

احراز هویت و اعتبارسنجی تلفیقی در شبکه کنتورهای هوشمند

فاطمه رضائی^۱، پریا رشیدی^۲

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، گروه شبکه‌های کامپیوتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران frezaei@kntu.ac.ir

^۲ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر، گروه شبکه‌های کامپیوتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

rashidyarya@gmail.com

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰

ویرایش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۷

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

چکیده: با وجود گسترش شبکه هوشمند (Smart Grid)، امنیت اطلاعات در این شبکه با چالش‌های زیادی روبرو بوده و نیازمند چارچوب امنیتی قوی برای آن هستیم. در این مقاله، روشی تلفیقی و کارا برای اعتبارسنجی در شبکه کنتورهای هوشمند ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی، ابتدا احراز هویت وسایل مصرفی و حسگری در کنتور هوشمند انجام می‌شود و سپس مقدار زنجیره چکیده تجمعی داده‌های جمع‌آوری شده در کنتور هوشمند محاسبه و به جمع‌کننده ارسال می‌شود. در بخش اول روش پیشنهادی، وسایل مصرفی با استفاده از برچسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) به کنتور هوشمند متصل می‌شوند تا احراز هویت انجام شود. برای احراز هویت وسایل مصرفی در کنتور هوشمند، از روش خم بیضوی (Elliptic Curve) استفاده می‌کنیم که قابلیت تامین سطح یکسانی از امنیت در مقایسه با سایر روش‌های رمزنگاری کلید همگانی مانند RSA را در ازای طول کلید کوتاه‌تر و هزینه‌های محاسباتی کمتر فراهم می‌کند. در بخش دوم روش پیشنهادی، با محاسبه زنجیره چکیده تجمعی و مقایسه با مقدار دریافتی، اعتبارسنجی پیام‌های دریافتی در جمع‌کننده انجام می‌شود. بنابراین از ارسال داده‌های اضافی به جمع‌کننده، اشغال پهنای باند و امکان نفوذ وسایل مخرب نیز جلوگیری می‌شود. روش پیشنهادی در این مقاله علاوه بر انطباق با ساختار شبکه هوشمند، هزینه محاسباتی و ارتباطی کمتری نیز نسبت به روش‌های موجود فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: احراز هویت، امنیت شبکه، شبکه هوشمند انرژی، کنتور هوشمند، درهم سازی.

Compound authentication in the network of smart meters

Fatemeh Rezaei, Parya Rashidy

Abstract: Despite the expansion of the smart grid, information security in this network has faced many challenges, and we need a strong security framework for it. In this article, a compound and efficient method for authentication in the network of smart meters is presented. In the proposed model, first, the authentication of devices and sensor data is done in the smart meter, and then the value of the cumulative hash chain of the authorized devices' data is calculated in the smart meter and along with the cumulative data is sent to the collector. In the first step of the proposed method, devices are connected to the smart meter using RFID tags, and the device ID is processed in the smart meter. We use the Elliptic Curve method for authentication. In the second step, by calculating the value of the cumulative hash chain and comparing it with the received value, the validation of the received messages is done on the collector. Therefore, sending additional data to the collector, occupying the bandwidth, and the possibility of intrusion of malicious devices are prevented. The proposed method, in addition to adapting to the structure of the smart grid, also provides a lower computational and communication cost than the existing methods.

Keywords: Authentication, network security, smart grid, smart meter, hashing.

۱- مقدمه

پیاده سازی شبکه هوشمند راه حلی برای کاهش تقاضای برق، مدیریت کارآمد و بهینه سازی استفاده از منابع مدیریتی است. کنتورهای هوشمند دستگاه هایی هستند که قادر به نظارت بر مصرف انرژی مصرف-کنندگان برق در زمان واقعی هستند. استفاده از کنتورهای هوشمند می تواند عملیات سیستم توزیع برق را تسهیل و خدمات با ارزش افزوده متنوعی را ایجاد کند. از طرفی، داده های مصرف انرژی که کنتورها جمع آوری می کنند، اطلاعات حساس مصرف کننده هستند. بنابراین، حفظ حریم خصوصی و امنیت اطلاعات یک نگرانی کلیدی و بازدارنده اصلی جمع آوری داده های بلادرننگ در عمل است. برای حفظ حریم خصوصی در شبکه کنتورهای هوشمند باید از روش هایی برای ارتقای امنیت شبکه استفاده کنیم. رایانش ابری، اینترنت اشیا و ارتباطات بی سیم فناوری های بسیار امیدوارکننده ای برای پیاده سازی شبکه هوشمند هستند، اما خطرات و چالش های امنیتی آن ها باید به خوبی مورد توجه قرار گیرد و راه حلی برای آن ها ارائه شود [۳]-[۱]. از تهدیدات رایج در شبکه هوشمند می توان به نفوذ، منع خدمت، بدافزارها، تزریق داده های نادرست یا مسمومیت داده اشاره کرد. بنابراین نیازمند چارچوب امنیتی قوی در شبکه هوشمند انرژی هستیم که نه تنها از نفوذ جلوگیری کند، بلکه حریم خصوصی و صحت داده های مصرف کننده را تضمین کند.

کنتورهای هوشمند با بهره گیری از هوش محاسباتی، مصرف توان وسایل را ثبت و به واحد جمع کننده ارسال می کنند. با افزایش تعداد کنتورهای هوشمند در شبکه، خواندن موردی این کنتورها دشوار می شود. بنابراین از روش تجمیع توزیع شده داده ها در شبکه هوشمند استفاده می شود. به این ترتیب که کنتورهای هوشمند داده ها را از فرزندان خود جمع آوری می کنند و به گره والد خود در درخت تجمیع ارسال می کنند تا در نهایت به واحد جمع کننده می رسد [۴]. به دلیل این مدل و فرآیند تجمیع و ارسال داده و اهمیت حیاتی اطلاعات در این حوزه، ارائه سازوکارهای امنیت و حفظ حریم خصوصی مختص شبکه کنتورهای هوشمند با در نظر گرفتن این ساختار سلسله مراتبی ضروری است. در این مقاله روشی تلفیقی و کارا برای اعتبارسنجی در شبکه کنتورهای هوشمند ارائه می کنیم.

