHP

زیر معیارهای عملیات فرآوری		C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	C ₃₆	وزن	رتبه	IR
آنالیز میدانی، اکتشاف و گزارش آنومالی	C ₃₁	۰,۴۰۰۳	۰,۴۳۷۹	۰,۴۰۶۲	۰,۴۱۲۸	۰,۳۵۰۵	۰,۲۷۷۴	۰,۳۸۰۹	۱	۰,۰۷۴
نظارت و کنترل از راه دور	C ₃₂	۰,۱۲۶۱	۰,۱۳۸۰	۰,۱۳۹۷	۰,۱۳۸۵	۰,۱۹۳۲	۰,۲۰۱۶	۰,۱۵۶۲	۳	
عملیات خودران و پیوسته	C ₃₃	۰,۰۹۳۵	۰,۰۹۳۷	۰,۰۹۴۸	۰,۰۹۱۰	۰,۰۹۵۱	۰,۱۳۶۵	۰,۱۰۰۸	۴	
اتوماسیون فرآیند فرآوری مواد معدنی	C ₃₄	۰,۲۵۳۶	۰,۲۶۰۶	۰,۲۷۲۶	۰,۲۶۱۵	۰,۲۶۶۶	۰,۲۷۶۷	۰,۲۶۵۳	۲	
مدیریت ترافیک ماشین آلات	C ₃₅	۰,۰۶۶۱	۰,۰۴۱۳	۰,۰۵۷۷	۰,۰۵۶۷	۰,۰۵۷۹	۰,۰۶۶۰	۰,۰۵۷۶	۵	
جلوگیری از هدر رفت مواد معدنی	C ₃₆	۰,۰۶۰۳	۰,۰۲۸۶	۰,۰۲۹۰	۰,۰۳۹۵	۰,۰۳۶۷	۰,۰۴۱۸	۰,۰۳۹۳	۶	



شکل ۱: نمودار وزن دهی و اهمیت زیر معیارها

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۷، از بین زیر معیارهای عملیات فرآوری تونل‌ها، زیر معیار آنالیز میدانی، اکتشاف و گزارش آنومالی با وزن ۰,۳۸۰۹ دارای بیشترین میزان اهمیت و زیر معیار جولوگیری از هدر رفت مواد معدنی با وزن ۰,۰۳۹۳ دارای کمترین درجه اهمیت نسبت به سایر زیر معیارها در این دسته بود. همچنین نرخ ناسازگاری برای مقایسات زوجی ۰,۰۷۴ به دست آمد که مقداری کمتر از ۰,۱ و در نتیجه مقدار قابل قبولی را دارا است. یعنی بین مقایسات زوجی ناسازگاری وجود نداشته و نتایج قابل اعتماد است. لازم به ذکر است که حاصل جمع تمامی اوزان به دست آمده برای معیارهای اصلی و هر دسته از زیر معیارهای آنها همواره برابر با عدد ۱ می‌باشد. نتایج وزن دهی معیارها و زیرمعیارها در این پژوهش نشان می‌دهد که امنیت با وزن ۰,۶۴۰۴ بالاترین اهمیت را در میان معیارهای اصلی دارد. این در حالی است که معیارهای نگهداری و تعمیرات و فرآوری به ترتیب با وزن‌های ۰,۲۳۳۲ و ۰,۱۲۶۵ در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در ادامه، دلایل این اولویت‌بندی و تحلیل نتایج وزن دهی ارائه می‌شود.

۱. اهمیت بالای معیار امنیت: معیار امنیت با وزن ۰,۶۴۰۴ به عنوان بالاترین اولویت در این پژوهش شناسایی شده است. این امر نشان‌دهنده این است که در شرایط پرخطر مانند فعالیت‌های معدنی زیرزمینی، حفظ جان و سلامت کارگران و تجهیزات باید در اولویت قرار گیرد.

• شرایط محیط زیرزمینی تونل‌های معدنی:

تونل‌های معدنی به دلیل ماهیت زیرزمینی و شرایط کاری سخت، محیطی پرخطر محسوب می‌شوند. خطراتی مانند ریزش سنگ، نشت گازهای سمی، کمبود اکسیژن و حوادث ناشی از تجهیزات سنگین، ایمنی کارگران و تجهیزات را به طور مداوم تهدید می‌کند. این شرایط باعث می‌شود که امنیت به عنوان اولین و مهم‌ترین اولویت در مدیریت تونل‌های معدنی شناخته شود.

