یک الگوریتم سبک وزن جهت مقابله با حمله کره‌های کپی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم متحرک به کمک عامل‌های یادگیر

مجتبی جمشیدی[1]، سمیرا عباسی[2]، مهدی اثنی عشری[3]، محمدرضا میبدی[4]

[1] آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران jamshidi.mojtaba@gmail.com

[2] مرکز آموزش علمی کاربردی میراث بیستون کرمانشاه، دانشگاه علمی کاربردی، کرمانشاه، ایران samiraabasi@sco.iaun.ac.ir

[3] پژوهشکده فناوری اطلاعات، پژوهشگاه فضای مجازی، تهران، ایران esnaashari@itrc.ac.ir

[4] دانشکده کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران mmeybodi@aut.ac.ir

چکیده: تاکنون حمله‌های متنوعی بر روی شبکه‌های حسگر بی‌سیم تعریف شده است که یکی از خطرناک‌ترین آنها، حمله تکرار گره (یا گره کپی) است. در این حمله، دشمن یک (یا چند) گره نرمال درون شبکه را ضبط کرده، مواد قفل‌گذاری درون آن را استخراج نموده و کپی‌هایی از آن تولید و در شبکه تزریق می‌کند. در این مقاله، یک الگوریتم جدید، هوشمند و سبک‌وزن به کمک عامل‌های یادگیر و گره‌های نگهبان جهت شناسایی گره‌های کپی در شبکه‌های حسگر متحرک پیشنهاد می‌گردد. کارایی الگوریتم پیشنهادی از نظر سربار ارتباطات و حافظه با دیگر الگوریتم‌های موجود مقایسه گردیده که نتایج این مقایسه حاکی از برتری الگوریتم پیشنهادی است. هم‌چنین، الگوریتم پیشنهادی توسط شبیه‌ساز JSIM پیاده‌سازی گردیده و با انجام یک‌سری آزمایش‌ها کارایی آن در قالب معیارهای احتمال تشخیص گره‌های کپی و احتمال تشخیص غلط ارزیابی شده است.

کلمات کلیدی: امنیت، عامل‌های یادگیر، گره‌های کپی، گره‌های نگهبان.

۱- مقدمه

یک شبکه حسگر بی‌سیم از مجموعه‌ای از گره‌های حسگر منابع محدود تشکیل شده است که با همکاری یکدیگر امکان نظارت بر محیط را فراهم می‌آورند. این نوع شبکه‌ها کاربردهای متنوعی در بخش‌های نظامی، صنعت، بهداشت و علوم دیگر دارند. گره‌های حسگر محدودیت‌های بسیاری از نظر ظرفیت حافظه، توان محاسباتی، برد رادیویی و میزان انرژی دارند. برقراری امنیت در این نوع شبکه‌ها امری بسیار مهم و چالش‌زا می‌باشد که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [1].

یکی از حمله‌های خطرناک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم حمله تکرار گره[1] یا گره کپی[2] است. با توجه به گسترش بدون مراقبت گره‌ها در محیط عملیاتی، دشمن می‌تواند یک (یا چند) گره قانونی درون شبکه را ضبط و اطلاعات مهم از جمله مواد قفل‌گذاری[3] داخل آن را استخراج کند و با استفاده از این مواد قفل‌گذاری، گره‌های تکراری (یا گره‌های کپی) ایجاد کند. گره‌های کپی دقیقا حاوی مشخصات و اطلاعات (از جمله شناسه، مواد قفل‌گذاری و ...) گره قانونی ضبط شده می‌باشند، از این‌رو، قابلیت برپایی کلید با دیگر گره‌های قانونی شبکه را دارند. دشمن سپس می‌تواند این گره‌های کپی را در شبکه پخش کند و عملیات شبکه را مختل و یا شنود کند [2].

تاکنون الگوریتم‌های زیادی نظیر [11-3] جهت مقابله با حمله گره‌های کپی در شبکه‌های حسگر ثابت مطرح شده است. ولی این الگوریتم‌ها در شبکه‌های حسگر متحرک قابل بکارگیری نیستند، چراکه اکثر این الگوریتم‌ها یا متکی بر تعیین مکان گره‌ها و ارسال ادعاهای مکانی به گره‌های شاهد یا مکان‌های خاص در شبکه هستند، یا مختص توپولوژی‌های خاص (نظیر، گرید) می‌باشند. هم‌چنین در [20-12] نیز الگوریتم‌هایی جهت مقابله با حمله گره‌های کپی در شبکه‌های حسگر متحرک ارائه شده است که به‌طور کلی دارای معایبی نظیر سربار ارتباطی و حافظه بالا، عدم مقیاس‌پذیری، مکانیزم پیچیده و سنگین، نیاز به تعیین مکان گره‌ها و استفاده از کلیدهای عمومی و امضاهای دیجیتال می‌باشند.

در این مقاله، یک الگوریتم جدید، هوشمند و سبک وزن مبتنی بر عامل‌های یادگیر و گره‌های نگهبان[4] جهت شناسایی گره‌های کپی در شبکه‌های حسگر متحرک پیشنهاد می‌گردد، به‌طوری که معایب الگوریتم‌های موجود را برطرف کند. الگوریتم پیشنهادی نیاز به تعیین مکان گره‌ها، انتشار پیغام‌های ادعای مکانی، کلیدهای عمومی و فرایندهای پیچیده تشخیص گره‌های کپی ندارد.

ادامه این مقاله بدین ترتیب سازماندهی می‌شود. در بخش۲، کارهای گذشته و در بخش ۳، عامل‌های یادگیر آمده است. فرضیات سیستم در بخش ۴ آمده است. در بخش ۵ الگوریتم پیشنهادی شرح داده می‌شود. ارزیابی کارایی و نتایج شبیه‌سازی در بخش ۶ ارائه شده است. بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- کارهای گذشته

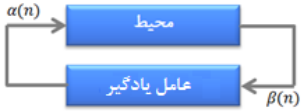
در [11-3] الگوریتم‌هایی جهت مقابله با حمله گره‌های کپی در شبکه‌های حسگر ثابت مطرح شده است. ولی این الگوریتم‌ها در شبکه‌های متحرک قابل بکارگیری نیستند. در ادامه به بررسی الگوریتم‌های خاص شبکه‌های متحرک می‌پردازیم.