در ادامه این مقاله در بخش دوم پیشینه پژوهش بررسی شده و الگوریتم های احراز هویت و درهم سازی معرفی می شوند. در بخش سوم مدل پیشنهادی احراز هویت و اعتبارسنجی در شبکه کنتورهای هوشمند ارائه می شود. بخش چهارم به نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی می پردازد. در بخش آخر نیز جمع بندی و پیشنهادات آتی ارائه خواهد شد.

۲- پیشینه پژوهش

کنتور هوشمند دستگاهی است که اطلاعات را از وسایل مصرف کننده به دست آورده و مصرف انرژی را اندازه گیری می کند. سپس اطلاعات جمع آوری شده را برای نظارت و حسابرسی در اختیار

شرکت برق یا اپراتور سیستم قرار می دهد. کنتور هوشمند از ارتباطات دو طرفه بین کنتور و سیستم مرکزی پشتیبانی می کند و می تواند برای نظارت و کنترل وسایل و مدیریت تقاضا و بار در ساختمان های هوشمند مورد استفاده قرار گیرد. سیستم های کنتور هوشمند از نظر فناوری و طراحی متفاوت هستند اما کارکرد مشابهی دارند. کنتورهای هوشمند داده ها را از مصرف کنندگان نهایی جمع آوری می کنند و این داده ها را از طریق شبکه محلی به جمع کننده داده منتقل می کنند. این فرآیند انتقال را می توان هر ۱۵ دقیقه یا به ندرت یکبار در روز بر حسب نیاز اجرا کرد [۵].

شبکه هوشمند عملکرد شبکه برق را قابل اطمینان تر، قابل کنترل و مقرون به صرفه تر می کند. این شبکه از دستگاه های نا همگنی تشکیل شده است که از طریق شبکه های عمومی در حال ارتباط هستند و این ارتباطات در معرض حملات سایبری و نقض حریم خصوصی هستند. به عنوان مثال یک مهاجم می تواند با تزریق کدهای مخرب، کنتورهای هوشمند را به خطر بیندازد و با تغییر در محتوای حافظه کنتورهای هوشمند، از مزایای مالی بهره مند شود. با وجود مزایای شناخته شده فناوری شبکه هوشمند و کنتورهای هوشمند، هنوز کاملاً مشخص نیست که تا چه میزان، حملات سایبری می تواند عملکرد کنتورهای هوشمند و جمع آوری داده های مصرف برق از مشتری را مختل کند [۶].

۱-۲ احراز هویت در اینترنت اشیا

احراز هویت و اعتبارسنجی، کنترل دسترسی، محرمانه بودن داده ها، یکپارچگی داده، عدم انکار و دردسترس بودن از خدمات امنیتی در شبکه هستند. احراز هویت به گیرنده اطمینان می دهد که پیام از منبعی دریافت شده است که ادعا می کند و تضمین می کند که شخص ثالث نتواند به عنوان یکی از دو طرف قانونی به منظور ارسال یا دریافت غیرمجاز خود را معرفی کند. در ادامه به بررسی روش های ارائه شده در مقالات برای احراز هویت در اینترنت اشیا [۷] می پردازیم.

- احراز هویت به کمک فناوری شناسایی فرکانس رادیویی RFID فناوری RFID عمدتاً برای شناسایی و ردیابی برچسب های متصل به اشیاء استفاده می شود و به عنوان یکی از فناوری های کلیدی بازار پرسرعت اینترنت اشیا در نظر گرفته می شود و انتظار می رود ارزش بازار آن از ۱۲,۰۸ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۰ به ۱۶,۲۳ میلیارد دلار تا سال ۲۰۲۹ افزایش یابد [۸]. در سال های اخیر، فناوری RFID معمولاً در زمینه مراقبت های بهداشتی برای کاربردهایی مانند حفاظت از کودک [۹]، نظارت بر موقعیت دارایی های پزشکی [۱۰]، نظارت و اعتبارسنجی وضعیت پزشکی [۱۱]، ردیابی بیمار و مدیریت دارو [۱۲]، انتقال خون [۱۳] و مدیریت ایمنی خانه سالمندان [۱۴] استفاده شده است. از آنجایی که داده های سلامت جنبه جدایی ناپذیر حریم خصوصی شخصی [۱۵] است، حفظ امنیت داده های پزشکی خصوصی و تضمین ناشناس بودن و محافظت از ردیابی از دسترسی در طول فرآیند احراز هویت RFID حیاتی است. همچنین در حال حاضر در

مشترک (TKN) بین خودش و کنترل کننده و مقدار چکیده تجمعی CH_F^x که x نشان دهنده شماره دنباله یا ترتیب مقادیر است، درهم سازی کرده و زنجیره می کند. در ادامه، مقدار حاصل را به اطلاعات ضمیمه می کند. فرض کنید H_F مرحله قبل در پیامی که به کنترل کننده ارسال می شود برابر با $H_F = h(H_1, TKN, CH_F^x)$ باشد، در نهایت، مقدار حاصل H_F را دوباره با کلید مخفی مشترک TKN درهم می کند و آن را در پایگاه داده به عنوان یک مقدار جدید به شکل CH_F ذخیره می کند. کنترل کننده نیز همان روش را برای اطمینان از صحت مقدار چکیده دریافتی پس از دریافت داده اعمال می کند. ابتدا، تمام اطلاعاتی که از گره حسگر دریافت شده را درهم سازی می کند، سپس مقدار چکیده را با دو مقدار دیگر یعنی کلید مخفی مشترک و مقدار چکیده تجمعی قبلی، درهم سازی و زنجیره می کند.

شایان ذکر است که این روش مقادیر چکیده جلسه را با درهم ساز کردن مقدار چکیده جلسه جدید با دو مقدار، یعنی کلید رمزنگاری موقت و مقدار چکیده تجمعی قبلی، به هم زنجیر می کند. بنابراین، این روش در ابتدا مانند یک فناوری بلاک چین به نظر می رسد، اما در واقع به خودی خود از بلاک چین استفاده نمی کند. می توان استدلال کرد که یک مهاجم می تواند ورودی های زنجیره ای اولین مورد را به خطر بیندازد یا کشف کند، سپس او فقط باید کلید مخفی را برای شکستن این مرحله از پروتکل بداند. با این حال، یافتن کلید مخفی آسان نیست زیرا در هر جلسه تغییر می کند. حتی اگر مهاجم کلید مخفی یا اولین درهم ساز را بداند، برای او بی فایده است زیرا از یک کلید نشست زودگذر استفاده می شود.