• نقش فناوری اینترنت اشیا (IoT) در افزایش امنیت:

فناوری IoT با استفاده از سنسورها و سیستم‌های نظارتی هوشمند، امکان نظارت لحظه‌ای بر شرایط محیطی و عملکرد تجهیزات را فراهم می‌کند. برای مثال، سنسورهای دما، گاز و اکسیژن می‌توانند به طور مداوم شرایط محیطی را رصد کرده و در صورت تشخیص خطر، هشدارهای لازم را ارسال کنند. همچنین، سیستم‌های IoT می‌توانند با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده، الگوهای خطر را پیش‌بینی کرده و از وقوع حوادث جلوگیری کنند. این قابلیت‌ها باعث می‌شود که امنیت به عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها در مدیریت تونل‌های معدنی شناخته شود.

• کنترل تردد ماشین‌آلات و کارگران:

یکی دیگر از دلایل اهمیت امنیت، نیاز به کنترل دقیق تردد ماشین‌آلات و کارگران در محیط‌های زیرزمینی است. سیستم‌های IoT می‌توانند با استفاده از سنسورها و فناوری‌های ردیابی، موقعیت کارگران و ماشین‌آلات را به طور دقیق رصد کرده و از بروز تصادفات و حوادث جلوگیری کنند. این موضوع به ویژه در تونل‌های معدنی که فضای کاری محدود و خطرات زیادی وجود دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲. اهمیت معیار نگهداری و تعمیرات: زیرمعیار نگهداری پیشگیرانه سازه تونل با وزن بالایی نسبت به بقیه زیرمعیارها، نشان‌دهنده اهمیت آن در پیشگیری از خرابی‌ها و حوادث است.

• کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری:

نگهداری و تعمیرات به موقع تجهیزات و سازه‌های تونل، نه تنها از خرابی‌های غیرمنتظره جلوگیری می‌کند، بلکه هزینه‌های تعمیرات را نیز کاهش می‌دهد. این موضوع به ویژه در تونل‌های معدنی که تجهیزات سنگین و گران‌قیمت به طور مداوم استفاده می‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

• نقش IoT در نگهداری پیشگیرانه:

فناوری IoT با استفاده از سنسورهای تعبیه‌شده در تجهیزات و سازه‌های تونل، امکان نظارت مداوم بر وضعیت فنی آنها را فراهم می‌کند. برای مثال، سنسورهای ارتعاش و دما می‌توانند نشان‌دهنده خرابی‌های قریب‌الوقوع در ماشین‌آلات باشند. این قابلیت‌ها باعث می‌شود که نگهداری و تعمیرات به عنوان یکی از معیارهای کلیدی در مدیریت تونل‌های معدنی شناخته شود.

۳. اهمیت معیار فرآوری و زیرمعیار جلوگیری از هدر رفت مواد معدنی

• کم‌اهمیت بودن زیرمعیار جلوگیری از هدر رفت مواد معدنی

زیرمعیار «جلوگیری از هدر رفت مواد معدنی» با وزن ۰,۳۹۳ کم‌ترین اهمیت را در میان زیرمعیارهای فرآوری دارد. این موضوع می‌تواند به دلایل زیر باشد:

• اولویت‌های امنیتی و نگهداری:

با توجه به شرایط پرخطر تونل‌های معدنی، اولویت اصلی در مدیریت این محیط‌ها، امنیت کارگران و تجهیزات است. در نتیجه، معیارهایی مانند امنیت و نگهداری پیشگیرانه نسبت به بهره‌وری مواد معدنی اولویت بیشتری دارند.

• نقش کمرنگ‌تر IoT در بهینه‌سازی فرآیندهای فرآوری:

اگرچه فناوری IoT می‌تواند در بهینه‌سازی فرآیندهای فرآوری نقش داشته باشد، اما این نقش در مقایسه با نقش آن در افزایش امنیت و نگهداری پیشگیرانه، کمرنگ‌تر است. این موضوع ممکن است باعث شده باشد که خبرگان، زیرمعیار جلوگیری از هدر رفت مواد معدنی را در اولویت پایین‌تری قرار دهند.