در [12] یک الگوریتم توزیعی مبتنی بر تولید و معاوضه اعداد تصادفی جهت شناسایی گره‌های کپی مطرح شده است. ایده اصلی الگوریتم‌های ارائه شده در [13]، [14] و [15] برگرفته از این حقیقت است که یک گره متحرک ضبط نشده (قانونی) نباید هرگز در سرعتی بیش از حداکثر سرعت سیستم پیکربندی شده حرکت کند. وجود گره‌های کپی u، سبب می‌شود گره‌های دیگر گمان کنند این گره u با سرعتی بیش از حداکثر سرعت از پیش تعریف شده حرکت می‌کند. ایده اصلی دو الگوریتم EDD و SEDD ارائه شده [16] برگرفته از این ملاحظه است که برای یک شبکه بدون گره تکراری، در یک دوره زمانی مشخص با طول T، تعداد دفعات رویارویی گره u با یک گره خاص v به احتمال زیاد باید محدود

باشد. در [17] یک الگوریتم جهت شناسایی گره‌های کپی در شبکه‌های سکتوربندی شده ارائه شده است. ایده اصلی الگوریتم [18]، استفاده از پروتکل پیش‌توزیع کلید جفتی مبتنی بر چندجمله‌ای و فیلترهای شمارشی Bloom [21] جهت شناسایی گره‌های کپی است. ایده اصلی الگوریتم [19]، SHD، مبادله لیست همسایه‌ها میان گره‌های متحرک و انتخاب گره‌های شاهد برای عمل تشخیص گره‌ها کپی است. در [20] نیز دو الگوریتم در حوزه زمان (TDD) و فضا (SDD) به کمک تابع درهم‌سازی تک-راهه رمزنگاری جهت مقابله با حمله گره‌های کپی مطرح شده است.

۳- عامل یادگیر

در این بخش، یک مدل از عامل‌های یادگیر ارائه می‌دهیم. مدل عامل یادگیر پیشنهادی، برگرفته از مدل اتوماتاهای یادگیر [22][23] است با این تفاوت کوچک که نحوه پاداش به عمل‌های درست، اندکی متفاوت است. عامل یادگیر یک ماشین با حالات محدود است که می‌تواند تعداد محدودی عمل را انجام دهد. هر عمل انتخاب شده، توسط یک محیط تصادفی ارزیابی شده و پاسخی به عامل یادگیر داده می‌شود. عامل یادگیر از این پاسخ استفاده نموده و عمل خود را برای مرحله بعد انتخاب می‌کند. در طی این فرآیند، عامل یادگیر، یاد می‌گیرد که چگونه بهترین عمل را از بین اعمال مجاز خود انتخاب کند. شکل (۱) ارتباط بین عامل یادگیر و محیط را نشان می‌دهد.



شکل (۱) مدل عامل‌های یادگیر

محیط را می‌توان توسط سه‌تایی $E \equiv \{\alpha, \beta, c\}$ نشان داد که در آن $\alpha \equiv \{\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_r\}$ مجموعه ورودی‌های محیط، $\beta \equiv \{\beta_1, \beta_2, ..., \beta_m\}$ مجموعه خروجی‌های محیط و $c \equiv \{c_1, c_2, ..., c_r\}$ مجموعه احتمال‌های جریمه می‌باشند. ورودی محیط یکی از r عمل انتخاب شده عامل یادگیر است. خروجی (پاسخ) محیط به هر عمل i توسط β_i مشخص می‌شود. اگر β_i یک پاسخ دودویی باشد، محیط مدل P[5] نامیده می‌شود. در چنین محیطی $\beta_i(n) = 1$ به‌عنوان پاسخ نامطلوب یا شکست و $\beta_i(n) = 0$ به‌عنوان پاسخ مطلوب یا موفقیت در نظر گرفته می‌شوند. به این ترتیب عامل یادگیر را می‌توان با چهارتایی $LA \equiv \{\alpha, \beta, p, T\}$ نشان داد که $\alpha \equiv \{\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_r\}$ مجموعه عمل‌های اتوماتا (r تعداد عمل‌های عامل یادگیر)، $\beta \equiv \{\beta_1, \beta_2, ..., \beta_r\}$ مجموعه ورودی‌های عامل یادگیر، $p \equiv \{p_1, p_2, ..., p_r\}$ بردار احتمال عمل‌های عامل یادگیر و $T \equiv p(k+1) = T[\alpha(k), \beta(k), p(k)]$ الگوریتم یادگیری می‌باشد. اگر عامل یادگیر در تکرار kام، یک عمل خود مانند α_i را انتخاب کند، تغییر احتمال عمل‌ها بصورت زیر خواهد بود (a پارامتر پاداش و b پارامتر جریمه):

الف- پاسخ مطلوب از محیط

$$\begin{aligned} p_i(k+1) &= p_i(k) + a[1 - p_i(k)] \\ p_j(k+1) &= (1-a)p_j(k) \qquad \forall j, \ j \neq i \end{aligned} \tag{۱}$$

در این صورت، عامل یادگیر، همین عمل α_i را برای تکرار $k+1$ انتخاب می‌کند.

ب- پاسخ نامطلوب از محیط

$$\begin{aligned} p_i(k+1) &= (1-b)p_i(k) \\ p_j(k+1) &= \frac{b}{r-1} + (1-b)p_j(k) \qquad \forall j, \ j \neq i \end{aligned} \tag{۲}$$

در این صورت، عامل یادگیر، یک عمل را به‌طور تصادفی و بر اساس بردار احتمال برای تکرار $k+1$ خود انتخاب می‌کند.