۲-۲ احراز هویت در شبکه هوشمند

همان طور که پیش تر گفته شد، کنتورهای هوشمند مصرف توان دستگاه های مصرفی را ثبت و به واحد جمع کننده ارسال می کنند. با افزایش تعداد کنتورهای هوشمند در شبکه، خواندن موردی این کنتورها دشوار می شود. بنابراین از روش تجمع توزیع شده داده ها در شبکه هوشمند استفاده می شود. به این ترتیب که کنتورهای هوشمند داده ها را از فرزندان خود جمع آوری می کنند و به گره والد خود در درخت تجمع ارسال می کنند تا در نهایت به واحد جمع کننده می رسد. به دلیل این مدل و فرآیند تجمع و ارسال داده و اهمیت حیاتی اطلاعات این حوزه، سازوکارهای امنیت و حفظ حریم خصوصی مختص شبکه کنتورهای هوشمند با در نظر گرفتن این ساختار سلسله مراتبی ضروری است. با وجود راه حل های مختلفی که برای امنیت داده در شبکه هوشمند انرژی ارائه شده است، اغلب این روش ها بر مبنای سیستم رمزنگاری Paillier [۲۲] هستند که پیچیدگی محاسباتی بالای عملیات آن مناسب کنتورهای هوشمند با منابع محدود نیست [۲۳] و [۲۴]. روش رمزنگاری خم بیضوی به دلیل قابلیت تامین سطح یکسانی از امنیت با سایر روش های رمزنگاری کلید همگانی در ازای طول کلید کوتاه تر و هزینه محاسباتی کمتر، گزینه مناسبی برای استفاده در شبکه هوشمند است. در [۴]، به کارگیری رمزنگاری خم بیضوی برای تامین محرمانگی اطلاعات در شبکه هوشمند بررسی شده است. در روش ارائه

بسیاری از برنامه های کاربردی دیگر مانند مدیریت هوشمند [۱۶]، کنترل دسترسی ایمن [۱۷]، پرداخت خودکار عوارض [۱۸]، نظارت کارکنان و پیشگیری از سرقت [۱۹] گسترش یافته است.

یک شبکه RFID از یک دستگاه که شامل یک برچسب، یک خواننده و یک پردازشگر پشتیبان است تشکیل شده است که در آن خواننده دارای یک شناسایی خاص است و می تواند برای عملیات خواندن یا نوشتن به منطقه کاری برچسب دسترسی داشته باشد. برچسب پس از مقداردهی اولیه با عناصر امنیتی مورد نیاز از سرور داخلی، جزئیات هویت را رمزگذاری کرده و به خواننده منتقل می کند. سپس خواننده می تواند داده های به دست آمده و شناسه برچسب را با تکیه بر اطلاعات موجود در سرور پشتیبان، چه به صورت آنلاین یا آفلاین، احراز هویت کند. دستگاه RFID بر اساس اینکه آیا دستگاه از برچسب هایی با منبع انرژی داخلی استفاده می کند یا توسط انرژی توزیع شده توسط خوانندگان RFID به صورت پیوسته کنترل می شود، به عنوان غیرفعال یا فعال طبقه بندی می شود. زمانی که برچسب RFID در فاصله ی نزدیک کنتور هوشمند باشد می تواند احراز هویت بین برچسب و کنتور هوشمند انجام شود تا در صورت تأیید، داده ها رد و بدل شوند.

روش های متداول رمزگذاری سنتی، هزینه دستگاه های RFID را به دلیل مصرف انرژی بالا افزایش می دهند. از آنجایی که در طراحی سیستم های RFID محافظت شده کم هزینه کاهش اندازه و قابلیت پردازش دارای اهمیت است، به کارگیری روش احراز هویت قابل اعتماد و مقرون به صرفه برای اطمینان از امنیت اطلاعات کاربر حیاتی است. در گذشته، پروتکل های احراز هویتی RFID مبتنی بر توابع درهم ساز و رمزنگاری متقارن بودند. در سال های اخیر، روش رمزنگاری خم بیضوی به دلیل قابلیت تامین سطح یکسانی از امنیت با سایر روش های رمزنگاری کلید همگانی مانند RSA در ازای طول کلید کوتاه تر و هزینه های محاسباتی کمتر، محبوبیت فزاینده ای برای استفاده در شبکه های حسگری و اینترنت اشیا یافته است. یک پروتکل احراز هویت مبتنی بر خم بیضوی برای یک شبکه حسگری مجهز به RFID در [۲۰] ارائه شده است که نویسندگان اثبات کرده اند که پروتکل پیشنهادی شان در مقایسه با کارهای مرتبط از امنیت بیشتری برخوردار است. در بخش ۴، به مقایسه عملکرد روش پیشنهادی خود با این مقاله خواهیم پرداخت.

• احراز هویت با زنجیره چکیده تجمعی

یکی دیگر از روش های ارائه شده در مقالات برای احراز هویت در اینترنت اشیا، استفاده از زنجیره چکیده تجمعی است [۲۱]. در این روش، اطلاعات هویتی در گره حسگر به کنترل کننده ارسال می شود و کنترل کننده، گره های حسگری را احراز هویت می کند. در روش ارائه شده در مقاله [۲۱] مطابق شکل ۱، گره حسگر N ابتدا اطلاعاتی را که می خواهد به کنترل کننده (CRN) ارسال کند، درهم سازی می کند و یک مقدار چکیده تولید می کند مثلاً H_1 . سپس H_1 را با دو مقدار دیگر، یعنی کلید مخفی

شوند، زیرا این اطلاعات برای کاربر محرمانه است. در این بخش روشی تلفیقی و کارا برای اعتبارسنجی در شبکه کنتورهای هوشمند ارائه می‌شود.