تحلیل خبرگان:

بر اساس نظرات خبرگان، اولویت‌های امنیتی و نگهداری در تونل‌های معدنی به دلیل شرایط پرخطر و نیاز به حفظ ایمنی کارگران و تجهیزات، از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. در حالی که بهره‌وری مواد معدنی نیز مهم است، اما این موضوع در مقایسه با امنیت و نگهداری، اولویت کم‌تری دارد. این دیدگاه خبرگان نشان‌دهنده این است که در محیط‌های پرخطر مانند تونل‌های معدنی، ایمنی و نگهداری پیشگیرانه باید در اولویت قرار گیرد.

۵- نتیجه گیری

استفاده و بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوظهور نظیر اینترنت اشیا، باعث بهبود و آسان‌سازی کارها، کاهش هزینه‌ها و در نهایت بهبود بهره‌وری کار می‌گردد. به کارگیری این تکنولوژی به خصوص در مشاغل دشوار مانند استخراج، بهره‌برداری و نگهداشت تونل‌ها و معادن، می‌تواند مفید واقع شود. در این پژوهش نیز شناسایی و رتبه‌بندی کاربرد این تکنولوژی در حفر تونل‌های معدنی از زمان ساخت تا بهره‌برداری و نگهداشت پرداخته شد. در گام نخست شناسایی معیارها و زیر معیارها با روش دلفی صورت گرفت. سپس جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از پرسشنامه‌های مقایسات زوجی بر اساس روش AHP انجام شد. برای رتبه‌بندی معیارها و زیر معیارهای شناسایی شده از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در بین معیارهای اصلی، معیار امنیت بیشترین رتبه

وزنی را داراست (۰,۶۴۰۴) و در اولویت و درجه اهمیت نخست قرار می‌گیرد. سپس معیار نگهداری و تعمیرات با وزن ۰,۲۳۳۲ و پس از آن معیار فرآوری با وزن ۰,۱۲۶۵ به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند.

در بین زیر معیارهای مربوط به معیار امنیت، بیشترین وزن و درجه اهمیت به زیر معیار قابل رویت بودن افراد و ماشین آلات با وزن ۰,۴۲۸ و کمترین درجه اهمیت به زیر معیار مدیریت حفاظت از محیط زیست با وزن ۰,۰۷۳۶ اختصاص یافت. از بین زیر معیارهای نگهداری و تعمیرات، زیر معیار نگهداری پیشگیرانه سازه تونل با وزن ۰,۳۴۷ در رتبه نخست اهمیت و زیر معیار بروزرسانی اطلاعات و داده‌ها با وزن ۰,۰۷۸۶ در رتبه آخر از لحاظ درجه اهمیت نسبت به سایر زیر معیارها قرار گرفت. همچنین از بین زیر معیارهای عملیات فرآوری تونل‌ها، زیر معیار آنالیز میدانی، اکتشاف و گزارش آنومالی با وزن ۰,۳۸۰۹ دارای بیشترین میزان اهمیت و زیر معیار جلوگیری از هدر رفت مواد معدنی با وزن ۰,۰۳۹۳ دارای کمترین درجه اهمیت نسبت به سایر زیر معیارها در این دسته بود.

برای اطمینان از قابل اعتماد بودن نتایج و عدم ناسازگاری در بین مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که نرخ ناسازگاری برای تمامی ماتریس‌های مقایسات زوجی مقداری کمتر از ۰,۱ را دارا بوده است که این موضوع عدم ناسازگاری در مقایسات زوجی معیارها و زیر معیارها نسبت به یکدیگر و قابل اعتماد بودن نتایج را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج حاصل از روش AHP، هر چه میزان وزن معیار و زیر معیاری بیشتر باشد، درجه اهمیت آن در مسائل تصمیم‌گیری نیز افزایش می‌یابد. لذا برای انتخاب درست معیارها و زیر معیارهای مختص به هر یک و تخصیص هزینه، توجه، زمان و همچنین در اولویت قرار دادن هر یک از آن‌ها برای عملیات مرتبط به تونل‌های معدنی، می‌توان از نتایج حاصل از این پژوهش استفاده نمود و با در اولویت قرار دادن با اهمیت‌ترین معیارها از هدر رفت سرمایه، تجهیزات، نیروی انسانی، زمان و ... اجتناب کرد. در نتیجه بهره‌وری بهتر فرآیند با استفاده از تکنولوژی اینترنت اشیا نسبت به روش‌های سنتی مورد انتظار می‌باشد.