۴- فرضیات سیستم و مدل حمله

شبکه حسگر حاوی دو مجموعه گره‌های حسگر معمولی (SN[1]) و گره‌های نگهبان (WN[2]) است که به‌طور تصادفی در یک محیط دوبعدی پراکنده می‌شوند. تعداد گره‌های حسگر معمولی، $\eta = |SN|$ و تعداد گره‌های نگهبان، $\varpi = |WN|$ است. تعداد گره‌های نگهبان خیلی کمتر از تعداد حسگرهای معمولی است ($\varpi << \eta$). تعداد کل گره‌های شبکه را با n نشان می‌دهیم که در الگوریتم پیشنهادی از $n = \varpi + \eta$ بدست می‌آید. گره‌های حسگر معمولی، SN، مأموریت شبکه (نظیر جمع‌آوری اطلاعات، ارسال داده‌ها به سمت ایستگاه پایه و ...) را انجام می‌دهند و گره‌های نگهبان، WN، وظیفه شناسایی گره‌های کپی را بر عهده دارند. هر گره یک شناسه یکتا دارد و از موقعیت مکانی خود آگاه نیست. برد رادیویی تمام گره‌ها یکسان است. تمام گره‌ها متحرک می‌باشند و در طول حیات شبکه مطابق مدل‌های تحرک، نظیر Random waypoint در محیط عملیاتی مورد نظر حرکت می‌کنند. گره‌های حسگر معمولی (SN) در برابر مداخله مقاوم نیستند و دشمن در صورت ضبط یک گره می‌تواند به اطلاعات محرمانه آن دسترسی داشته باشد و آن را برنامه ریزی مجدد کند. ولی فرض می‌شود که گره‌های نگهبان در برابر مداخله مقاوم بوده و در صورت ضبط توسط دشمن، قابل کدگشایی و برنامه‌ریزی مجدد نمی‌باشند [24][25]. هم‌چنین، با توجه به متحرک بودن گره‌های حسگر در محیط عملیاتی، گره‌ها می‌بایست به‌طور پریودیک (به عنوان مثال بعد از هر t واحد زمانی یا پس از این‌که به یک مکان جدید در شبکه می‌رسند) یک پیغام "Hello"، درخواست مسیر، ارسال داده، زنده بودن[3] و ... از خود منتشر کنند [26]. این عمل درواقع یکی از نیازمندی‌های شبکه‌های حسگر متحرک است تا هر گره بتواند در هر لحظه از زمان، همسایه‌های جاری خود را شناسایی کرده، در صورت نیاز با آن‌ها کلیدهای امنیتی برپا کند، با هم مخابره کنند و جدول مسیریابی خود را ایجاد کند. البته در این‌جا، گره‌های نگهبان از ارسال پریودیک این‌گونه پیغام‌ها خودداری می‌کنند تا حضورشان از دید دیگر گره‌ها مخفی بماند. چراکه این گره‌های نگهبان وظیفه شناسایی گره‌های بدخواه دشمن (گره‌های کپی) را دارند.

فرض می‌شود شبکه حسگر در یک محیط خصمانه گسترش می‌یابد، بنابر این، شبکه ناامن بوده و دشمن می‌تواند گره‌هایی را ضبط کند و کپی‌هایی از این گره‌های ضبط شده را ایجاد و سپس در شبکه تزریق کند. هم‌چنین، فرض می‌شود هر گره کپی نیز در هر دوره زمانی t، یک پیغام "Hello"، درخواست مسیر، ارسال داده یا زنده بودن منتشر می‌کند. گره‌های کپی، می‌توانند هم‌چون گره‌های نرمال متحرک باشند و یا دشمن آنها را به‌طور ثابت در مکان‌های خاص مستقر نماید. هیچ یک از این دو حالت تأثیری بر الگوریتم پیشنهادی ندارد.

۵- الگوریتم پیشنهادی

ایده اصلی الگوریتم پیشنهادی، بکارگیری عامل‌های یادگیر و استفاده از پیغام‌های"Hello"(و درخواست مسیر، ارسال داده یا ...) منتشر شده توسط گره‌ها جهت شناسایی گره‌های کپی در شبکه‌های حسگر متحرک است. همان‌طور که گفته شد، در الگوریتم پیشنهادی علاوه بر گره‌های حسگر معمولی، تعدادی گره نگهبان در شبکه وجود دارد که ترافیک شبکه را نظارت کرده و گره‌های کپی را

شناسایی می‌کنند. بر روی هریك از این گره‌های نگهبان، یك عامل یادگیر سوار می‌شود. از دلایل موثر بودن مدل عامل یادگیر پیشنهادی می‌توان به هوشمندی، سبک‌وزن و غیر قطعی بودن اشاره کرد که مناسب شبکه‌های حسگر بی‌سیم است.

الگوریتم پیشنهادی از ۳ فاز تشکیل شده است. در **فاز اول**، عامل‌های یادگیر پیکربندی می‌شوند. در **فاز دوم**، هر گره نگهبان با نظارت بر ترافیک شبکه، عامل یادگیر خود را برروزرسانی می‌کند. این فاز خود به ψ دوره زمانی کوچك‌تر با طول زمان t شکسته می‌شود. در هر دوره زمانی t، گره‌ها یک مقصد تصادفی برای خود انتخاب نموده و پس از رسیدن به مقصد در آنجا برای مدت زمانی ساکن می‌مانند و شروع به ارسال پیغام‌های "Hello"، داده‌ای، درخواست مسیر و... می‌کنند. پس از آنکه ψ دور عمل نظارت بر ترافیک شبکه، توسط گره‌های نگهبان صورت پذیرفت و فاز دوم خاتمه یافت، فاز سوم آغاز می‌شود که در آن، اقدام به شناسایی گره‌های کپی می‌شود. در ادامه به شرح جزئیات این ۳ فاز از الگوریتم پیشنهادی می‌پردازیم.

۵-۱- فاز اول (پیکربندی عامل‌های یادگیر)

قبل از گسترش گره‌ها در محیط عملیاتی، عامل‌های یادگیر بر روی گره‌های نگهبان بار می‌شوند و با فرض این‌که تعداد گره‌های حسگر معمولی η باشد، بردار عمل(*A_vector*) و بردار احتمالات (*P_vector*) عمل‌های عامل‌های یادگیر به صورت رابطه (۳) تنظیم می‌شوند:

$$A\_vector = [1,2,..., \eta]$$
$$P\_vector = [\frac{1}{\eta}, \frac{1}{\eta}, ..., \frac{1}{\eta}] \quad (۳)$$

درواقع، هر گره حسگر معمولی، بیان‌گر یک عمل (*action*) برای عامل یادگیر است. سپس، هر عامل یادگیر به‌طور تصادفی یک عمل (α_i) را انتخاب می‌کند. عمل انتخاب شده α_i توسط عامل یادگیر موجود در گره نگهبان v در واقع گره‌ای است که v انتظار دارد در دوره بعدی نظارت بر ترافیک (در این‌جا، دوره اول از فاز دوم) آن را در همسایگی خود مشاهده کند. پس از انجام این مرحله، یعنی پیکربندی عامل‌های یادگیر موجود در گره‌های نگهبان، گره‌ها به‌طور تصادفی در محیط گسترش می‌یابند.