۱-۳ مدل پیشنهادی

ارتباط بین کنتورهای هوشمند و جمع‌کننده یک شرط اساسی برای مدیریت مصرف انرژی در بخش مصرف‌کننده است. ارتباط دو طرفه بین کنتور هوشمند و جمع‌کننده از طریق کانال عمومی نا امن، در برابر جعل هویت، قابلیت ردیابی کنتور هوشمند و حملات ضبط فیزیکی کنتور هوشمند آسیب پذیر است. بسیاری از روش‌های موجود نیاز به یک طرح احراز هویت کارآمد و ایمن برای زیرساخت‌های شبکه هوشمند دارند. در مدل پیشنهادی ارائه شده در شکل ۲، ابتدا وسایل مصرفی و حسگری در کنتور هوشمند احراز هویت شده و پس از تأیید، یک روش درهم سازی زنجیره‌ای بر روی داده‌های مصرف‌کننده اعمال شده و سپس به سمت جمع‌کننده ارسال می‌شود. به این ترتیب در مدل پیشنهادی در دو مرحله، ابتدا احراز هویت وسایل مصرفی و حسگری در کنتور هوشمند انجام می‌شود و سپس مقدار زنجیره چکیده تجمعی داده‌های وسایل مجاز در کنتور هوشمند محاسبه می‌شود و به همراه داده‌های دریافتی به سمت جمع‌کننده ارسال می‌شود. در جمع‌کننده با محاسبه زنجیره چکیده تجمعی و مقایسه با مقدار دریافتی، اعتبارسنجی پیام‌های دریافتی انجام می‌شود و به این صورت صحت و اعتبار داده‌های شبکه هوشمند تأیید می‌شود. در شکل ۲ مراحل روش پیشنهادی نشان داده شده که به شرح زیر است:

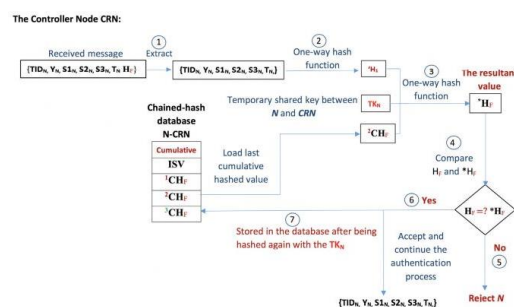
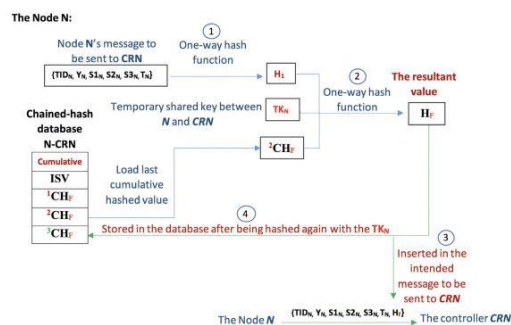
۱. احراز هویت وسایل مصرفی مجهز به برچسب RFID با کمک خم بیضوی در کنتور هوشمند: در مرحله نخست، وسایل مصرفی و حسگری با استفاده از برچسب‌های RFID به کنتور هوشمند متصل می‌شوند و اطلاعات را به کنتورهای هوشمند ارسال می‌کنند. در این مرحله شناسه‌ی برچسب وسایل دریافتی در کنتور هوشمند پردازش و احراز هویت انجام می‌شود. در گذشته احراز هویت RFID با توابع درهم ساز و رمزنگاری متقارن انجام می‌شد، اما به دلیل بهبود عملکرد و کاهش طول کلید، استفاده از رمزنگاری خم بیضوی در این مرحله پیشنهاد می‌شود. رمزنگاری خم بیضوی یک طرح سبک وزن برای احراز هویت و حفظ حریم خصوصی در شبکه است که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲. اعتبارسنجی داده‌ها بین کنتور هوشمند و جمع‌کننده با استفاده از زنجیره چکیده تجمعی: یکی از بخش‌های دیگر روش پیشنهادی برای تضمین اعتبار داده‌های دریافتی استفاده از زنجیره چکیده تجمعی است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در مرحله نخست، وسایل مصرفی در کنتور هوشمند احراز هویت شده و داده‌های وسایل مجاز تجمیع شده و به همراه زنجیره چکیده تجمعی به جمع‌کننده ارسال می‌شوند و جمع‌کننده پس از تأیید اعتبار، داده‌های دریافتی معتبر را ذخیره می‌کند.

به این ترتیب، در روش پیشنهادی یک ساختار سلسله مراتبی و تلفیقی برای احراز هویت و اعتبارسنجی با در نظر گرفتن ویژگی‌ها و الزامات

شده در این مقاله، واحد جمع‌کننده مسئول تولید کلید عمومی و خصوصی است. کلید عمومی تولید شده توسط جمع‌کننده بین کنتورهای هوشمند در شبکه توزیع می‌شود و کنتورهای هوشمند از این کلید عمومی برای رمزگذاری داده‌های خوانش شده خود استفاده می‌کنند و داده‌های رمز شده را برای واحد جمع‌کننده ارسال می‌کنند. واحد جمع‌کننده هم برای رمزگشایی داده‌های جمع‌آوری شده از کلید خصوصی خود استفاده می‌کند. لازم به تأکید است که مقاله [۴] تنها به محرمانگی داده‌ها از طریق رمزنگاری خم بیضوی در شبکه هوشمند پرداخته و به احراز هویت و اعتبارسنجی پیام‌های ارسالی نپرداخته است.

در مقاله حاضر، به بحث احراز هویت و اعتبارسنجی در شبکه کنتورهای هوشمند می‌پردازیم. احراز هویت متقابل در کنتور هوشمند به عنوان اولین خط دفاع در برابر حملات، می‌تواند هویت بین کنتور هوشمند و شبکه هوشمند را قبل از انتقال داده تأیید کند و یک رویکرد کارآمد و ایمن برای محافظت از داده‌های کنتور با اجازه دسترسی صرفاً به وسایل احراز هویت شده را فراهم کند.



شکل ۱: ایجاد زنجیره چکیده تجمعی در گره حسگر و کنترل کننده [۲۱]

۳- روش پیشنهادی اعتبارسنجی در شبکه

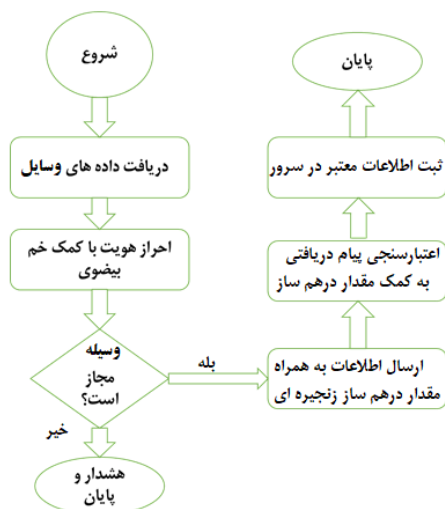
کنتورهای هوشمند

همانطور که ذکر شد، حفظ امنیت و حریم خصوصی چالشی بسیار حیاتی در به کارگیری کنتورهای هوشمند است. کنتور هوشمند و ارائه دهنده برق باید قبل از اشتراک گذاری اطلاعات مانند مصرف برق، صورتحساب، شارژ خودکار و غیره، به طور متقابل تأیید و احراز هویت

hard هستند. نمادهای به کار رفته در روش پیشنهادی در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲: مدل احراز هویت و اعتبارسنجی پیشنهادی