برای بهبود و ایجاد یک خط مشی برای پژوهش‌های آینده، در پایان هر پژوهش، پیشنهادهای مطرح می‌گردد. پیشنهادهای این پژوهش مطابق زیر می‌باشند:

۱- تعیین گزینه‌هایی برای پژوهش و رتبه بندی آن‌ها با استفاده از معیارها و زیر معیارهای رتبه بندی شده در این پژوهش می‌تواند صورت گیرد.

۲- استفاده از چندین روش تصمیم‌گیری چند معیاره جهت وزن دهی معیارها و در نهایت ادغام و مقایسه آن‌ها می‌تواند در بهبود کارآمدی و افزایش قابلیت اطمینان نتایج موثر واقع شود.

۳- شناسایی و بررسی چالش‌ها، مزایا و معایب استفاده از تکنولوژی اینترنت اشیا در حوزه حفر، بهره برداری و نگهداشت تونل‌ها به جای کاربردهای آن و رتبه بندی آن‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره نیز می‌تواند مفید واقع شود.

۶- منابع

1. Banica, L., Burtescu, E., & Enescu, F. (2017). The impact of internet-of-things in higher education. *Scientific Bulletin-Economic Sciences*, 16(1), 53-59.
2. Francisti, J., Balogh, Z., Reichel, J., Magdin, M., Koprda, Š., & Molnár, G. (2020). Application experiences using IoT devices in education. *Applied Sciences*, 10(20). <https://doi.org/10.3390/app10207286>
3. Čolaković, A., & Hadžialić, M. (2018). Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. *Computer Networks*, 144, 17-39. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.017>
4. Kahlert, M. (2016). Understanding customer acceptance of Internet of Things services in retailing: An empirical study about the moderating effect of degree of technological autonomy and shopping motivations. In.

5. Akyildiz, I. F., & Jornet, J. M. (2010). The Internet of nano-things. *IEEE Wireless Communications*, 17, 58–63.
6. Orosz, B., Kovács, C., Karuović, D., Molnár, G., Major, L., Vass, V., Szűts, Z., & Námesztovszki, Z. (2019). Digital education in digital cooperative environments. *Journal of Applied Technical and Educational Sciences*, 9(4), 55-69. <https://doi.org/10.24368/jates.v9i4.149>
7. Asseo, I., Johnson, M., Nilsson, B., Chalapathy, N., & Costello, T. J. (2016). The Internet of things: Riding the wave in higher education. *EDUCAUSE Review*, 51, 11-33.
8. Ramazani, R., & Mo'oudi Sefat, M. R. (2021). Ranking the threats of the Internet of Things in military environments. *National Security Scientific Journal*, 11(39), 199-228.
9. Zandieh, H., & Gerami, M. (2020). The impact of the Internet of Things on the innovation process and services in organizations. *Information and Communication Technology in Police*, 1(1), 49-66.
10. Ghanbarnejad, M., Rostgari Pour, H., Saleh, S., & Delrooz, K. (2019). Analytical study of the Internet of Things in learning environments: Applications, requirements, and challenges from the perspective of experts. *Educational Technology and Learning*, 3(9), 1-22.
11. Bahrami Zenooz, P., Faqihi, M., & Alborzi, M. (2019). Identification and prioritization of effective factors on the application of the Internet of Things in open government. *Public Policy Journal in Management*, 11(37), 16-25.
12. Ronaghi, M. H., & Hosseini, F. (2018). Identifying and ranking IoT services in the health domain. *Health Management Journal*, 21(73), 106-117.
13. Mircea, M., Stoica, M., & Ghilic-Micu, B. (2021). Investigating the impact of the Internet of Things in higher education environment. *IEEE Access*, 9, 33396-33409. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060964>
14. Abed, S., Alyahya, N., & Altameem, A. (2020). IoT in education: Its impacts and its future in Saudi universities and educational environments. In *The Internet of Things in the Digital Economy* (pp. 47-62). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0029-9_5
15. Majeed, A., & Ali, M. (2018). How Internet-of-Things (IoT) is making university campuses smart? QA higher education (QAHE) perspective. In *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)* (pp. 1-6).
16. Mohammadzadeh, A. K., Ghafoori, S., Mohammadian, A., Mohammadkazemi, R., Mahbanooei, B., & Ghasemi, R. (2018). A fuzzy analytic network process (FANP) approach for prioritizing Internet of Things challenges in Iran. *Technology in Society*, 53, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.01.007>
17. Verma, P., & Sood, S. (2017). Internet of Things-based student performance evaluation framework. *Behaviour & Information Technology*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2017.1407824>
18. Ganesh, B., Loganathan, S., Thiyaku, T., Venkatesh, T., & Thiagarajan, T. (2024). Design of a wireless underground sensor network for tunnel rescuing. DOI: [10.1109/accai61061.2024.10602252](https://doi.org/10.1109/accai61061.2024.10602252).