۵-۲- فاز دوم (نظارت بر ترافیک)

هر گره پس از ساکن شدن در یک مکان از شبکه، یک پیغام "Hello" منتشر می‌کند تا خود را به همسایه‌هایش معرفی نماید و در صورت نیاز اقدام به ارسال پیغام‌های درخواست مسیر، داده‌ای یا زنده بودن می‌کند. این سبب می‌شود هر گره نگهبان آگاه شود که چه گره‌هایی در حال حاضر (دوره فعلی از فاز دوم) همسایه آن هستند. پس از گذشت t واحد زمانی، یا به عبارت دیگر، پس از پایان دوره زمانی فعلی، عامل یادگیر هر گره نگهبان v پاسخی (مثبت یا منفی) از محیط دریافت می‌کند. اگر عمل (یا همان گره) انتخاب شده، یعنی α_i، در همسایگی گره نگهبان v ظاهر شده باشد، این به منزله پاسخ مثبت از محیط است و چنانچه عمل α_i در همسایگی گره نگهبان v ظاهر نشده باشد، این به منزله پاسخ منفی از محیط است. اگر عامل یادگیر پاسخ مثبت از محیط دریافت کند، به عمل α_i مطابق رابطه (۱) پاداش داده و همین عمل α_i را برای دوره بعدی انتخاب می‌کند. ولی اگر پاسخ منفی از محیط دریافت کند، ابتدا عمل α_i را مطابق رابطه (۲) جریمه نموده، سپس یک عمل را مجددا از مجموعه عمل‌های خود (*A_vector*) به‌طور تصادفی برحسب بردار *P_vector* انتخاب می‌کند. این عملیات به‌طور همزمان توسط تمام گره‌های نگهبان انجام می‌گیرد. به این ترتیب، پس از گذشت یک بازه زمانی t، دوره زمانی اول از اجرای فاز دوم الگوریتم پیشنهادی خاتمه می‌یابد. سپس گره‌ها یک مقصد تصادفی جدید برای خود انتخاب و شروع به حرکت به سوی مقصد می‌کنند. به این ترتیب، دور بعدی از فاز دوم آغاز می‌شود.

همان‌طور که گفته شد، فاز دوم، به تعداد ψ دور اجرا می‌گردد. از آن‌جا که در حمله تکرار گره، دشمن یک گره (نظیر u) را ضبط و چندین کپی از آن را در شبکه منتشر می‌کند، لذا گره‌ی با شناسه u به تعداد دفعات بیشتری نسبت به گره‌های غیرکپی در همسایگی گره‌های نگهبان ظاهر می‌شود که این سبب می‌شود عامل‌های یادگیر احتمال عمل متناظر با این گره کپی را در بردار احتمالات (*P_vector*) افزایش دهند تا به مقدار 1 نزدیک شود.

۵-۳- فاز سوم (شناسایی گره‌های کپی)

پس از پایان اجرای فاز دوم الگوریتم پیشنهادی، هر گره نگهبان باید تصمیم بگیرد که آیا گره‌ی کپی‌ای شناسایی کرده است یا خیر. اگر هیچ گره کپی‌ای در شبکه وجود نداشته باشد، در این صورت با توجه به مدل تصافی حرکت گره‌ها، تعداد دفعات حضور همه گره‌ها در همسایگی هر گره نگهبان v تقریبا برابر خواهد بود که این سبب می‌شود مقدار احتمال‌ها در بردار *P_vector* تقریبا باهم برابر باشند. ولی اگر دشمن یک گره u را ضبط نموده و چندین کپی از آن در شبکه تزریق کرده باشد، در این صورت، تعداد دفعات ظاهر شدن گره با شناسه u در همسایگی گره‌های نگهبان بیشتر از سایر گره‌ها خواهد بود. این سبب می‌شود مقدار احتمال عمل متناظر با گره u در بردار *P_vector* عامل یادگیر گره‌های نگهبان به مراتب بیشتر از مقدار احتمال عمل‌های متناظر با سایر گره‌ها باشد. بنابر این، هر گره نگهبان باید با توجه به بردار احتمالات عمل‌های (*P_vector*) عامل یادگیر خود اقدام به شناسایی گره‌های کپی کند. در اینجا یک روال ساده جهت شناسایی گره‌های کپی، بر اساس بردار *P_vector*، پیشنهاد می‌شود. شبه‌کد این روال در شکل (۲) آمده است.

```
1: evaluate μ , μ = 1/η
2: sort P_vector in Descend order
3: malicious_list = φ
4: for i = 0 to η − 2
       if (P_vector[i] − P_vector[i+1] > 2μ)
           add Action[i] to malicious_list
       else
           exit for
```

شکل (۲) شبه‌کد روال شناسایی گره‌های کپی

در این روال، ابتدا میانگین (μ) بردار *P_vector* محاسبه می‌گردد .سپس، این بردار *P_vector* به صورت نزولی مرتب می‌شود. در آخر، با یک حلقه، بردار *P_vector* را پیمایش نموده و چنانچه اختلاف احتمال عمل iام با احتمال عمل $i+1$ بیشتر از مقدار"دو برابر میانگین بردار *P_vector*" باشد، عمل متناظر با *P_vector[i]*، یعنی *A_vector[i]* را به عنوان گره بدخواه کپی علامت می‌زند. ولی اگر شرط مورد نظر برای عنصر iام برقرار نباشد، حلقه پیمایش شکسته شده و عناصر بزرگتر از i دیگر بررسی نمی‌شوند. چراکه عمل‌های متناظر با گره‌های کپی، میزان احتمال‌شان در بردار احتمالات خیلی بیشتر از احتمال دیگر عمل‌ها خواهد شد. از این‌رو، تفاضل مقدار احتمال عمل‌های متناظر با گره‌های کپی نسبت به عمل‌های متناظر با دیگر گره‌های غیرکپی خیلی بیشتر از دو برابر میانگین خواهد شد (بسته به تعداد دوره‌های فاز دوم و تعداد کپی‌ها).

۴-۵- تشخیص غلط در الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی در تشخیص گره‌های کپی ممکن است دچار اشتباه گردد. یعنی ممکن است برخی گره‌های غیرکپی را به اشتباه به عنوان گره‌های کپی شناسایی کند. حالت منجر به تشخیص غلط زمانی رخ می‌دهد که برخی گره‌های نرمال (نظیر u) به تصادف به تعداد دفعات زیادی در همسایگی یک گره نگهبان خاص (نظیر W) ظاهر شوند که این سبب می‌شود احتمال متناظر با عمل u در P_vector گره نگهبان W افزایش یابد (به سمت ۱ نزدیک شود). درنتیجه، در فاز سوم الگوریتم پیشنهادی، گره u به اشتباه توسط گره نگهبان W به عنوان گره کپی تشخیص داده می‌شود.

