مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲-۳۷، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۴۳-۱۵۱، (یادداشت فنی)

Research Note

سامانه‌ی هشداردهنده‌ی وضعیت‌های مجاورتی خطرناک در کارگاه‌های ساختمانی بر پایه‌ی رهگیری افراد و تجهیزات

یعقوب علیپوری * **(استادیار)**
سید محمدحسین شریفی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
حمیدرضا عباسیان جهرمی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

صنعت ساخت‌وساز و کارگاه‌های ساختمانی به عنوان یکی از پرحادثه‌ترین صنایع در جهان شناخته می‌شود که این امر باعث شده تا توجه پژوهشگران نسبت به استفاده از فنّاوری‌های جدیدی همچون فنّاوری اینترنت اشیاء برای بهبود شرایط ایمنی جلب شود. در این پژوهش، با استفاده از تلفن هوشمند همراه و بهره‌گیری از روش اثر انگشت روی شبکه‌ی وای‌فای و سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی (جی‌پی‌اس) سامانه‌یی معرفی شده است که با رهگیری افراد، نزدیک شدن آن‌ها را به نقاط خطرناک موجود در کارگاه ساختمانی شناسایی می‌کند و هشدارهای لازم را ارائه می‌دهد. این سامانه، علاوه بر کارکردن در مناطق سرپوشیده و روباز، نقاط قوت دیگری چون سادگی کارکرد، قیمت پایین پیاده‌سازی و دقت بالاتر نسبت به نمونه‌های مشابه را دارد. در این پژوهش به متوسط خطای تشخیص ۱/۲ متر دست یافته‌ایم که خطای قابل قبولی است و نشان از عملکرد صحیح سامانه دارد.

واژگان کلیدی: ایمنی، کارگاه ساختمانی، اینترنت اشیاء، روش اثر انگشت، جی‌پی‌اس.

y.alipouri@kntu.ac.ir
mhsharifi@email.kntu.ac.ir
habasian@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

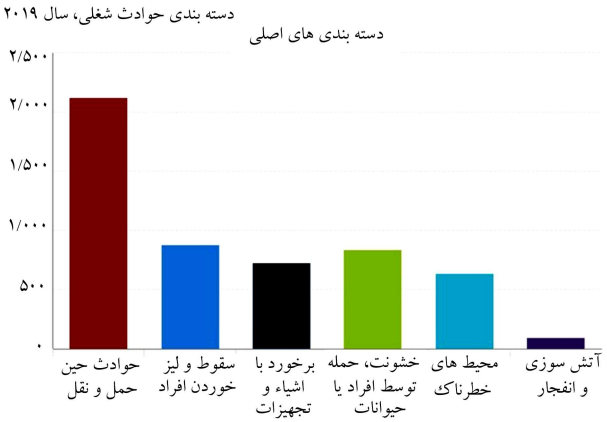
کارگاه‌های ساختمانی امروزه در مقایسه با کارگاه‌های سایر صنایع یکی از خطرناک‌ترین کارگاه‌ها از حیث حوادث کارگاهی شناخته می‌شوند؛ به گونه‌یی که آمار حوادث منتشر شده نشان از سطح پایین ایمنی در این صنعت دارد. در سال ۲۰۱۸ طبق گزارش سازمان ایمنی و سلامت کار ایالات متحده[1] ۱۰۰۸ کارگر بر اثر حوادث به وجود آمده در کارگاه‌های عمرانی جان سپرده‌اند[2] و طبق آمارهای سازمان پزشکی قانونی کشور[1] از سال ۹۰ تا ۹۳ حدود ۳۶۰۰ نفر بر اثر حوادث کارگاه‌های ساختمانی کشورمان جان خود را از دست داده‌اند که تقریباً نیمی از کل تلفات جانی ناشی از حوادث کارگاهی کشور را شامل می‌شود.[3] این آمار بالای حوادث و تلفات جانی نشان از اهمیت موضوع ایمنی در کارگاه‌های ساختمانی و عمرانی دارد.

تمرکز این پژوهش بر مسئله‌ی بهبود ایمنی کارگاه‌های ساختمانی با کاهش حضور افراد و کارگران در نقاط مجاورتی خطرناک است. در شکل ۱ که نشان‌دهنده‌ی آمار دسته‌بندی شده‌ی حوادث کاری ایالات متحده در سال ۲۰۱۹ است، نشان داده شده که حدود ۴۰ درصد از این حوادث کاری ناشی از بروز وضعیت‌های مجاورتی خطرناک است.[2] در این پژوهش نقاط مجاورتی خطرناک به تمامی محل‌هایی که امکان بروز خطر در آن‌ها وجود دارد مانند پرتگاه‌ها، شعاع کاری تجهیزات، انبار مواد آتش‌زا و غیره اطلاق می‌شود.

روش‌های سنتی جلوگیری از حوادث و پایش وضعیت ایمنی کارگاه‌ها عمدتاً مبتنی بر استفاده از دستورالعمل‌های کلی، چک لیست‌ها، نیروی انسانی حاضر در کارگاه و آموزش به افراد بوده که برای محیط‌های پویایی چون کارگاه‌های ساختمانی مناسب نیستند. امروزه، استفاده از فنّاوری‌های نوینی مانند فنّاوری اینترنت اشیاء، پردازش تصویر، هوش مصنوعی و ... برای استفاده در زمینه‌های مختلف از جمله ایمنی کارگاه‌های ساختمانی مطرح شده است. در پژوهش پیش رو به بررسی استفاده از فنّاوری اینترنت اشیاء و معرفی سامانه‌یی جهت بهبود ایمنی کارگاه‌های ساختمانی پرداخته‌ایم. فنّاوری اینترنت اشیاء بستری را فراهم می‌آورد که اشیاء مختلف با کمک پروتکل‌های ارتباطی، ازجمله شبکه‌های مخابراتی و رایانه‌یی (گسترده یا محدود)، به یکدیگر یا به سرورهای ابری یا غیره متصل می‌شوند که امکان تعامل با کاربران، ارسال و دریافت داده‌ها، کنترل از راه دور و ارتباط با سایر دستگاه‌ها را ممکن می‌سازد.

اتحادیه‌ی بین‌المللی مخابرات اینترنت اشیاء را این گونه تعریف می‌کند: «زیرساختی جهانی برای جامعه‌ی اطلاعاتی که براساس فناوری‌های ارتباطی و اطلاعاتی دارای قابلیت تعامل‌پذیری از قبل موجود و رو به رشد از طریق اتصال (فیزیکی و مجازی)

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۷/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۱/۴، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۹.
DOI:10.24200/J30.2021.56794.2857



شکل ۱. دسته‌بندی حوادث شغلی ایالات متحده در سال (۲۰۱۹).[۲]

اشیاء، خدمات پیشرفته‌یی را ممکن می‌سازد.[۳] در این تعریف «شی» به هر موجود فیزیکی یا مجازی اطلاق می‌شود که هویتی مستقل داشته باشد.

در این پژوهش سعی شد تا سامانه‌یی طراحی و ارائه شود که با استفاده از تلفن هوشمند همراه، وضعیت‌های مجاورتی خطرناک در کارگاه‌های ساختمانی را تشخیص دهد و از بروز حادثه جلوگیری کند. این سامانه شامل سه نرم‌افزار است: یکی از آن‌ها وظیفه‌ی انجام محاسبات در سرور ابری را دارد، دیگری روی تلفن همراه مدیران کارگاه نصب می‌شود تا اطلاعات لازم را در پایگاه داده‌ی سامانه ثبت کند و نرم‌افزار سوم بر تلفن همراه کارگران نصب می‌شود؛ کارگران موظف به رهگیری سامانه و دریافت هشدارهای صادره از سامانه هستند.