شکل ۳: مراحل روش پیشنهادی احراز هویت و اعتبارسنجی

یک مجموعه به نام Z_p تشکیل می دهیم که عناصر این مجموعه بین ۱ تا $p-1$ است، که این گروه تحت $\text{mod } p$ شکل می گیرد. خم بیضوی E در Z_p به صورت زیر تعریف می شود:

$$y^2 = x^3 + ax + b, \quad (1)$$

که a, b عضو Z_p هستند و داریم:

$$4a^3 + 27b^2 \neq 0 \pmod{p}. \quad (2)$$

$E(Z_p)$ شامل تمام نقاط (x, y) است که x, y عضو Z_p هستند و توسط معادلات بالا به دست می آیند.

روش پیشنهادی از دو فاز مقدار دهی اولیه و احراز هویت تشکیل شده است. در فاز مقدار دهی اولیه، خم بیضوی E را در Z_p انتخاب می کنیم. یک نقطه P را که عضو $E(Z_p)$ است و از مرتبه n است پیدا می کنیم. ابتدا، خواننده عدد تصادفی s را ایجاد می کند و $Y = s \cdot P$ محاسبه می شود،

خاص شبکه هوشمند ارائه می دهیم. لازم به ذکر است که روش های موجود برای احراز هویت در اینترنت اشیا که در بخش قبل مرور شد، همگی از یک ساختار یک سطحی برخوردارند که مناسب معماری شبکه هوشمند انرژی نیستند. به علاوه، روش های احراز هویت مبتنی بر برچسب RFID در اینترنت اشیا که در مقالات ارائه شده اند، نیازمند این است که برچسب و خواننده فاصله زیادی با یکدیگر نداشته باشند، بنابراین پیاده سازی عملی این روش ها بین وسایل مصرفی و جمع کننده مرکزی که فاصله زیادی با هم دارند امکان پذیر نیست. اما در روش پیشنهادی، ابتدا وسایل مصرفی با کمک برچسب و الگوریتم خم بیضوی در کنتور هوشمند احراز هویت شده و سپس داده های مجاز به صورت جمعی از کنتور هوشمند به جمع کننده ارسال می شوند. به این ترتیب، بار کاری جمع کننده مرکزی کاهش یابد. بنابراین اگر داده ها مربوط به یک وسیله غیر مجاز باشد در همان ابتدا احراز هویت آن در کنتور هوشمند تأیید نمی شود و دیگر نیازی به ارسال داده به جمع کننده نیست. با این کار از ارسال داده های اضافی به جمع کننده، اشغال پهنای باند و امکان نفوذ وسایل مخرب نیز جلوگیری می شود. روش پیشنهادی این مقاله علاوه بر انطباق با ساختار شبکه هوشمند، پیچیدگی کمتری از منظر هزینه محاسباتی و ارتباطی نیز فراهم می کند که در بخش بعد به آن می پردازیم. در ادامه این بخش، جزئیات روش پیشنهادی توضیح داده می شود.

۲-۳ احراز هویت وسایل مصرفی مجهز به برچسب RFID

با کمک خم بیضوی در کنتور هوشمند

حلقه ابتدایی در بحث احراز هویت در شبکه هوشمند، احراز هویت وسایلی است که به کنتور هوشمند متصل می شوند. وسایل مصرفی و حسگری با استفاده از برچسب های RFID به کنتور هوشمند متصل می شوند و شناسه ی کاربران در کنتور هوشمند پردازش می شود تا احراز هویت انجام شود. از آنجایی که ارتباط بین برچسب و برچسب خوان در یک محیط باز از طریق سیگنال های رادیویی اتفاق می افتد، مکانیزمی برای احراز هویت اعتبارسنجی و شناسایی پیام ها در هر دو طرف نیاز است. به منظور کاهش هزینه ها نباید محاسبات پیچیده ای در وسایل انجام شود، از این رو از روش خم بیضوی برای احراز هویت در این مرحله استفاده می کنیم.

زمانی که با برچسب های RFID قصد اتصال به کنتور هوشمند و ارسال و دریافت داده را داریم، اطلاعات در فاز اول در زمانی که برای اولین بار از برچسب استفاده می شود، با کمک خم بیضوی ثبت می شوند و در دفعات بعدی در زمان ارسال اطلاعات ورود از سمت برچسب های RFID مجدد با کمک خم بیضوی احراز هویت انجام شده و در صورتی که اطلاعات تأیید شود، دریافت و ارسال داده ها انجام می شود.

امنیت رمزنگاری خم بیضوی به مسئله لگاریتم گسسته خم بیضوی و مسئله دیفی هلمن خم بیضوی متکی است که هر دو در دسته مسائل NP-

۳-۳ اعتبارسنجی داده‌ها بین کنتور هوشمند و جمع‌کننده

به کمک زنجیره چکیده تجمعی

در این بخش روش پیشنهادی اعتبارسنجی داده‌ها بر اساس زنجیره چکیده تجمعی بین کنتور هوشمند و جمع‌کننده ارائه می‌شود. برای داشتن یک احراز هویت کامل متقابل، یک مکانیسم احراز هویت پاسخ به چالش باید در نظر گرفته شود. در این مقاله، از روش زنجیره چکیده تجمعی [۲۱] که یک روش احراز هویت یک طرفه چالش-پاسخ است استفاده می‌شود. در روش زنجیره چکیده تجمعی، الگوریتم درهم‌سازی مورد استفاده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. الگوریتم‌های درهم‌سازی ایمن SHA نوع ۰، ۱ و ۲ هستند، که الگوریتم SHA-1 دارای سطح ایمنی بالاتری نسبت به SHA-0 است. در مقاله [۲۱] از الگوریتم درهم‌ساز SHA1 برای محاسبه چکیده پیام در زنجیره چکیده تجمعی در خانه هوشمند، استفاده شده که چکیده ۱۶۰ بیتی به عنوان خروجی تولید می‌کند. اما در روش پیشنهادی، برخلاف مقاله [۲۱]، از الگوریتم درهم‌ساز SHAKE-128 استفاده می‌کنیم تا روش‌های قبلی را که از SHA-1 و یا SHA-0 استفاده کرده‌اند بهبود دهیم. لازم به ذکر است که الگوریتم SHAKE-128 دارای سرعت ۴۴۵ مبی‌بایت در ثانیه (MiB/s) است که نسبت به SHA-256 سرعت بالاتری دارد و ثابت شده است که SHAKE-128، در برابر حملات تصادم و پیش‌تصویر اول و دوم مقاومت بیشتری نسبت به الگوریتم‌های مذکور دارد.