۶- ارزیابی کارایی و نتایج شبیه‌سازی

سربار حافظه: از آن‌جا که الگوریتم پیشنهادی فقط بر روی گره‌های نگهبان سوار است، لذا هیچ سربار حافظه‌ای بر گره‌های حسگر معمولی تحمیل نمی‌کند. ولی گره‌های نگهبان به یک فضای $O(\eta)$ جهت ذخیره لیست عمل‌های عامل یادگیر (یعنی A_vector) و یک فضای $O(\eta)$ جهت ذخیره بردار احتمال عمل‌های عامل یادگیر(یعنی P_vector) نیاز دارند. بنابر این، سربار حافظه مربوط به هر گره نگهبان از مرتبه $O(\eta)$ است درحالی که هیچ سربار حافظه‌ای به گره‌های حسگر معمولی تحمیل نمی‌شود. در جدول (۱) سربار حافظه الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌ها موجود مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، الگوریتم پیشنهادی از نظر سربار حافظه برتر از سایر الگوریتم‌ها می‌باشد. چراکه سربار حافظه الگوریتم پیشنهادی، به ازای η گره حسگر معمولی برابر صفر و به ازای ϖ گره نگهبان از مرتبه $O(\eta)$ است که باید توجه شود تعداد حسگرهای معمولی خیلی بیشتر از تعداد گره‌های نگهبان است.

جدول (۱) مقایسه سربار الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌ها

سربار ارتباطات	سربار حافظه	الگوریتم
$O(n\sqrt{n})$	$O(\sqrt{n})$	LSM[3]
$O(n)$	$O(n/T)$	SET[6]
$O(r\sqrt{n})+O(s)$	$O(w)$	P-MPC, SDC [7]
$O(n\sqrt{n})$	$O(d)$	RED[4]
$O(\log n\times\sqrt{n})$	$O(\log n\times\sqrt{n})$	RAWL[9]
$O(1)$	$O(4\times d\times E[X])$	XED[12]
$O(n)$	$O(n\sqrt{n})$	SPRT[15]
$O(n)$	$O(n),\ O(\xi)$	EDD, SEDD[16]
$O(n\times\log n)$	$O(d)$	Algorithm[18]
$O(\sqrt{n}),O(d)$	$O(n)$	TDD, SDD[20]
0	$0\sim O(\eta)$ [†]	**الگوریتم پیشنهادی**

n : تعداد گره‌ها در شبکه.

w : تعداد گره‌های شاهدی که ادعای مکانی از L را ذخیره می‌کنند.

s : تعداد گره‌های حسگر در یک سلول از شبکه.

$E[X]$: تعداد حرکت‌های مورد انتظار که یک گره s_i نیاز دارد تا دو نسخه متفاوت از گره‌های کپی را ملاقات کند.

ξ : زیرمجموعه‌ای از گره‌های شبکه ($n > \xi$).

[†] به ازای حسگر معمولی صفر و به ازای گره‌های نگهبان $O(\eta)$

نکته: در الگوریتم پیشنهادی سربارها (حافظه‌ای و ارتباطی) فقط به گره‌های نگهبان تحمیل می‌شوند ولی در سایر الگوریتم‌ها، همه گره‌ها متحمل سربار می‌شوند.

سربار ارتباطات: با توجه به محدودیت‌های انرژی گره‌های حسگر، میزان انرژی مصرفی الگوریتم‌های ارائه شده برای شبکه‌های حسگر یک موضوع مهم است. عملیات ارسال، دریافت و پردازش بسته از مجموعه اعمال مهمی هستند که انرژی مصرف می‌کنند. از آن‌جا که عمل ارسال بسته‌ها نسبت به عملیات پردازش و دریافت بسته‌ها انرژی خیلی بیشتری مصرف می‌کند، لذا محاسبه تعداد بسته‌های ارسالی که به دلیل استفاده از یک الگوریتم خاص به شبکه تحمیل می‌شود (یا همان سربار ارتباطات)، یک معیار مهم جهت ارزیابی کارایی الگوریتم‌های مطرح برای شبکه‌های حسگر است. از آن‌جا که الگوریتم پیشنهادی، فقط از پیغام‌های "Hello"، درخواست مسیر و ... جهت اجرای الگوریتم بهره می‌گیرد و با توجه به اینکه ارسال این دست پیغام‌ها جزء نیازمندی‌های شبکه‌های حسگر متحرک است، لذا هیچ‌گونه سربار ارتباطاتی به گره‌های حسگر معمولی تحمیل نمی‌شود. هم‌چنین گره‌های نگهبان در طی دورهای مختلف اجرای الگوریتم پیشنهادی هیچ‌گونه پیغامی در شبکه منتشر نمی‌کنند. از این‌رو، سربار ارتباطی گره‌های نگهبان نیز صفر است. در جدول (۱) هم‌چنین سربار ارتباطات الگوریتم پیشنهای و سایر الگوریتم‌های موجود مقایسه گردیده است. از حیث سربار ارتباطات، الگوریتم پیشنهادی برتر از دیگر الگوریتم‌ها می‌باشند.

۶-۲- نتایج شبیه‌سازی‌ها

الگوریتم پیشنهادی توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز JSIM پیاده‌سازی گردیده و با انجام یک‌سری آزمایش‌ها، کارایی آن در قالب معیارهای احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط ارزیابی شده است.

- **احتمال تشخیص:** تعیین می‌کند الگوریتم پیشنهادی با چه احتمالی موفق به شناسایی گره‌های می‌شود.
- **احتمال تشخیص غلط:** احتمال اینکه یک گره غیرکپی به اشتباه توسط یک الگوریتم امنیتی به عنوان گره کپی تشخیص داده شود.