یکی از اهداف سامانه‌ی معرفی شده در این پژوهش کارکرد ساده آن در فضاهای سربسته و روباز و رهگیری بدون درز است که با استفاده از ترکیب روش اثر انگشت و استفاده از سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی (جی‌پی‌اس)، برای تحقق این هدف تلاش می‌شود. هدف بعدی این سامانه کاهش قیمت تمام شده‌ی آن در مقایسه با سایر سامانه‌ها و پژوهش‌های موجود است؛ زیرا این موضوع بر فراگیری استفاده از سامانه‌های تشخیص و هشدار خطر اثرگذار است و می‌تواند موجب عدم استفاده از آن شود.

هدف دیگری که این پژوهش به دنبال رسیدن به آن است، تسهیل کار با سامانه است. این موضوع از آنجا مورد توجه است که در صنعت ساخت افراد شامل طیف‌های گوناگونی می‌شوند و قاعدتاً سطح آشنایی آن‌ها با فنّاوری‌ها، ابزارهای جدید و استفاده از تجهیزات رایانه‌یی یکسان نیست؛ پس لازم است طراحی و اجرای سامانه طوری باشد که استفاده از آن برای اکثریت افراد جامعه‌ی هدف مناسب و کاربردی باشد. در نهایت، هدف نهایی سامانه برخوردار بودن از دقت کافی در تشخیص و صدور هشدار است تا برای کار در کارگاه‌های ساختمانی و بهبود شرایط ایمنی آن‌ها مفید واقع شود.

۲. مرور بر ادبیات

۱.۲. استفاده از اینترنت اشیا در ایمنی کارگاه

از اولین سال‌های توسعه‌ی مفهوم اینترنت اشیاء، این فنّاوری در جهت بهبود ایمنی کارگاه میان پژوهشگران مطرح شد. از جمله می‌توان به استفاده از شناسه‌های رهگیری[۴] RFID، استفاده از حسگرهای مجاورت، شبکه کردن دستگاه‌های مختلف با استفاده از GPRS و WSN و ... در کارگاه‌های ساختمانی بزرگ اشاره کرد. در این مسیر

جدول ۱. تقسیم‌بندی خطرات کارگاهی و حسگرهای مورد نیاز برای تشخیص آنها.[۴]

نوع خطر کارگاهی	شاخص	فناوری حسگر
سقوط از ارتفاع	حالت بدن و مکان	شتاب‌سنج و میدان مغناطیسی
سرخوردن	حالت، سرعت و جهت بدن	شتاب‌سنج
اضطراب	ضربان قلب، فشار خون و...	رادار، مادون قرمز و ...
گرما یا سرما	دمای بدن	دماسنج
آتش و انفجار	دود و شعله	حسگر صدا
سروصدا	سطح صدا	RFID, UWD*، رادار، بلوتوث
گیر افتادن	مجاورت با اشیاء	RFID,UWD، رادار، بلوتوث
برق گرفتگی	مجاورت و مکان	RFID,UWD، رادار، بلوتوث
ریختن آوار	مکان	جی‌پی‌اس، RFID,UDW

* حسگر فوق پهن باند (Ultra Wide Band)

حسگرهایی که بیشتر مورد علاقه‌ی پژوهشگران این حوزه بوده است عبارت‌اند از: شناسه‌های RFID، حسگرهای مادون قرمز، حسگرهای مجاورت، آنتن‌های جهتی، حسگرهای اولتراسونیک.

در پژوهش الوسی و همکاران[۴]، استفاده از فنّاوری اینترنت اشیاء در ایمنی کارگاه به ۴ زیرموضوع تقسیم می‌شود: پایش وضعیت روحی، تشخیص محیط کارگاه، تشخیص مجاورت و رهگیری موقعیت مکانی. در جدول ۱، خطرات کارگاه براین اساس تقسیم‌بندی و حسگرهای مورد نیاز سامانه‌های ایمنی برای تشخیص هریک از آنها بررسی می‌شود.[۴] در سال‌های اخیر این مطالعات به سمت هوشمندسازی هشدارها و تصمیم‌ها، در لحظه کردن تصمیمات، وسایل حفاظتی پوشیدنی هوشمند[۶]، ترکیب حسگرهای متنوع[۷و۸]، شناسایی و دنبال کردن ماشین‌آلات و افراد[۹] و استفاده از پردازش ابری[۸] رفته است.

۲.۲. رهگیری با استفاده از شبکه‌های ارتباطی بیسیم

شبکه‌های بیسیم امروزه به وفور در دستگاه‌های مختلف، از جمله تلفن‌های همراه، کاربرد دارند؛ می‌توان شبکه‌های تلفن همراه جی‌اس‌ام (GSM) و شبکه‌ی ارتباطی وای‌فای (WIFI) را پراستفاده‌ترین این شبکه‌ها نامید. از چندین سال پیش استفاده از قدرت و خصوصیات سیگنال این شبکه‌ها و استفاده از تفاوت آن‌ها در مکان‌های مختلف، به عنوان یک مشخصه و روش رهگیری مطرح شد که این ایده با توجه به این که می‌توانست نیاز به حسگرهای مکان‌یابی را کاهش دهد و توان مصرفی باتری کمتری را به ارمغان آورد، مورد توجه قرار گرفت. برای انجام این ایده‌ی کلی پژوهشگران این حوزه روش‌هایی را توسعه داده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره شده و همچنین چالش‌ها و ضعف‌های اصلی آن‌ها بیان می‌شود.

۳.۲. رهگیری با استفاده از تلفن‌های همراه هوشمند و شبکه‌های تلفن همراه

امروزه باتوجه به فراگیر شدن استفاده از تلفن‌های همراه هوشمند، نظر پژوهشگران نسبت به استفاده از امکانات متنوع این دستگاه‌ها بیش از پیش جلب شده است. در بعضی از پژوهش‌ها از این دستگاه‌ها و حسگرها و فنّاوری‌های متنوع آنان چون حسگر جی‌پی‌اس، شبکه‌های تلفن همراه و ... در جهت موقعیت‌یابی و رهگیری افراد و تجهیزات به خصوص در کارگاه‌های بزرگ و فضاهای باز استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش تانگ و همکاران[۱۰] اشاره کرد. در

این پژوهش از اینترنت و جی‌پی‌اس تلفن همراه هوشمند کارگران و رایانش ابری برای رهگیری افراد و تولید و ارسال دستورالعمل‌های شخصی ایمنی استفاده شده است. این سامانه برای مورد مطالعاتی شرکت راه‌آهن چین ـ لائوژو توسعه داده شده است که ضوابط مدنظرشان عبارت بوده است از: اطلاعات قابل اطمینان، محاسبه‌ی سریع، ارسال در لحظه‌ی دستورالعمل‌ها، کمترین هزینه و راحتی کار با سامانه. در پژوهش تانگ و همکاران[۱۰] تلفن همراه هوشمند به این دلیل انتخاب شد که هم جی‌پی‌اس دارد (دقت حدود ۲۰ متر که طی این پژوهش و در منطقه‌ی مورد آزمایش آنها به دست آمده و برای اهداف این پژوهش کافی بوده است)، هم در میان کارگران فراگیر است و هم هزینه‌ی سخت‌افزاری را کاهش می‌دهد.[۱۰] در اینجا باید توجه داشت که گرچه این سامانه با سخت‌افزارهایی به نسبت کم هزینه و کاربرپسند دستورالعمل‌های ایمنی شخصی‌سازی شده را تولید و به کارگران و مدیران ارسال می‌کند، به دلیل محدودیت‌های سخت‌افزاری، در محیط‌های پویایی که مثلاً ماشین‌آلات زیادی دارند می‌تواند عملکرد خوبی داشته باشد.