۴- ارزیابی عملکرد

در این بخش به ارزیابی عملکرد و هزینه محاسباتی و هزینه ارتباطی طرح پیشنهادی و مقایسه با روش‌های موجود می‌پردازیم. به علت اینکه طرح پیشنهادی از دو بخش در شبکه هوشمند تشکیل شده، هزینه محاسباتی و ارتباطی در هر دو بخش ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که در روش پیشنهادی، مشابه مقاله [۲۰] سطح امنیتی ۱۲۸ بیت را در نظر گرفته‌ایم، به این معنی که برای اجتناب از انواع حملات تصادم و پیش-تصویر، طول نقاط خم بیضوی و چکیده پیام را حداقل ۲۵۶ بیت در نظر می‌گیریم.

۴-۱ هزینه محاسباتی

- احراز هویت وسایل مجهز به برچسب RFID با کمک خم بیضوی در کنتور هوشمند

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ابتدا وسایل مصرفی و حسگری با استفاده از برچسب‌های RFID به کنتور هوشمند متصل می‌شوند و اطلاعات را به کنتورهای هوشمند ارسال می‌کنند. در این مرحله شناسه‌ی برچسب وسایل دریافتی در کنتور هوشمند پردازش و احراز هویت به کمک خم بیضوی انجام می‌شود. محاسبات در این بخش از شبکه، شامل مجموعه‌ای از عملیات XOR، محاسبه چکیده و عملیات خم بیضوی است که از بین آنها، ضرب خم بیضوی بیشترین حجم محاسبات را دارد و در هزینه محاسباتی

سپس مقدار s را به عنوان کلید خصوصی خود و γ را به عنوان کلید عمومی خود قرار می‌دهد. سپس کنتور عدد تصادفی d_i را تولید کرده و به عنوان کلید خصوصی برچسب نام تخصیص می‌دهد و به ازای هر برچسب مقدار $ID_i = d_i \cdot P$ را محاسبه می‌کند و بعد مقادیر (P, γ, t_i, ID_i) را از طریق یک کانال امن بین برچسب‌ها توزیع می‌کند. سپس یک عدد صحیح d را در بازه‌ی $[1, n-1]$ انتخاب کرده و $Q = d \cdot P$ را محاسبه می‌کنیم. کلید خصوصی d و کلید عمومی (E, P, n, Q) است. یک عدد k تصادفی در بازه $[1, n-1]$ تولید می‌کنیم و $k \cdot P$ را محاسبه کرده که یک نقطه به مختصات (x_1, y_1) ایجاد می‌شود.

$$r = x_1 \bmod n. \quad (۳)$$

اگر r صفر بود به مرحله‌ی اول می‌رویم و $1/k \bmod n$ را حساب می‌کنیم، پس از آن $s = 1/k(H(M) + d \cdot r) \bmod n$ را حساب می‌کنیم که $h(.)$ یک تابع درهم‌ساز است. اگر $s=0$ بود آنگاه به مرحله اول می‌رویم.

امضای پیام M عبارت است از یک جفت عدد صحیح (r, s) . با استفاده از کلید عمومی (E, P, n, Q) می‌توانیم صحت امضا را تأیید کنیم. می‌دانیم که (r, s) اعداد صحیحی در بازه $[1, n-1]$ هستند. پس از آن روابط زیر را محاسبه می‌کنیم:

$$w = 1/s \bmod n, \quad (۴)$$

$$u_1 = h(M) \cdot w \bmod n, \quad (۵)$$

$$u_2 = r \cdot w \bmod n, \quad (۶)$$

$$u_1 \cdot P + u_2 \cdot Q = (x_0, y_0), \quad (۷)$$

$$v = x_0 \bmod n. \quad (۸)$$

پس از آنکه روابط بالا را به دست آوردیم اگر و فقط اگر $v=r$ بود احراز هویت قابل تأیید است. بنابراین اگر داده‌ها مربوط به یک وسیله غیرمجاز باشد در همان ابتدا و زمانی که احراز هویت آن منفی می‌شود، دیگر نیازی به ارسال داده به جمع‌کننده نیست. با این کار از ارسال داده‌های اضافی به سمت سرور و اشغال پهنای باند جلوگیری می‌شود.

جدول ۱: لیست نمادها

نمادها	توضیحات
P	یک نقطه عضو خم بیضوی $E(Z_p)$
ID_i	شناسه برچسب نام
s	کلید خصوصی سرویس دهنده
d_i	کلید خصوصی برچسب نام
γ	کلید عمومی سرویس دهنده
h	تابع درهم‌ساز
t_i	مهر زمانی

پیچیدگی محاسباتی روش‌های موجود از مرتبه $O(n^2)$ است، در حالی که پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی از مرتبه $O(n)$ خواهد بود.

جدول ۲: مقایسه هزینه محاسباتی روش پیشنهادی با مقالات

هزینه محاسباتی در جمع کننده	هزینه محاسباتی در کنتور هوشمند	هزینه محاسباتی در حسگر	روش
$(2T_M) n_1.n_2$	NA	$2T_M$	[20]
$(9T_h) n_1.n_2$	NA	$8T_h$	[21]
$(9T_h) n_2$	$(2T_M)n_1+8T_h$	$2T_M$	روش پیشنهادی

۲-۴ هزینه ارتباطی

یکی دیگر از معیارهای ارزیابی عملکرد، هزینه ارتباطی است که بیانگر تعداد بیت‌های ارسالی بین گره‌ها برای انجام روش مورد نظر است. در ادامه به مقایسه هزینه ارتباطی روش پیشنهادی و روش‌های موجود در دو بخش شبکه می‌پردازیم.

- از وسایل مجهز به برچسب RFID تا کنتور هوشمند

در این بخش شبکه، دو سمت ارتباط دستگاه برچسب‌دار و خواننده هستند. تعداد بیت‌های ارسالی از وسیله برچسب‌دار به خواننده را $N_{tag \rightarrow reader}$ و تعداد بیت‌های ارسالی از خواننده به وسیله برچسب‌دار را $N_{reader \rightarrow tag}$ نمایش می‌دهیم.