در اجرای شبیه‌سازی‌ها، فرض می‌شود شبکه حاوی n گره حسگر است که به‌طور تصادفی در یک ناحیه دوبعدی ۱۰۰×۱۰۰ متر مربع پراکنده شده‌اند. دشمن M گره قانونی را ضبط نموده و از هر یک از آنها، R گره کپی ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، محیط عملیاتی حاوی $R\times M$ گره بدخواه می‌باشد. هم‌چنین، تعداد گره‌های نگهبان ϖ در نظر گرفته شده است. پارامترهای پاداش و جریمه عامل‌های یادگیر با مقادیر $a=0.01,\ b=0.001$ تنظیم شده است. برد رادیویی تمام گره‌ها نیز ۲۰ متر درنظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از اعتبار نتایج، هر شبیه‌سازی ۱۰۰ بار تکرار شده و نتیجه نهایی از میانگین نتایج این ۱۰۰ تکرار بدست آمده است.

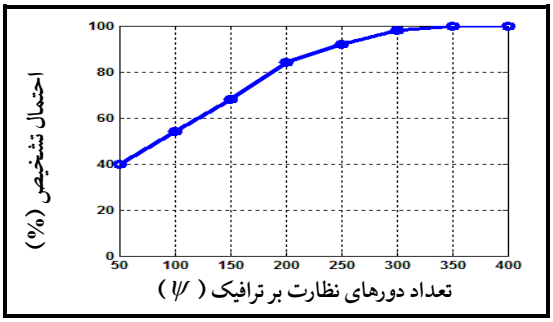
آزمایش ۱: در این آزمایش پارامترهای $n=100,\ R=10,\ M=5,\ \varpi=10$ تنظیم شده و احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط گره‌های کپی در الگوریتم پیشنهادی، به ازای $\psi=50,...,400$ ، ارزیابی گردیده است. شکل‌های(۳) و (۴) نتایج این آزمایش را به ترتیب در قالب معیارهای احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط نشان می‌دهند. نتایج این آزمایش در شکل (۳) نشان می‌دهد، احتمال تشخیص گره‌های کپی به ازای $\psi=200$ برابر۸۴%، به ازای $\psi=300$ برابر ۹۸% و به ازای $\psi\geq 350$ برابر ۱۰۰% است. هم‌چنین، نتایج این آزمایش در شکل (۴) نشان می‌دهد، احتمال تشخیص غلط الگوریتم پیشنهادی به ازای $\psi<350$

کمتر از ۰/۵% و به ازای $\psi \geq 350$ برابر ۰% است. دلیل این نتایج واضح است. هرچه تعداد دورهای نظارت بر ترافیک (یعنی تعداد دورهای فاز دوم) افزایش یابد، گره‌های نگهبان دفعات بیشتری گره‌های کپی را در همسایگی خود ملاقات می‌کنند که این سبب می‌شود احتمال عمل‌های متناظر با این گره‌های کپی به سمت 1 و احتمال سایر عمل‌ها (گره‌های غیرکپی) به سمت میل کند. در نتیجه، فاز سوم الگوریتم پیشنهادی، با دقت بیشتری گره‌های کپی را از گره‌های غیرکپی تمیز می‌کند. بنابر این، افزایش پارامتر ψ سبب می‌شود احتمال تشخیص به سمت ۱۰۰% و احتمال تشخیص غلط به سمت ۰% میل کند.

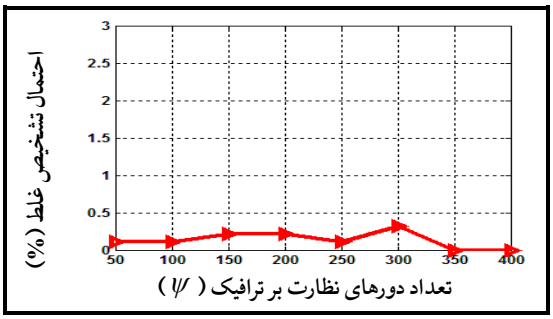
آزمایش ۲: هدف این آزمایش، ارزیابی تأثیر تعداد گره‌ها، n، بر کارایی الگوریتم پیشنهادی است. در این آزمایش پارامترهای $\varpi=10,\ M=5,\ R=10,\ \psi=350$ تنظیم شده و احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط گره‌های کپی در الگوریتم پیشنهادی، به ازای $n=100,200,300$، ارزیابی گردیده و نتایج حاصل در جدول (۲) آمده است. نتایج این آزمایش نشان داد، با افزایش تعداد گره‌ها در شبکه، احتمال تشخیص گره‌های کپی کاهش و احتمال تشخیص غلط افزایش می‌یابد. دلیل این نتیجه این است که هرچه تعداد گره‌ها، n، در شبکه افزیش یابد، به نسبت آن تعداد عمل‌های عامل‌های یادگیر نیز افزایش می‌یابد. از طرفی، هرچه تعداد عمل‌های عامل یادگیر افزایش یابد، سرعت همگرایی عامل یادگیر کندتر می‌شود. به عنوان مثال، زمانی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود داشته باشد احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ۱۰۰% و ۰% می‌شود. ولی زمانی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود داشته باشد احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ۹۲% و ۱/۴% است. البته اگر تعداد دورهای فاز دوم، یعنی ψ را افزایش دهیم ($\psi>350$)، احتمال تشخیص گره‌های کپی بیشتر از ۹۲% می‌شود و به سمت ۱۰۰% میل می‌کند و احتمال تشخیص غلط کمتر از ۱/۴% و به سمت ۰% میل می‌کند. به‌منظور تصدیق این ادعا، همین آزمایش را به ازای $\psi=500$ تکرار نموده و نتایج حاصل را در جدول (۳) نشان داده‌ایم. می‌بینیم که با افزایش ψ، کارایی الگوریتم بالاتر می‌رود.