نوع دیگری از کاربرد تلفن‌های همراه هوشمند به عنوان وسیله‌ی رهگیری، استفاده از شبکه‌های بیسیم مخابراتی مانند شبکه‌ی وای‌فای و شبکه‌ی جی‌اس‌ام تلفن همراه به عنوان بستری برای مکان‌یابی است. برای بهره‌گیری از این ابزارها که در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است، از روش‌های توسعه‌یافته بر امواج رادیویی، مانند روش اثرانگشت و نرم‌افزارهایی روی تلفن‌همراه و سرور برخط (آنلاین) استفاده می‌شود تا مکان کاربر را تخمین زده و به اطلاع سرور برسانند. در روش اثرانگشت که در بخش‌های بعدی بیشتر بدان می‌پردازیم، ابتدا در فاز آفلاین داده‌های قدرت سیگنال‌های دریافتی از فرستنده‌های مختلف در نقاط جغرافیایی با مختصات مشخص (نقاط مبنا)، در پایگاه داده ثبت می‌شود. این پایگاه داده به اصطلاح اثر انگشت رادیویی نقاط خوانده می‌شود. سپس در فاز آنلاین، هنگامی که هدف تعیین موقعیت نامعلوم کاربر است؛ سامانه با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی و مقایسه‌ی قدرت سیگنال‌های دریافتی نقطه‌ی مجهول با اثرانگشت نقاط معلوم، مکان کاربر را تخمین می‌زند.

از قدیمی‌ترین پژوهش‌هایی که از روش اثر انگشت روی شبکه‌های وای‌فای استفاده کرده‌اند می‌توان به پژوهش اسموند و رتشر در سال ۲۰۰۷ میلادی اشاره کرد که در آزمایش آن به میزان خطایی در حدود ۳ تا ۵ متر دست یافته‌اند.[۱۱] از دیگر پژوهش‌هایی که اخیراً در این زمینه انجام شده است می‌توان به پایان‌نامه‌ی فریدنیا[۱۲] که از این روش و الگوریتم محاسباتی کا ـ نزدیکترین همسایگی[۵] روی شبکه‌های موبایلی GSM برای موقعیت‌یابی کاربران استفاده کرده، اشاره کرد که در محیط باز شهری با سه آنتن فرستنده آزمایش شده است و دقتی در حد ۱۱ متر را به ثبت رسانده است.[۱۲] همچنین، پایان‌نامه‌ی خلفی[۱۳] از این روش و الگوریتم محاسباتی کا ـ نزدیکترین همسایگی روی شبکه‌ی وای‌فای برای مکان‌یابی محیط‌های سربسته بهره برده است که دقت آن نیز در حد ۱ متر گزارش شده است. از دیگر نوآوری‌های استفاده شده توسط این پژوهشگر می‌توان به استفاده از میانگین‌گیری داده‌های برداشت شده‌ی نقاط (هر نقطه ۱۵ برداشت)، برداشت داده‌های فاز آنلاین در ساعات مختلف روز و انجام کلیه محاسبات در سرور مرکزی اشاره کرد.[۱۳] دیگر پژوهشی که در این زمینه می‌توان بدان اشاره کرد، پایان‌نامه‌ی احسانی چیمه[۱۴] است که در آن از فنّاوری یادگیری ماشین به همراه روش اثر انگشت برای موقعیت‌یابی کاربران در فضای سرپوشیده با استفاده از شبکه‌ی وای‌فای استفاده شده است تا با استفاده از یادگیری ماشین بتوان دقت رهگیری را افزایش داد.[۱۵]

یکی از مباحثی که درمورد شیوه‌های رهگیری مختلف مورد بحث بوده است، استفاده از روش‌های رهگیری ترکیبی با استفاده از دو یا چند روش برای ایجاد یک سامانه‌ی رهگیری بدون درز (فضای باز و سرپوشیده با هم) است که مورد نظر پژوهش حاضر نیز هست. از این دست پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش یان و همکاران[۱۶][۶] اشاره کرد که در آن رهگیری مبتنی بر شبکه‌ی وای‌فای صورت گرفته است و از سامانه‌ی جی‌پی‌اس به عنوان سامانه‌یی کمکی بهره برده شده است. این پژوهش به ترکیب این دو روش مکان‌یابی می‌پردازد تا با استفاده از مزایای آنها بتواند نقاط ضعفشان، مثلاً در دسترس نبودن شبکه‌ی وای‌فای برای مکان‌یابی فضای باز و خطای بالای سامانه‌ی جی‌پی‌اس برای رهگیری در فضای بسته را بپوشاند.[۱۷] پژوهش یان و همکاران شرایط موقعیت‌یابی کاربر را به سه دسته‌ی فضای باز، شرایط مرزی و فضای بسته تقسیم می‌کند و از لحاظ دریافت سیگنال، شرایط را به چهار دسته ۱. فقط دریافت سیگنال جی‌پی‌اس، ۲. دریافت سیگنال ضعیف جی‌پی‌اس و سیگنال وای‌فای؛ ۳. دریافت سیگنال قوی جی‌پی‌اس و سیگنال وای‌فای؛ ۴. فقط دریافت سیگنال وای‌فای تقسیم می‌کند که برای رویارویی با هرکدام از این شرایط یک استراتژی تبدیل (سوییچ) در نظر گرفته می‌شود. برای هریک از این شرایط دریافت سیگنال از الگوریتم‌های مکان‌یابی متفاوتی استفاده می‌شود که به ترتیب عبارت‌اند از: حداقل مربعات[۷]، فیلتر کالمن[۸]، فیلتر کالمن فدرال[۹]، حداقل مربعات یا فیلتر کالمن. از آنجا که در مکان‌یابی با استفاده از شبکه‌های وای‌فای از روش اثرانگشت استفاده می‌شود، ابتدا باید پایگاه داده‌ی مورد نیاز این روش تهیه شود.[۱۵]

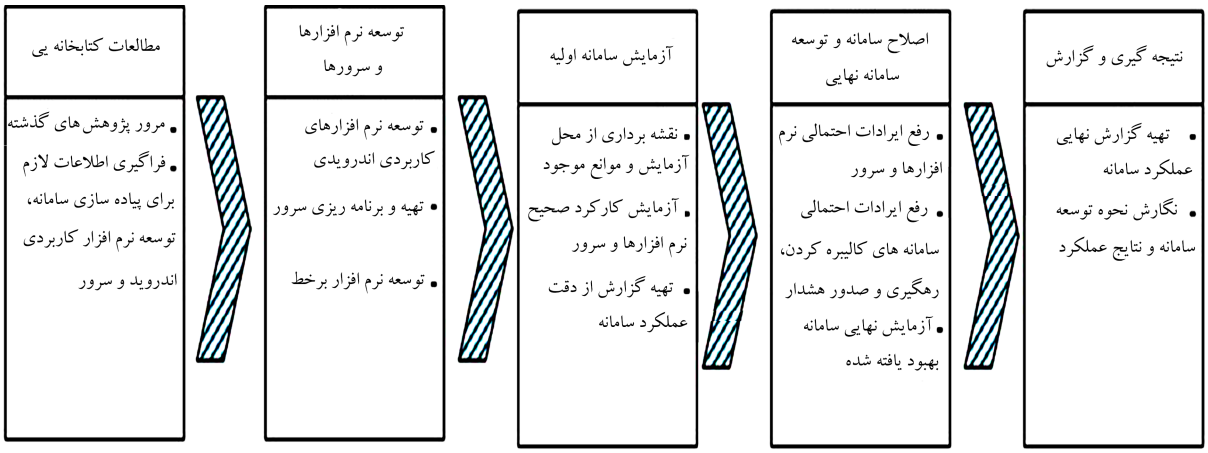
در شرایطی که مورد تمرکز یان و همکاران در این پژوهش است (دریافت هر دو سیگنال جی‌پی‌اس و وای‌فای) ابتدا اطلاعات هر دو روش با استفاده از فرمولی ابداعی به یک مقدار عددی تبدیل می‌شود و سپس فیلتر کالمن بر روی آن اعمال می‌شود. در این راه از GDOP سامانه‌ی جی‌پی‌اس و قدرت سیگنال شبکه‌های وای‌فای استفاده می‌شود. برای استراتژی تعویض بین روش‌های رهگیری از تعداد نقاط دسترسی شبکه‌ی وای‌فای، تعداد ماهواره در دسترس جی‌پی‌اس، GDOP و شرایط محیطی استفاده می‌شود تا بهترین نتیجه حاصل شود.[۱۵]