برای محاسبه تعداد بیت‌های ارسالی، سطح امنیتی ۱۲۸ بیت در نظر گرفته شده است، به این معنی که برای اجتناب از انواع حملات تصادم و پیش‌تصویر، طول نقاط خم بیضوی و چکیده پیام را حداقل ۲۵۶ بیت قرار داده‌ایم. به علاوه برای جلوگیری از حملات جستجوی جامع، طول شناسه-ها هم ۱۲۸ بیت در نظر گرفته می‌شود. طبق نتایج بررسی شده در [۲۰]، در بخش وسیله برچسب‌دار تا خواننده، کمترین هزینه ارتباطی با استفاده از روش خم بیضوی به این صورت به دست می‌آید:

$$N_{tag \rightarrow reader} = 768 \text{ bits}, \quad (15)$$

$$N_{reader \rightarrow tag} = 512 \text{ bits}. \quad (16)$$

- از کنتور هوشمند تا جمع کننده

در این بخش شبکه، دو سمت ارتباط کنتور هوشمند و جمع کننده هستند. تعداد بیت‌های ارسالی از کنتور هوشمند به جمع کننده را با $N_{SM \rightarrow CLC}$ و تعداد بیت‌های ارسالی از جمع کننده به کنتور هوشمند را با $N_{CLC \rightarrow SM}$ نمایش می‌دهیم. در روش زنجیره چکیده تجمعی پیام ارسالی فراسو شامل ۶ مقدار چکیده به طول N_h بیت، یک برچسب زمانی به طول N_T و یک شناسه به طول N_{ID} بیت است. پیام ارسالی فرسو نیز شامل ۲

کل غالب است. بنابراین تحلیل هزینه محاسباتی در این بخش شبکه را متمرکز به مقدار محاسبات عملیات ضرب خم بیضوی مورد نیاز در وسایل برچسب‌دار و خواننده در کنتور هوشمند می‌کنیم و این مقدار را با T_M نمایش می‌دهیم. طبق نتایج بررسی شده در [۲۰]، کمترین هزینه محاسباتی در بین روش‌های موجود در این بخش در وسیله مجهز به برچسب، CC_{tag} و خواننده، CC_{reader} برابر $2T_M$ است:

$$CC_{tag} = 2T_M, \quad (9)$$

$$CC_{reader} = 2T_M. \quad (10)$$

- اعتبارسنجی داده‌ها بین کنتور هوشمند و جمع کننده با استفاده از زنجیره چکیده تجمعی

در بخشی از شبکه که از کنتور هوشمند تا جمع کننده است، روش زنجیره چکیده تجمعی را به کار برده‌ایم، که از دو نوع عملیات XOR و تابع درهم ساز یکطرفه تشکیل شده است. زمان محاسبه یک عملیات XOR را با T_{xor} و زمان محاسبه چکیده را با T_h نمایش می‌دهیم. در روش زنجیره چکیده تجمعی مورد بررسی در کنتور هوشمند، ۵ بار عملیات XOR و ۸ بار تابع درهم ساز یکطرفه فراخوانی می‌شود و بنابراین کل هزینه محاسباتی این روش در کنتور هوشمند را اگر با CC_{SM} نمایش دهیم، برابر با مقدار زیر است:

$$CC_{SM} = 8T_h + 5T_{xor}. \quad (11)$$

جمع کننده نیز در روش زنجیره چکیده تجمعی، ۷ بار عملیات XOR و ۹ بار تابع درهم ساز یکطرفه را فراخوانی می‌کند و اگر کل هزینه محاسباتی در جمع کننده را با CC_{CLC} نمایش دهیم، برابر با مقدار زیر است:

$$CC_{CLC} = 9T_h + 7T_{xor}. \quad (12)$$

از آنجایی که زمان عملیات XOR بسیار ناچیز است، می‌توانیم از آن صرف نظر کنیم و هزینه محاسباتی روش زنجیره چکیده تجمعی را در کنتور هوشمند و جمع کننده به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$CC_{SM} \approx 8T_h, \quad (13)$$

$$CC_{CLC} \approx 9T_h. \quad (14)$$

در جدول ۲ به مقایسه هزینه محاسباتی روش پیشنهادی با روش‌های موجود در مقالات می‌پردازیم. تعداد گره‌های حسگری در شبکه تحت پوشش یک کنتور هوشمند را با n_1 و تعداد کنتورهای هوشمند را با n_2 نمایش می‌دهیم، بنابراین تعداد کل گره‌های حسگری در شبکه $n_1.n_2$ خواهد بود. لازم به ذکر است که همان طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، روش‌های مرتبط احراز هویت در مقالات برای اینترنت اشیا طراحی شده‌اند و یک سطحی هستند و بنابراین از دو بخش حسگر و جمع کننده تشکیل شده‌اند. برای مقایسه پیچیدگی محاسباتی کل این روش‌ها، اگر $n_1 = n_2 = n$ در نظر بگیریم، همان طور که مشاهده می‌شود

مراجع

- [1] M. R. Asghar, G. Dan, D. Miorandi, and I. Chlamtac, "Smart Meter Data Privacy: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 4, pp. 2820-2835, 2017.
- [2] G. R. Barai, S. Krishnan, and B. Venkatesh, "Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid-a review," IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015.
- [3] S. Nimbargi, S. Mhaisne, S. Nangare, and M. Sinha, "Review on AMI technology for Smart Meter," 2016 IEEE International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT), 2016.
- [4] K. Deepak and K. Chandrasekaran, "Investigating Elliptic Curve Cryptography for Securing Smart Grid Environments", Third ISEA Conference on Security and Privacy (ISEA-ISAP), 2020.
- [5] J. Zheng, D. W. Gao, and L. Lin, "Smart Meters in Smart Grid: An Overview," IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 2013.
- [6] S. Kumar, H. Kumar, and G. R. Gunnam, "Security Integrity of Data Collection from Smart Electric Meter under a Cyber Attack," 2019 2nd International Conference on Data Intelligence and Security (ICDIS), 2019.
- [7] A. Albalawi, A. Almrshed, A. Badhib, and S. Alshehri, "A Survey on Authentication Techniques for the Internet of Things", International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS), 2019.
- [8] RFID Forecasts, Players and Opportunities, IDTechEx, 2020.
- [9] X. Lin, R. Lu, D. Kwan, and X. S. Shen, "REACT: an RFIDbased privacy-preserving children tracking scheme for large amusement parks," Computer Networks, vol. 54, no. 15, pp. 2744-2755, 2010.
- [10] D. C. Wyld, "Preventing the "worst case scenario:" combating the lost laptop epidemic with RFID technology," Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking, pp. 29-33, Springer, 2010.
- [11] S. W. Wang, W. H. Chen, C. S. Ong, L. Liu, and Y. W. Chuang, "RFID application in hospitals: a case study on a demonstration RFID project in a Taiwan hospital," in Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06), 2006.
- [12] M. M. Perez, M. Cabrero-Canosa, J. V. Hermida et al., "Application of RFID technology in patient tracking and medication traceability in emergency care," Journal of Medical Systems, vol. 36, no. 6, pp. 3983-3993, 2012.