19. Zhou, C., Damiano, N., Whisner, B., & Reyes, M. (2017). Industrial Internet of Things (IIoT) applications in underground coal mines. *Mining Engineering*, 69(12), 50–56. <https://doi.org/10.19150/me.7919>
20. Dargahi, M., & Rostamabadi, S. (2019). Stability analysis and design of tunnel maintenance systems for the Behesht Abad diversion dam. *Tunnel Journal*, 36, 19-31.
21. Pourhashemi, S. M., Sadat, M., & Tarem, M. (2018). Evaluation of the safety risk management model in the construction of traffic tunnels in Tehran: A case study of the Arash-Esfandiar-Niyayesh tunnel. *Tunnel Journal*, 35, 27-39.
22. Fattahi, R., Naderi, M. R., & Seyedi, E. (2024). Evaluating scenarios for the management of construction debris caused by an earthquake (case study of Tehran). *Journal of Urban Management and Environmental Engineering*, 1(4), 49-66.
23. Padash, A., Vahidi, H., Nematollahi, H., & Fattahi, R. (2020). Analyzing and evaluating industrial ecology development model in Iran.
24. Nejad, F. L., Zadeh, H. R., Fattahi, R., & Vahidi, H. (2013). Assessment and strategic planning for indoor and outdoor sports with the application of SWOT analysis and AHP in fuzzy environment.
25. Alizadeh, S. M., Hadji, M. S. M., & Fattahi, R. (2016). A model for measurement and calculation of waste in production flow layout using fuzzy logic.
۲۶. فتاحی، رضا، نادری، محمدرضا، سیدی، احسان. بررسی سناریوهای مدیریت نخاله‌های ساختمانی ناشی از زلزله (مطالعه موردی شهر تهران)، *فصلنامه علمی مدیریت محیط زیست شهری*، ۱۴۰۲؛ ۱ (۴): ۴۹-۶۶. [doi: 10.48306/jumee.2024.436541.1031](https://doi.org/10.48306/jumee.2024.436541.1031)
27. Fattahi, R., Tavakkoli-Moghaddam, R., Khalilzadeh, M., Shahsavari-Pour, N., & Soltani, R. (2021). Risk assessment by a new FMEA model based on an extended AHP method under a fuzzy environment. *Environmental Energy and Economic Research*, 5(4), 1-14.
28. Padash, A., Vahidi, H., Fattahi, R., & Nematollahi, H. (2021). Analyzing and evaluating industrial ecology development model in Iran using FAHP-DPSIR. *International Journal of Environmental Research*, 15(4), 615-629.
29. Padash, A., Fattahi, R., & Vahidi, H. (2024). A novel hybrid risk assessment approach under fuzzy environment in the steel industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108655.
30. Seiti, H., Hafezalkotob, A., & Fattahi, R. (2018). Extending a pessimistic–optimistic fuzzy information axiom-based approach considering acceptable risk: Application in the selection of maintenance strategy. *Applied Soft Computing*, 67, 895-909.
31. Fattahi, R., Tavakkoli-Moghaddam, R., Khalilzadeh, M., Shahsavari-Pour, N., & Soltani, R. (2020). A novel FMEA model based on fuzzy multiple-criteria decision-making methods for risk assessment. *Journal of Enterprise Information Management*, 33(5), 881-904.
32. Fattahi, R., & Khalilzadeh, M. (2018). Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. *Safety Science*, 102, 290-300.