۴.۲. معماری سامانه‌های مورد استفاده

سامانه‌های مورد استفاده برای تشخیص خطر و صدور هشدار از معماری‌های چندلایه برخوردارند که به آنها امکان شناسایی و دریافت اطلاعات، تحلیل اطلاعات و دستور اقدام لازم را می‌دهد. اکثر پژوهش‌ها از معماری کلی سه لایه برخوردارند مانند پژوهش ژو و دینگ[۸] که این سه لایه شامل لایه‌ی حسگرها، لایه‌ی انتقال پیام‌ها و ارتباط و لایه‌ی تحلیل، پردازش و تصمیم‌گیری است. اما در بعضی پژوهش‌ها مانند پژوهش دینگ و همکاران[۱۶] که دارای سامانه‌یی با معماری چهارلایه است، معماری سامانه‌ها به لایه‌های بیشتر و کوچکتر تقسیم می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش پیش رو با استفاده از روش مطالعات کتابخانه‌یی در بخش جمع‌آوری اطلاعات و استفاده از روش میدانی ـ آزمایشگاهی در بخش اجرا و ساخت سامانه، نرم‌افزارها و آزمایش آن‌ها سعی در اجرای طرح معرفی شده دارد. روند اجرای این پژوهش در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. روند اجرای پژوهش.

۴. سامانه‌ی پیشنهادی پژوهش

در این بخش سامانه‌ی پیشنهاد شده در این پژوهش و نحوه‌ی پیاده‌سازی آن تشریح می‌شود. همانگونه که در بخش‌های پیشین ذکر شد، سامانه‌ی معرفی شده در این پژوهش شامل سه بخش اصلی است: نرم‌افزار کاربردی مدیریت کارگاه، نرم‌افزار کاربردی کارگران و نرم‌افزار سرور ابری که کار محاسبات و پایگاه داده را انجام می‌دهد. اجرای هریک از این بخش‌های اصلی خود شامل انجام اموری است که در این بخش تشریح می‌شود.

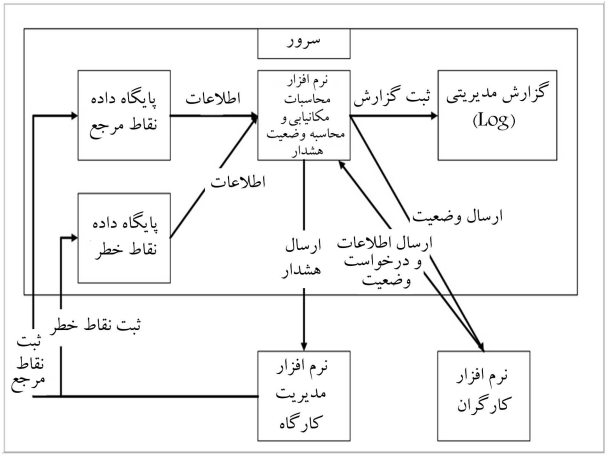
۱.۴. معرفی روش کار سامانه‌ی ارائه شده در پژوهش

چنان که در بخش‌های قبل خلاصه‌وار ذکر شد، سامانه‌ی ارائه شده در این پژوهش از دو شیوه‌ی مکان‌یابی جی‌پی‌اس و روش اثر انگشت بر روی شبکه‌ی وای‌فای استفاده می‌کند تا بتواند مکان‌یابی یکپارچه در فضاهای سربسته و روباز را ایجاد کند. این سامانه از مکان‌یابی استفاده می‌کند تا در صورت نزدیکی افراد به نقاط خطرناک از پیش تعیین شده، هشدار لازم را صادر کند و مانع بروز حادثه شود.

سامانه از دو پایگاه داده بهره می‌گیرد که بر روی سرور قرار می‌گیرند. یکی از آنها اطلاعات نقاط مرجع مورد نیاز روش اثر انگشت را ذخیره می‌کند و دیگری اطلاعات موقعیتی نقاط خطر را نگه می‌دارد. چنان که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، در روش اثر انگشت برای شناسایی مکان کاربر از تفاوت قدرت سیگنال شبکه‌های بیسیم استفاده می‌شود. این روش از یک سری نقاط مرجع بهره می‌برد که در ابتدای کار (فاز غیر برخط یا آفلاین) مشخصات سیگنال دریافتی و مختصات آن‌ها در پایگاه داده ثبت می‌شود و در فاز برخط مکان‌یابی، با استفاده از الگوریتم‌هایی چون نزدیکترین همسایگی، براساس اطلاعات دریافتی از کاربر و اطلاعات پایگاه داده‌ی نقاط مرجع، مکان کاربر تخمین زده می‌شود. سامانه از ۲ نرم‌افزار کاربردی اندرویدی که بر تلفن همراه هوشمند کارگران و مدیران کارگاه نصب می‌شود و ۱ نرم‌افزار سوم که به منظور پردازش و محاسبات روی سرور قرار می‌گیرد، تشکیل شده است (شکل ۳).

هر دو نرم‌افزار کاربردی اندرویدی که روی تلفن همراه هوشمند نصب می‌شوند، دسترسی‌های زیر را از کاربر درخواست می‌کنند:

- دسترسی به اینترنت
- دسترسی به جی‌پی‌اس (مکان دقیق)



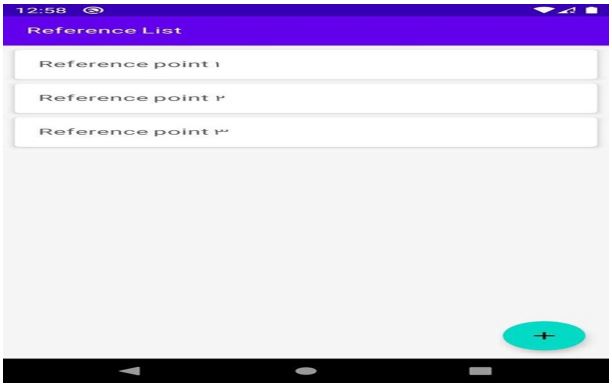
شکل ۳. اجزای مختلف سامانه.

- دسترسی به اطلاعات شبکه‌ی تلفن همراه
- دسترسی به اطلاعات وای‌فای
- دسترسی به ارسال و نمایش پیام اعلان

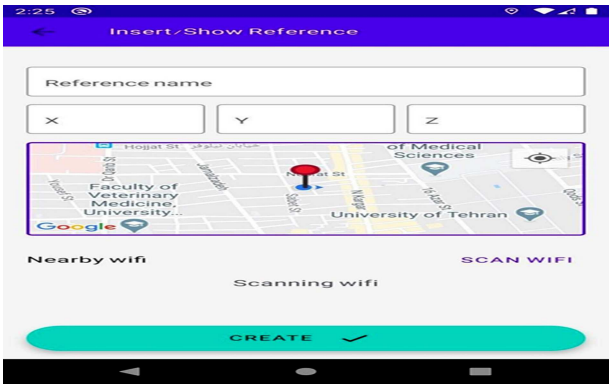
۲.۴. نرم‌افزار مدیران کارگاه

این نرم‌افزار کاربردی اندرویدی که روی سیستم عامل اندروید تلفن همراه هوشمند مدیران کارگاه قرار می‌گیرد، چنان که در بخش قبل معرفی شد (شکل ۳)، وظیفه‌ی ثبت نقاط مرجع و نقاط خطر را دارد و با استفاده از نرم‌افزار اندروید استودیو و زبان برنامه‌نویسی جاوا توسعه داده شده است. شکل ۴ رابط کاربری این نرم‌افزار را نشان می‌دهد که در اینجا لیست نقاط مرجع ثبت شده در نرم‌افزار مدیران کارگاه قابل مشاهده است.