مقدار چکیده به طول N_h بیت، یک برچسب زمانی به طول N_T و یک شناسه به طول N_{ID} بیت است. همان طو که پیش تر گفته شد، در روش پیشنهادی ما برخلاف [۲۱]، برای امنیت بیشتر از الگوریتم درهم ساز SHAKE-128 استفاده شده است که طول چکیده آن $N_h=256$ بیت است و مقادیر برچسب زمانی $N_T=32$ بیت و شناسه $N_{ID}=16$ بیت هستند. بنابراین هزینه ارتباطی روش پیشنهادی ما در این بخش شبکه به این صورت به دست می آید:

$$N_{SM \rightarrow CLC} = 6N_h + N_T + N_{ID} = 6 \times 256 + 32 + 16 \quad (۱۷)$$

$$= 1584 \text{ bits},$$

$$N_{CLC \rightarrow SM} = 2N_h + N_T + N_{ID} = 2 \times 256 + 32 + 16 \quad (۱۸)$$

$$= 560 \text{ bits}.$$

همان طور که مشاهده می شود، مرتبه هزینه ارتباطی روش پیشنهادی نیز در مجموع، کمتر از سایر روش های موجود است.

جدول ۳: مقایسه هزینه ارتباطی روش پیشنهادی با مقالات

روش ها	هزینه ارتباطی	هزینه در کنتور هوشمند	هزینه ارتباطی در کنتنده (بیت)
[20]	768	NA	512 $n_1 n_2$
[21]	1008	NA	368 $n_1 n_2$
روش پیشنهادی	768	768 n_1 + 1584	560 n_2

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش احراز هویت و اعتبارسنجی دو سطحی با استفاده از برچسب های RFID و الگوریتم خم بیضوی و زنجیره چکیده تجمعی در شبکه کنتورهای هوشمند ارائه شد. در روش پیشنهادی یک طرح جدید احراز هویت و اعتبارسنجی در شبکه کنتورهای هوشمند برای مقابله با حملات امنیتی جعل هویت و دستکاری پیام ارائه کردیم. به این ترتیب کنتور هوشمند، وسایل مصرفی را احراز هویت کرده و داده های وسایل مجاز به همراه مقدار زنجیره چکیده تجمعی را برای جمع کننده ارسال می کند و اعتبارسنجی نهایی پیام های دریافتی در جمع کننده مرکزی انجام می شود. بنابراین از ارسال داده های اضافی به جمع کننده، اشغال پهنای باند و امکان نفوذ وسایل مخرب نیز جلوگیری می شود. روش پیشنهادی در این مقاله علاوه بر انطباق با ساختار شبکه هوشمند، هزینه محاسباتی و ارتباطی کمتری نیز نسبت به روش های موجود فراهم می کند. به عنوان پیشنهاد برای کارهای آتی می توان برای بهبود عملکرد انتقال داده های کنتور هوشمند از شبکه های نسل پنجم 5G استفاده کرد و برای استفاده از شبکه 5G باید پروتکل های امنیتی مورد نیاز را تدوین و ارائه کرد.

- [13] J. E. Katz and R. E. Rice, "Public views of mobile medical devices and services: a US national survey of consumer sentiments towards RFID healthcare technology," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 78, no. 2, pp. 104-114, 2009.
- [14] A. Ohsaga and K. Kondoh, "Bedside medication safety management system using a PDA and RFID tags," in 2013 7th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), pp. 85-89, Tokyo, Japan, 2013.
- [15] Y. T. Liao, T. L. Chen, T. S. Chen, Z. H. Zhong, and J. H. Hwang, "The application of RFID to healthcare management of nursing house," *Wireless Personal Communications*, vol. 91, no. 3, pp. 1237-1257, 2016.
- [16] K. Fan, W. Jiang, H. Li, and Y. Yang, "Lightweight RFID protocol for medical privacy protection in IoT," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, pp. 1656-1665, 2018.
- [17] S. Anandhi, R. Anitha, and V. Sureshkumar, "IoT enabled RFID authentication and secure object tracking system for smart logistics," *Wireless Personal Communications*, vol. 104, no. 2, pp. 543-560, 2019.
- [18] Y. K. Lee, L. Batina, and I. Verbauwhede, "EC-RAC (ECDLP based randomized access control): provably secure RFID authentication protocol," in 2008 IEEE international conference on RFID, pp. 97-104, Las Vegas, NV, USA, 2008.
- [19] R. Want, "An introduction to RFID technology," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 25-33, 2006.
- [20] H. Lamrani Alaoui, A. El Ghazi, M. Zbakh, A. Touhafi, and A. Braeken, "A Highly Efficient ECC-Based Authentication Protocol for RFID," *Journal of Sensors*, 2021.
- [21] M. Alshahrani and I. Traore, "Secure mutual authentication and automated access control for IoT smart home using cumulative Keyed-hash chain," *Journal of Information Security and Applications*, no. 45, pp.156-175, 2019.
- [22] F. Li, B. Luo, and P. Liu, "Secure Information Aggregation for Smart Grids Using Homomorphic Encryption," 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, MD, pp. 327-332, 2010.
- [23] P. Bhanse, B. Mishra, and D. Jena, "A Novel Smart Meter Authentication Scheme for Secure Smart Grid Communication," 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON), 2019.
- [24] A. Madhu and P. Prajeesha, "Prevention of FDI Attacks in Smart Meter by providing Multi-Layer Authentication using ElGamal and SHA," 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), 2021.