آزمایش ۳: هدف این آزمایش، ارزیابی تأثیر تعداد کپی‌های منتشر شده از هر گره، یعنی R، بر کارایی الگوریتم پیشنهادی است. در این آزمایش پارامترهای $\varpi=10,\ M=5\ \ n=100,\ \psi=300$ تنظیم شده و احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط الگوریتم پیشنهادی، به ازای $R=5,10,15$، ارزیابی گردیده است. جدول (۴) نتایج حاصل از این آزمایش را نشان می‌دهد. نتیجه این آزمایش نشان می‌دهد با افزایش پارامتر R، احتمال تشخیص گره‌های کپی نیز افزایش می‌یابد. در ادامه، دلیل این نتیجه را با یک نکته مهم شرح می‌دهیم:

دشمن به دو صورت می‌تواند با راه‌اندازی حمله گره‌های کپی، عملکرد شبکه را مختل کند. شیوه اول این است که دشمن تعداد زیادی گره قانونی درون شبکه را ضبط کرده و از روی هر کدام فقط تعداد اندکی (به عنوان مثال ۲ یا ۳ کپی) گره کپی ایجاد و در شبکه منتشر کند. در این حالت، الگوریتم‌های امنیتی به سختی و حتی ممکن است قادر به شناسایی گره‌های کپی نباشند. ولی پیش گرفتن این روش برای دشمن سخت و زمان‌بر است. چراکه باید گره‌های زیادی را ضبط، کدگشایی، برنامه‌ریزی مجدد و کنترل کند. شیوه دوم این است که دشمن تعداد گره‌های اندکی را ضبط کند ولی تعداد کپی‌های زیادی (به عنوان مثال ۱۰ کپی) از هر گره ضبط شده در شبکه منتشر کند. پیش گرفتن این شیوه، برای دشمن ساده و امکان‌پذیر است. ولی الگوریتم‌هایی امنیتی در این حالت ممکن است سریع‌تر و دقیق‌تر اقدام به شناسایی گره‌های کپی کنند. نتیجه این آزماش نیز نشان داد الگوریتم پیشنهادی به ازای Rهای بزرگتر، سریع‌تر گره‌های کپی را شناسایی می‌کند. چراکه، اگر تعداد کپی‌های زیادی از یک گره خاص، نظیر u، در شبکه موجود باشد، گره‌های نگهبان تعداد دفعات بیشتری این گره u را ملاقات می‌کنند و در نتیجه احتمال متناظر با عمل این گره u در عامل‌های یادگیر سریع‌تر افزایش می‌یابد و به سمت 1 میل می‌کند. هم‌چنین، نتایج این آزمایش نشان داد، تغییر در پارامتر R، تأثیر چندانی بر معیار احتمال تشخیص غلط الگوریتم پیشنهادی ندارد و نرخ این معیار تقریبا بین ۰/۳% تا ۰/۴% می‌باشد.



شکل (۳)تأثیر پارامتر ψ بر احتمال تشخیص الگوریتم پیشنهادی



شکل (٤) تأثیر پارامتر ψ بر احتمال تشخیص غلط الگوریتم پیشنهادی

جدول(۲) تأثیر پارامتر n بر کارایی الگوریتم پیشنهادی به ازای $\psi=350$

	n=100	n=200	n=300
احتمال تشخیص	100%	96%	92%
احتمال تشخیص غلط	0%	0.9%	1.4%

جدول(۳) تأثیر پارامتر n بر کارایی الگوریتم پیشنهادی به ازای $\psi=500$

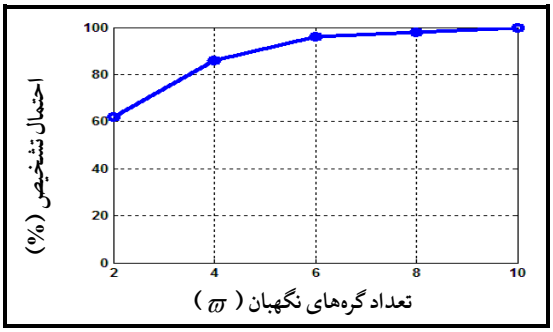
	n=100	n=200	n=300
احتمال تشخیص	100%	98%	94.5%
احتمال تشخیص غلط	0%	0.5%	1%

جدول (٤) تأثیر پارامتر R بر کارایی الگوریتم پیشنهادی

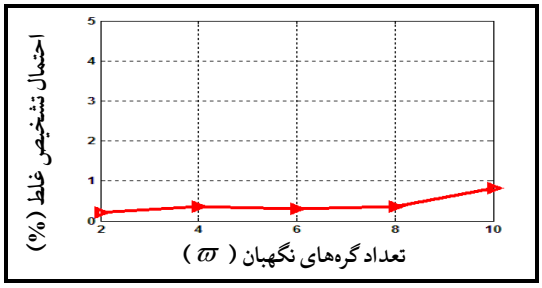
	R=5	R=10	R=15
احتمال تشخیص	70%	100%	100%
احتمال تشخیص غلط	0.38%	0.37%	0.32%

آزمایش ۴: هدف این آزمایش، بررسی تأثیر تعداد گره‌های نگهبان، ϖ، بر کارایی الگوریتم پیشنهادی است. در این آزمایش پارامترهای $M=5,\ \ n=100,\ \ R=10,\ \ \psi=600$ تنظیم شده و احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط گره‌های کپی در الگوریتم پیشنهادی را به ازای $\varpi=2,\ldots10$ ارزیابی نموده‌ایم. شکل‌های (۵) و (۶) نتایج این آزمایش را به

ترتیب در قالب احتمال تشخیص و احتمال تشخیص غلط نشان می‌دهند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد با افزایش تعداد گره‌های نگهبان در شبکه، احتمال تشخیص گره‌های کپی نیز افزایش می‌یابد. دلیل این نتیجه این است که با افزایش تعداد گره‌های نگهبان در شبکه، نواحی بیشتری از شبکه تحت پوشش نظارت این گره‌های نگهبان قرار می‌گیرد. از این‌رو، احتمال شناسایی تمامی گره‌های بدخواه در شبکه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، همان‌طور که در بخش ۵-۴ اشاره شد، این احتمال وجود دارد برخی گره‌های نرمال (نظیر u) به تصادف به تعداد دفعات زیادی در همسایگی یک گره نگهبان خاص (نظیر W) ظاهر شود که این سبب می‌شود احتمال متناظر با عمل گره u در P_vector گره نگهبان W افزایش یابد (به سمت ۱ نزدیک شود). درنتیجه، در فاز سوم الگوریتم پیشنهادی، گره u به اشتباه توسط گره نگهبان W به عنوان گره کپی تشخیص داده می‌شود. افزایش تعداد گره‌های نگهبان در شبکه، سبب افزایش حالت منجر به تشخیص غلط می‌شود. زیرا احتمال اینکه یک گره غیرکپی به‌تصادف و به دفعات زیادی در همسایگی یک گره نگهبان ظاهر شود، افزایش می‌یابد.