روش عملکرد ثبت نقاط مرجع این نرم‌افزار بدین گونه است که ابتدا مدیر ایمنی کارگاه بر روی دکمه ثبت نقطه مرجع ضربه می‌زند. سپس، نرم‌افزار اطلاعات مورد نیاز نقاط مرجع شامل نام، مختصات محلی نقطه در کارگاه، مشخصات (آدرس مک برای وای‌فای و مشخصه‌ی سلول آنتن شبکه تلفن همراه) و قدرت سیگنال شبکه‌های وای‌فای و آنتن‌های تلفن همراه قابل دسترس در آن مکان را ثبت می‌کند. این اطلاعات به سرور ارسال می‌شود و در پایگاه داده‌ی نقاط مرجع ثبت می‌شود و



شکل ۴. لیست نقاط مرجع ثبت شده در نرم‌افزار مدیران کارگاه.



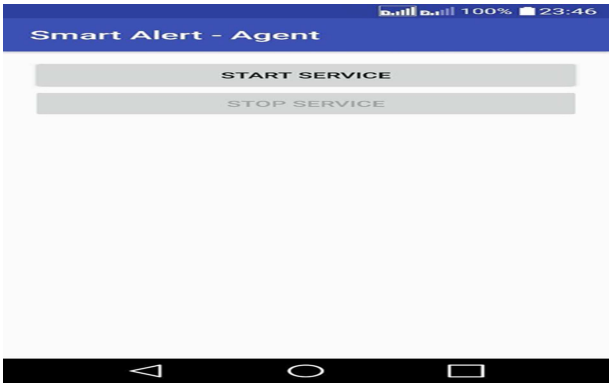
شکل ۵. صفحه ثبت نقاط مرجع در نرم‌افزار مدیران کارگاه.

این عمل باید یک بار برای هر نقطه‌ی مرجع صورت پذیرد. تصویر صفحه‌ی مربوط به این عملکرد در شکل ۵ قابل مشاهده است. روند ثبت نقاط خطر در این نرم‌افزار نیز به صورتی مشابه صورت می‌پذیرد، با این تفاوت که سامانه مختصات دریافتی از جی‌پی‌اس نقطه‌ی خطر را نیز در آن حالت ثبت می‌کند.

۳.۴. نرم‌افزار کارگران

این نرم‌افزار کاربردی اندرویدی روی تلفن همراه کارگران حاضر درکارگاه نصب می‌شود و مطابق شکل ۵، اطلاعات مورد نیاز برای کارکرد سامانه را در لحظه به سرور ارسال می‌کند. این اطلاعات شامل لیست نقاط دسترسی[۱۰] شبکه‌ی وای‌فای در دسترس و قدرت سیگنال هرکدام از آن‌ها، مختصات جی‌پی‌اس کاربر و شاخصه‌ی دقت جی‌پی‌اس[۱۱] است که هر ثانیه یکبار به سرور ارسال می‌شود تا سامانه به‌صورت در لحظه[۱۲] کار کند. شاخصه‌ی دقت جی‌پی‌اس، شاخصی است که توسط سیستم عامل اندروید تعریف شده تا دقت اندازه‌گیری موقعیت کاربر براساس سامانه‌ی جی‌پی‌اس را گزارش کند و واحد اندازه‌گیری آن متر است. تعریف این شاخصه مطابق اسناد تعریف شده در این سیستم عامل به این صورت است: قطر دایره‌یی که احتمال حضور کاربر در آن برابر با ۶۷ درصد باشد. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد نشان از دقت بیشتر مکان‌یابی بر پایه‌ی سامانه‌ی جی‌پی‌اس دارد. کمترین مقدار این شاخص براساس محدودیت‌های تعریف شده بر سیستم عامل اندروید برابر با ۳ متر است و مقدار این شاخص کمتر از ۳ مترگزارش نمی‌شود.

نرم‌افزار کاربردی کارگران دارای رابط کاربری ساده‌یی است که دو دکمه برای شروع به کار و توقف دارد. هرگاه سامانه تشخیص دهد که مکان کاربر نزدیک به نقاط خطر است، هشدار صوتی و متنی روی تلفن همراه کاربر توسط این نرم‌افزار



شکل ۶. تصویر رابط کاربری نرم‌افزار کاربردی کارگران.

ارسال می‌شود. تصویر رابط کاربری این نرم‌افزار در شکل ۶ قابل مشاهده است.

۴.۴. نرم‌افزار انجام محاسبات (سرور ابری)

در واقع، بخش اصلی سامانه‌ی نرم‌افزاری، نرم‌افزار انجام محاسبات است که روی سرور ابری نصب می‌شود و وظیفه‌ی انجام کلیه‌ی محاسبات را دارد. همانطورکه در شکل ۵ مشاهده شد، این بخش از سامانه شامل نرم‌افزار انجام محاسبات و دو پایگاه داده‌ی نقاط مرجع و نقاط خطر است. دو پایگاه داده با زبان برنامه‌نویسی Sqlite تهیه شده که علت استفاده از این زبان برنامه‌نویسی سازگاری آن با زبان‌های مختلف برنامه‌نویسی (از جمله پایتون و جاوا) و سادگی کار با آن است. در ادامه‌ی این بخش، نحوه‌ی محاسبات صورت گرفته و پیاده‌سازی دو پایگاه داده تشریح می‌شود.

الگوریتم روش اثرانگشت بدین صورت است که روی یکی از شبکه‌های مشترک میان کاربر با مکان مجهول و نقاط مرجع ثبت شده در پایگاه داده، تفاضل قدرت سیگنال بین نقاط مرجع و نقطه‌ی مجهول با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$d(j) = RSS - RP(j) \qquad (۱)$$

که در آن RSS قدرت سیگنال کاربر با مکان مجهول و $RP(j)$ میزان قدرت سیگنال نقطه‌ی مرجع j ثبت شده در پایگاه داده‌ی نقاط مرجع است. سپس، نقاط مرجع براساس این مقدار تفاضلی مرتب می‌شود. مکان کاربر، تخمینی براساس مکان نقاط مرجع با کمترین میزان تفاضل قدرت سیگنال است. برای این تخمین روش‌های مختلفی وجود دارد، مانند روش کا ـ نزدیکترین همسایگی وکا ـ نزدیکترین همسایگی وزن‌دار. در روش کا ـ نزدیکترین همسایگی نقاط مرجع براساس کمترین مقدار تفاضل قدرت سیگنال مرتب می‌شوند و سپس تعدادی از آن‌ها (کا) برای میانگین‌گیری مکان مجهول کاربر انتخاب می‌شوند. روش کا ـ نزدیکترین همسایگی وزن‌دار نیز مانند روش کا ـ نزدیکترین همسایگی است با این تفاوت که در آن از میانگین‌گیری وزنی استفاده می‌شود و به نقاط با $d(j)$ کمتر، وزن بیشتری داده می‌شود.

در بیشترِ پژوهش‌های پیشین تعداد نقاطی که برای محاسبه‌ی میانگین استفاده می‌شود (کا) برابر با چهار فرض شده است؛ زیرا در آزمایش‌های صورت گرفته این تعداد خطای متوسط کمتری از خود نشان داده است.[۱۱] در این پژوهش، از روش کا ـ نزدیکترین همسایگی وزن‌دار استفاده شده است که وزن میانگین گیری صورت گرفته از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$wj = \frac{\frac{1}{c(j)}}{\sum \frac{1}{c(j))}, c(j)}, e^{d(j)} \qquad (۲)$$

که در آن $c(j)$ یک متغیر تعریفی برای کاهش خطای میانگین وزنی است و w_j وزن‌های مورد استفاده برای روش کا ـ نزدیکترین همسایگی است. طبق رابطه‌های فوق، مکان کاربر از روابط ۳ تا ۵ به دست خواهد آمد:

$$X_{wknn} = \sum w_j x_j \quad (۳)$$

$$Y_{wknn} = \sum w_j y_j \quad (۴)$$

$$Z_{wknn} = \sum w_j z_j \quad (۵)$$

که در آنها X_{wknn}، Y_{wknn} و Z_{wknn} نشان دهنده‌ی مختصات به دست آمده از روش کا ـ نزدیکترین همسایگی و x_j، y_j و z_j معرف مختصات نقاط مرجع استفاده شده در این فرایند هستند. چنان که مشاهده می‌شود، این روش روی یک شبکه‌ی مشترک (از یک نقطه‌ی دسترسی یا آنتن) میان نقاط مرجع و مکان کاربر عمل می‌کند. اما در این پژوهش از سه شبکه که کاربر در مکان مجهول به آن‌ها دسترسی دارد استفاده شده است.

نحوه‌ی پیاده‌سازی این الگوریتم (الگوریتم استفاده از روش اثر انگشت) در برنامه‌ی محاسبات سرور بدین گونه است که ابتدا از طرف کاربر (نرم‌افزار کارگران) ۳ شبکه‌ی قابل دسترس با بالاترین قدرت سیگنال دریافت می‌شود؛ سپس، بر روی پایگاه داده یک پرس‌وجو (کوئری[۱۳]) گرفته می‌شود تا نقاط مرجعی که شبکه‌ی مشترک با شبکه‌های ارسالی کاربر دارند مشخص شود. بعد از آن، تابع $d(j)$ نقاط را مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌کند و به صورت یک لیست به تابع مرتب‌سازی می‌دهد. تابع مرتب‌سازی لیست $d(j)$ محاسبه شده توسط تابع محاسبه‌ی ارائه شده در رابطه‌ی ۱ را گرفته و به ترتیب به صورت نزولی کمترین $d(j)$ مرتب می‌کند و یک لیست جدید از نقاط مرتب شده را برمی‌گرداند، که شامل ۴ نقطه‌ی مرجع با کمترین $d(j)$ برای هریک از این شبکه‌هاست. سپس، این لیست به تابعی داده می‌شود که تخمین مکان کاربر را براساس روابط ۲ تا ۵ محاسبه می‌کند و برمی‌گرداند. این عمل به ازای هریک از ۳ شبکه‌ی مذکور صورت می‌گیرد و سپس از مکان‌های محاسبه شده توسط این تابع با استفاده از وزن داده شده در رابطه‌ی ۶ میانگین وزنی گرفته می‌شود تا مکان کاربر تخمین زده شود.

$$P_i = ۱ - \frac{RSS(i)}{\sum RSS(i)} \quad (۶)$$

در رابطه‌ی ۶، متغیر $Rss(i)$ نمایانگر قدرت سیگنال دریافتی کاربر از شبکه‌ی قابل دسترس i است و از آنجا که قدرت سیگنال شبکه‌ها به صورت مقادیر منفی گزارش می‌شوند این کسر از عدد ۱ تفریق می‌شود تا وزن محاسبه شده مفهومی صحیح داشته باشد. این رابطه برای اولین بار در پژوهش حاضر در زمینه‌ی به کارگیری روش اثر انگشت تعریف و استفاده شده است.

مکان نهایی به دست آمده از روش اثر انگشت در مرحله‌ی بعد در بخش تشخیص خطر سامانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخش تشخیص خطر سامانه به این گونه عمل می‌کند که ابتدا با توجه به ارتفاع حضورکاربر، نقاط خطر موجود در آن ارتفاع را انتخاب می‌کند (با توجه به خطای ممکن در سامانه‌ی مکان‌یابی، یک متر بالاتر و پایین‌تر از ارتفاع کاربر نیز در نظر گرفته می‌شود). سپس، با استفاده از محاسبه‌ی فاصله‌ی هندسه‌ی اقلیدسی (رابطه ۷ را ببینید)، هرگاه فاصله‌ی مکان کاربر با هریک از نقاط خطری که با توجه به ارتفاع کاربر انتخاب شده، کمتر از ۱ متر باشد، سامانه هشدار می‌دهد و به تلفن همراه کاربر هشدار می‌فرستد.

$$d = \sqrt{(X-x)^۲ + (Y-y)^۲} \quad (۷)$$

در رابطه‌ی ۷ که محاسبه‌ی فاصله‌ی هندسی اقلیدسی را در فضای دوبعدی انجام می‌دهد، X نشانگر طول جغرافیایی نقطه‌ی خطر، x نشانگر طول جغرافیایی مکان کارگر، Y نشانگر عرض جغرافیایی نقطه‌ی خطر و y نیز نشانگر عرض جغرافیایی مکان کارگر است.

نحوه‌ی کارکرد بخش استفاده از جی‌پی‌اس سامانه نیز به این صورت است که در این قسمت تابع توسعه داده شده در پایتون ازکاربر تلفن همراه مختصات و دقت جی‌پی‌اس (Acc) را می‌گیرد. هرگاه دقت دریافت جی‌پی‌اس کاربرکمتر یا مساوی ۳/۵ باشد به این معناست که کاربر در محل روباز حضور دارد و در این‌صورت استفاده از سامانه‌ی جی‌پی‌اس خطای کمی خواهد داشت. اگر شرط دقت دریافت جی‌پی‌اس رعایت شود، مختصات دریافتی کاربر با استفاده از کتابخانه‌ی پایتون geoPy با مختصات نقاط خطر ثبت شده در پایگاه داده مقایسه می‌شود تا فاصله‌ی آنها مشخص شود. چنانچه این فاصله کمتر از ۱ متر باشد، سامانه اعلام هشدار می‌کند و به تلفن همراه کاربر هشدار می‌فرستد. کتابخانه‌ی geoPy یکی ازکتابخانه‌های در دسترس برای پایتون است که برای کار با مختصات دریافتی از جی‌پی‌اس ساخته شده است و از مدل‌های محاسباتی گوناگونی برخوردار است. در این پژوهش از مدل محاسباتی ژئودزیک WGS-۸۴ استفاده شده است که مفروضات آن عبارت‌اند از:

- محور فرعی ۶۳۵۶/۷۵۲۳۱۴۲ کیلومتر
- محور اصلی ۶۳۷۸/۱۳۷ کیلومتر
- ضریب تخت‌شدگی[۱۴] ۱/۲۹۸۲۵۷۲۲۳۵۶۳

خطای محاسبات ژئودزیک با این مدل ۰/۵ درصد است و خطای متوسط فاصله‌یابی در آزمایشی که تنها با فعال بودن سامانه‌ی جی‌پی‌اس در محل انجام آزمایش‌ها صورت پذیرفته، برابر با ۹ درصد است که درکل برای هدف این پژوهش بسیار متناسب است.