شکل (٦) تأثیر پارامتر ϖ بر احتمال تشخیص الگوریتم پیشنهادی



شکل (۷) تأثیر پارامتر ϖ بر احتمال تشخیص غلط الگوریتم پیشنهادی

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوریتم جدید، هوشمند و سبک‌وزن به کمک عامل‌های یادگیر جهت شناسایی گره‌های کپی در شبکه‌های حسگر متحرک ارائه گردید. الگوریتم پیشنهادی توسط شبیه‌ساز JSIM پیاده‌سازی گردید و نتایج آزمایش‌ها نشان داد، الگوریتم پیشنهادی کارایی مطلوبی در شناسایی گره‌های کپی دارد. مشکل الگوریتم پیشنهادی، سرعت کم در همگرایی عامل‌های یادگیر است (به خصوص هنگام زیاد شدن تعداد گره‌ها در شبکه). به‌کارگیری عامل‌های یادگیر سلولی می‌تواند یک راه‌کار موثر جهت برطرف نمودن این مشکل باشد که در کار بعدی خود به آن می‌پردازیم.

مراجع

[1] Yick J., Mukherjee B. and Ghosal D., "***Wireless sensor network survey***", Computer Networks 52, pp. 2292–2330, 2008.

[2] Karlof C. And Wagner D, "***Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Attacks and Countermeasures***", AdHoc Networks, 2003.

[3] Parno B., Perrig A., and Gligor V. D., "***Distributed Detection of NodeReplication Attacks in Sensor Networks***", in: Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy, 2005.

[4] Conti M., Pietro R. D., and Mancini L. V., "***A Randomized, Efficient, and Distributed Protocol for the Detection of Node Replication Attacks in Wireless Sensor Networks***", In: Proc. of the ACM MobiHoc, 2007.

[5] Conti M., Pietro R. D., Mancini L. V., and Mei A.,"***Distributed Detection of Clone Attacksin Wireless Sensor Networks***", IEEE TRANSACTIONS ON DEPEDABLE AND SECURE COMPUTING, 2010.

[6] Choi H., Zhu S., and Porta T. F. La, "***SET: Detecting Node Clones inSensor Networks***", in: Proc. of the SecureComm '07, pp. 341–350, 2007.

[7] Zhu B. and et al., "***EfficientDistributed Detection of Node Replication Attacks in Sensor Networks***", in: Proc. of theAnnual Computer Security Applications Conference (ACSAC), 2007.

[8] Kim C., Park C., Hur J., Lee H., and Yoon H., "***A Distributed Deterministic and ResilientReplication Attack Detection Protocol inWireless Sensor Networks***", in: Proc. of the Communications in Computer and Information ScienceVolume 56, pp 405-412, 2009.

[9] Zeng Y., Cao J., Zhang S., Guo S., and Xie L., "***Random-Walk Based Approach to Detect Clone Attacks in Wireless Sensor Networks***", In: Proc. of the IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 28, NO. 5, 2010.

[10] Yu C.-M., Lu C.-S., Kuo S.-Y., "***CSI: Compressed Sensing-Based Clone Identification in Sensor Networks***", in: Proc. of the 8th IEEE International Workshop on Sensor Networks and Systems for Pervasive Computing, 2012.

[11] C. KIM, SHIN S., PARK C. and et al.,"***A Resilient and Efficient Replication Attack Detection Schema for Wireless Sensor Network***", IEICE TRANS. INF. & SYST., VOL. E92-D, NO. 7, 2009.

[12] Yu C. M., Lu C. S., and Kuo S. Y., "***Mobile Sensor Network ResilientAgainst Node Replication Attacks***" In: Proc. of the IEEE Conference onSensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2008.

[13] Ho J.-W., Wright M., and Das S., "***Fast detection of replica nodeattacks in mobile sensor networks using sequential analysis***", In: Proc. of the IEEE INFOCOM, pp. 1773 – 1781, 2009.

[14] Ho J.-W., Wright M., and Das S., "***Fast Detection of Mobile Replica Node Attacks in Wireless Sensor Networks Using Sequential Hypothesis Testing***", IEEE TRANS. ON MOBILE COMPUTING, VOL. 10, NO. 6, 2011.

[15] Unnikrishnan D. and et al.,"***Detecting Mobile Replica Node Attacks in Wireless Sensor Networks Using Sequential Probability Ratio Test***", in: Proc. of the 13th International Conference on Distributed Computing and Networking (ICDCN), Hong Kong, China, January 3-6, 2012.

[16] Yu C.-M., Lu C.-S., and Kuo S.-Y., "***Efficient and DistributedDetection of Node Replication Attacks in Mobile Sensor Networks***", In: Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conf. Fall (VTC Fall),.2009.

[17] Gowtham B., Sharmila S., "***Location Traced Hybrid Detection of Node Replication Attack in Mobile Wireless Sensor Network***", In: Proc. of the Special Issue of International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) on Information Processing and Remote Computing – IPRC, August 2012.

[18] Deng XM, Xiong Y., "***A new protocol for the detection of node replication attacks in mobile wireless sensor networks***", Journal of Computer Science and Technology26(4),pp. 732-743, 2011.

[19] Yxainaxniga Y. and et al," ***Single Hop Detection of Node Clone Attacks in Mobile Wireless Sensor Networks***", In: Proc. of the International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), Vol.29, 2012.

[20] Xing K. an Cheng X., "***From Time Domain to Space Domain: Detecting Replica Attacks in Mobile Ad Hoc Networks***", In: Proc. of the IEEE INFOCOM, 2010.

[21] Bloom B H., "***Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors***", *Commun. ACM*, Vol. 13(7), pp. 422-426, 1970.

[22] Narendra K. S. and Thathachar M. A. L., *"**Learning automata: An introduction**"*, in: Proc. of the Prentice Hall, 1989.

[23] Narendra K. S. and Thathachar M. A. L., *"**Learning automata a survey**"*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 4, no. 4, 1974.

[24] Shi E., Perrig A., "***Designing secure sensor networks***", *IEEE Wireless Communications,Vol. 11, pp.* 38–43, *2004*.

[25] Tumrongwittayapak C. and Varakulsiripunth R., "***Detecting Sinkhole Attacks In Wireless Sensor Networks***", in: Proc. of the ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka International Congress Center, Japan, 2009.

[26] Piro C., Shields C. and Levine B. N. , "***Detecting the Sybil Attack in Mobile Ad hoc Networks***", in: Proc. of the *Securecomm and Workshops*, 2006.

زیرنویس‌ها

[1] node replication attack
[2] Replica node
[3] keying materials
[4] Observer Nodes
[5] P-Model
[6] SensorNodes
[7] WatchdogNodes
[8] Keep alive message