۵.۴. ارتباط نرم‌افزارهای تلفن همراه با نرم‌افزار سرور

ارتباط نرم‌افزارکارگران با سرور به این صورت است که پس از شروع به کار، نرم‌افزار هر ۱ ثانیه اطلاعات کاربر را، که پیشتر در بخش ۴-۳ توضیح داده شده است، به صورت یک پیام با پروتکل Http به سرور میفرستد و درخواست پاسخ می‌کند. سرور با استفاده از سرویس فلسک[۱۵] این پیام را دریافت می‌کند و نرم‌افزار محاسبات را با ورودی دریافت شده فرامی‌خواند. در انتها، نرم‌افزار محاسبات یک پاسخ را برمی‌گرداند که این پاسخ یا هشدار است، یا عدم هشدار. پاسخ نرم‌افزار محاسبات نیز با استفاده از سرویس فلسک به نرم‌افزار تلفن همراه ارسال می‌شود. سرویس فلسک یک مجموعه کتابخانه است که بر روی پایتون نصب می‌شود و با ایجاد چارچوب وب وظیفه‌ی ارتباط اینترنتی با سایر سرویس‌ها، مانند دریافت اطلاعات ازکاربر، اجرای فرامین، ذخیره اطلاعات و ... را انجام می‌دهد.

۵. آزمایش سامانه‌ی پیشنهادی و تحلیل نتایج آن

سامانه‌ی پیشنهادی این پژوهش در منطقه‌ی شهری واقع در شهر قم با استفاده از ۹ نقطه‌ی مرجع و ۲ نقطه‌ی خطر مورد آزمایش قرارگرفت. بخشی از مکان مورد آزمایش سرپوشیده و بخشی دیگر روباز بود که تصویر بخشی از آن در شکل ۷ آمده است. در مورد تعیین فاصله‌ی حول نقاط خطرکه کاربر (کارگر) اگر وارد آن شود هشدار صادر می‌شود، استانداردها و مراجع مختلفی مورد بررسی قرارگرفت

شکل ۷. تصویر محل آزمایش.

که ضوابط خاصی حاصل نشد، ولی با توجه به خطای عملکرد سامانه و فواصلی که پژوهش‌های پیشین در نظر گرفتند، در این پژوهش فاصله‌ی ایمن تا نقاط خطر برابر ۱ متر اتخاذ شده است که این فاصله به راحتی قابل تغییر است. این آزمایش در ۱۳۹۹/۰۵/۰۷ در شرایط هوای آفتابی صورت گرفته که نتایج آن در این بخش تشریح می‌شود.

در آغاز عملیات ابتدا محل آزمایش مترکشی و جدول‌بندی شد و سپس نقاط مرجع با فواصل ۵ متری تعیین شد. محل آزمایش مربعی محلی با ابعاد ۱۵ × ۱۵ متر است. سپس، با استفاده از نرم‌افزار مدیران کارگاه، نقاط مرجع مطابق توضیحات داده شده در بخش ۴-۲ ثبت شد تا پایگاه داده نقاط مرجع در سرور ایجاد شود. سپس، نقاط خطر تعیین شده (که در این آزمایش ۲ عدد هستند) جانمایی شدند تا اطلاعات این نقاط نیز با استفاده از نرم‌افزار مدیران کارگاه در پایگاه داده‌ی مربوطه ثبت شود.

بدین ترتیب فاز دوم عملیات با استفاده از نرم‌افزار کارگران شروع شد. در ابتدای فاز دوم سرویس نرم‌افزار کارگران اجرا شد و آزمایشگر به آرامی به نقطه‌ی خطر اول حرکت کرد و هر زمان که هشدار به تلفن همراه او ارسال شد ایستاد و محل خود را علامت زد. اگر سامانه بدون خطا و با دقت ۱۰۰ درصد کار کند باید در شعاع ۱ متری نقطه‌ی خطر هشدار صادر شود.

در آزمون عملکرد جداگانه‌ی جی‌پی‌اس و روش اثر انگشت بر روی شبکه‌ی وای‌فای نیز مشاهده شد که خطای متوسط سامانه‌ی جی‌پی‌اس کمتر از ۱ متر و خطای عملکردی سامانه‌ی روش اثر انگشت روی شبکه‌ی وای‌فای در حدود ۱/۲ متر است. در ادامه‌ی آزمایش سامانه به صورت ترکیبی از این دو سامانه بهره می‌برد که نتایج آزمایش آن به شرح جدول ۲ است.

چنان که مشاهده می‌شود خطای متوسط عملکرد ترکیبی سامانه برابر با ۱/۱۷ متر است که با توجه به خطای سایر پژوهش‌ها که در بخش دوم به آنها پرداخته شد و هدف اولیه‌ی این پژوهش (بهبود دقت عملکرد)، نتیجه به دست آمده بسیار مورد قبول است و نشان از موفقیت این سامانه در تشخیص دارد. در پژوهش‌های پیشین که از روش اثر انگشت استفاده کرده‌اند بهترین دقتی که بدون استفاده از تجهیزات خاص به دست آمده است، ۱ متر است.[۱۳و۱۶] چنان که آزمایش‌ها نشان می‌دهند سامانه در محیط‌های سربسته و روباز مورد آزمون قرارگرفته است و بدون قطعی و مشکل عملکرد خوبی از خود نشان داده است. زمان پاسخگویی سامانه نیز کمتر از ۰/۵ ثانیه به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی عملکرد در لحظه‌ی سامانه است. آزمایش صورت گرفته روی سامانه، از آنجا که در محیط شهری به همراه ترافیک عبوری وسایل نقلیه صورت گرفته است، می‌تواند به خوبی گویای شرایط پویای کارگاه‌های

جدول ۲. نتایج به دست آمده از آزمایش سامانه.

خطای آزمایش (متر)	نقاط خطر	
	۱	۲
اول	۰/۷	۱/۳
دوم	۰/۸	۱/۷
سوم	۱/۵	۰/۹
چهارم	۱/۶	۰/۸
پنجم	۱	۱/۴
میانگین	۱/۱۲	۱/۲۲

جدول ۳. نتایج به دست آمده از مطالعه موردی.

طبقه	نقطه خطر	تعداد هشدار			
		صادر شده	اشتباه	صحیح	عدم صدور
همکف	D۱	۳۲	۴	۲۸	۶
همکف	D۲	۱۴	۳	۱۱	۲
+۱	D۳	۱۳	۲	۱۱	۱
-۱	D۴	۲۷	۴	۲۳	۴
-۱	D۵	۱۷	۳	۱۴	۱
جمع	-	۱۰۳	۱۶	۸۷	۱۴
درصد	-	-	٪۱۵	٪۸۴	٪۱۳

عمرانی باشد. این آزمایش در مکانی صورت گرفته است که بیش از ۷ شبکه‌ی مختلف وای‌فای مورد دسترس بوده است و شامل مناطق سرپوشیده و روباز بوده است.

طی این آزمایش مشاهده شد که با توجه به ساختار شبکه‌ی تلفن همراه در کشور، برخلاف یکی از فرضیات اولیه‌ی این پژوهش، در اکثر نقاط بیش از یک آنتن تلفن همراه در دسترس نیست و این موضوع دقت مکان‌یابی سامانه بر این اساس را کاهش می‌دهد. لذا پیشنهاد می‌شود که استفاده از شبکه‌ی تلفن همراه از سامانه کنار گذاشته شود و در انجام مطالعه‌ی موردی این پژوهش این کار صورت گرفت.

۶. مطالعه‌ی موردی

برای تایید نتایج به دست آمده در این پژوهش طی آزمایش آن در یک محیط واقعی کارگاه‌های ساختمانی، از پروژه ساختمانی فرمانیه واقع در منطقه فرمانیه تهران به‌عنوان نمونه‌ی مطالعاتی استفاده شد. تفاوت‌های آزمایش نمونه‌ی مطالعاتی با آزمایش اولیه صورت گرفته عبارت است از: کنار گذاشتن استفاده از شبکه‌ی تلفن همراه با توجه به دقت کم آن، استفاده از ۵ شبکه‌ی وای‌فای به جای ۳ شبکه، انجام آزمایش در ۳ طبقه‌ی همکف، زیرزمین اول و طبقه‌ی اول ساختمان و انجام آزمایش در ۳ روز. نتایج به دست آمده از آزمایش در نمونه‌ی مطالعاتی در جدول ۳ قابل مشاهده است. در جدول ۳ نقاط D۵، D۲ و D۱ واقع در جنب گود موجود در کارگاه و نقاط D۴ و D۳ واقع در جنب بازشوی تأسیسات هستند که مطابق جدول در ۳ طبقه‌ی ساختمان توزیع شده‌اند.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و معرفی سامانه‌یی برای بهبود شرایط ایمنی کارگاه‌های ساختمانی پرداخته شد که در آن از فنّاوری اینترنت اشیاء و تلفن‌های همراه هوشمند بهره‌گیری شده است. این سامانه با استفاده از روش اثر انگشت بر روی شبکه‌های وای‌فای و ترکیب آن با سامانه جی‌پی‌اس، توانسته است رهگیری بدون مرز در مناطق سرپوشیده و روباز را به ارمغان آورد.

خطای مکان‌یابی با استفاده از روش اثر انگشت روی شبکه‌ی وای‌فای و جی‌پی‌اس در آزمایش برابر با ۱/۱۷ به دست آمد که با توجه به هدف اولیه‌ی سامانه کافی و مورد قبول است و عملکرد مثبتی تلقی می‌شود. در بخش مطالعه‌ی موردی مشاهده شد که دقت عملکرد سامانه در محیط یک کارگاه ساختمانی ۸۴٪ است که دقت قابل قبولی به شمار می‌آید. یکی از اهداف تعیین شده برای پژوهش حاضر کاهش قیمت تمام شده‌ی اجرای سامانه بوده است که با توجه به استفاده از شبکه‌های وای‌فای موجود در محل و عدم نیاز به اتصال به آن‌ها، خود سامانه لزوماً نیازی به تهیه‌ی نقطه‌ی دسترسی جدید ندارد. سامانه از این لحاظ می‌تواند از صفر تا بیش از ۵۰ میلیون ریال (در سال ۱۳۹۹) در صورت تهیه‌ی نقاط دسترسی هزینه در بر داشته باشد. در آزمایش نهایی صورت گرفته در این پژوهش، از آنجا که نیازی به تهیه‌ی نقاط دسترسی نبود، هزینه‌ی اصلی اجرای سامانه در واقع هزینه‌ی کارکرد سرور مرکزی بوده است که حدودا ۱ میلیون ریال در ماه (در سال ۱۳۹۹) برآورد می‌شود. این هزینه در مقایسه با سایر پژوهش‌های بررسی شده خصوصاً پژوهش‌هایی که از وسایل حفاظتی پوشیدنی هوشمند استفاده می‌کنند، ناچیز است و از این لحاظ پژوهش حال حاضر موفق بوده است. در مورد کاربرپسند بودن سامانه‌ی ارائه شده نیز که از اهداف دیگر این پژوهش بود، با توجه به سادگی کار با سامانه که به وسیله‌ی تلفن همراه هوشمند صورت می‌گیرد، رابط کاربری ساده‌ی نرم‌افزارها که بدون دانش خاصی می‌توان با آن کار کرد و عدم نیاز به سخت‌افزارهای پیچیده و خاص، به نظر می‌رسد پژوهش به این هدف خود نیز رسیده است.

برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود که سامانه‌ی ارائه شده در یک محیط کارگاهی واقعی به صورت گسترده‌تری آزمایش شود تا عملکرد واقعی آن طی یک دوره زمانی نشان داده شود؛ مورد دیگری که می‌تواند در آینده مورد پژوهش قرارگیرد، تأثیر توسعه‌ی نسل پنجم شبکه‌های تلفن همراه است که می‌تواند با تعدد آنتن‌ها، معماری متفاوت شبکه و ظرفیت شبکه‌ی بیشتر، دقت مکان‌یابی با استفاده از روش‌هایی چون روش اثر انگشت را افزایش دهد و زمان پاسخگویی سامانه را کاهش دهد. توصیه می‌شود که در مکان‌هایی که امکان استفاده از شبکه‌ی وای‌فای را دارند از نسل‌های فعلی شبکه‌های تلفن همراه برای رهگیری استفاده نشود زیرا دقت لازم را ندارند. توسعه‌ی بعدی که می‌توان برای این چنین سامانه‌هایی مطرح کرد، استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده توسط سامانه برای تهیه‌ی دستورالعمل‌های ایمنی و تفسیر رفتار ایمنی پرسنل است که در این راه می‌توان از فنّاوری‌هایی چون هوش مصنوعی و یادگیری ماشین استفاده کرد.

پانوشت‌ها

1. occupational safety and health administration (OSHA)
۲. آخرین گزارش این سازمان مربوط به همین سال ۲۰۱۸ است.
۳. برای دریافت آمار جدیدتر به سازمان پزشکی قانونی مراجعه شد، متأسفانه آمار تفکیکی جدیدتری در دسترس نبود.
4. radio frequency identification (RFI)
5. K-Nearest neighborhood
6. Ma Yan
7. least square method
8. Kalman filter
9. federal Kalman filter
10. access point
11. GPS accuracy (ACC)
12. real time
13. query
14. flattening
15. Flask

منابع (References)

1. Gasemi, M. "A case for the death of several thousand people", Iran building magazine, p. 3, (in Persian) (2016).
2. U.S bureau of labor statistics, U.S.b.o.l. Fatal occupational injuries by event. 2019; Available from: https:// www.bls.gov/charts/census-of-fatal-occupational-injuries/fatal-occupatio nal-injuries-by-event-drilldown.htm.
3. International Telecommunication Union (ITU)., *ITU-Y Y.2060: Overview of the Internet of Things*, Ed. 1, (2012).
4. Awolusi, I., Marks, E., and Hallowell, M. "Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices", *Automation in Construction*, **85**, pp. 96-10 (2018).
5. Park, M.W. and Brilakis, I. "Continuous localization of construction workers via integration of detection and tracking". *Automation in Construction*, **72**, pp. 129-142 (2016).
6. Park, M.W. and Brilakis, I., "Construction worker detection in video frames for initializing vision trackers", *Automation in Construction*, **28**, pp. 15-25, (2012).
7. Yang, J., Arif, O., Vela P.A. and et al. "Tracking multiple workers on construction sites using video cameras", *Advanced Engineering Informatics*, **24**(4), pp. 428-434, (2010).
8. Zhou, C. and Ding, L. "Safety barrier warning system for underground construction sites using Internet-of-Things technologies". *Automation in Construction*, **83**, pp. 372-389 (2017).
9. Kanan, R., Elhassan, O., and Bensalem, R. "An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and

positioning strategies", *Automation in Construction*, **88**, pp. 73-86 (2018).

10. Tang, N., Hu, H., Xu, F. and et al. "Personalized safety instruction system for construction site based on internet technology", *Safety Science*, **116**, pp. 161-169 (2019).
11. Mok, E. and Retscher, G., "Location determination using WiFi fingerprinting versus WiFi trilateration", *Journal of Location Based Services*, **1**(2), pp. 145-159 (2007).
12. Faridnia, M. "A hybrid positioning method based on RSS in GSM Networks", M.Sc. Dissertation, Zanjan University, (in Persian) (2016).
13. Khalafi, M. "Indoor positioning by using mobile phone and WIFI networks", M.Sc. Dissertation, Zanjan University, (in Persian) (2016).
14. Chime, E. "Indoor positioning system using physical layer information in Wi-Fi systems", M.Sc. Dissertation , Amirkabir University of Technology, (in Persian) (2017).
15. Yan, M., Xiuwan, C., and Yubin, X. "Wireless local area network assisted GPS in seamless positioning", *in IEEE International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, (2012).
16. Ding, L.Y., Zhou, C., Deng, Q.X. and et al. "Real-time safety early warning system for cross passage construction in Yangtze Riverbed Metro Tunnel based on the internet of things", *Automation in Construction*, **36**, pp. 25-37 (2013).