Electronic & Cyber Defense
Vol. 13, No. 3, 2025 (Serial No. 51). pp. 17- *40*
ISSN: 2322-4347, E-ISSN: 2980-8979

Improving The Security of the Anonymous Network Using QMNTR Encryption

Mohammad Mahdi Daneshvar Jalairi [1], **Parviz Rashidi khazaee*** [2]
[1] Master's student, Urmia University of Technology, Urmia, Iran. Email: m.m.daneshvar@it.uut.ac.ir
[2] Assistant Professor, Urmia University of Technology, Urmia, West Azarbaijan, Iran.
(Correspondence: p.rashidi@uut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Receive: 30 June 2025

Revise: 04 August 2025

Accept: 09 September 2025

Available online: 03 October 2025

Keywords:
Anonymity Network Architecture
QMNTR encryption
LRS Digital Signature

ABSTRACT

In the context of the Internet and network, secure data exchange along with the anonymity of sender and receiver has been one of the main needs of users. Therefore, various types of anonymity networks have been designed and developed. The architecture of the anonymity network and the structural weakness of the encryption system used in them have caused numerous security problems. with the advancement of quantum computing, many attacks have been designed and successfully disrupted the security of the anonymity network. Various mechanisms have been proposed to improve the security of anonymous networks, some of which are only theoretical and cannot be implemented, and others have serious weaknesses and vulnerabilities that cannot be used. The breaking of Encryption systems, the vulnerability of classic digital signatures, and non-resistant cryptographic algorithms against quantum attacks are among the important weaknesses of the architecture of anonymous networks. To overcome these challenges, a secure structure using a QMNTR encryption system and LRS digital signature based on the onion routing structure has been proposed to secure the anonymous network. The results of Research and technical evaluation show that the proposed architectural structure improves the ability to deal with all kinds of threats and ensures the reliability of relays in the anonymity network. In addition, with appropriate time complexity, the security of key distribution has increased and the communication overhead has been reduced. Using an LRS digital signature has also helped improve the anonymous network's security and has achieved acceptable performance.

Cite this article: Daneshvar Jalayeri, M. M., & RASHIDI KHAZAEE, P. (2025). Improving anonymity network security using QMNTR encryption. *Electronic and Cyber Defense*, *13*(3), 17- 40. 2025

DOI: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1404.13.3.3.2

Publisher: Imam Hossein University

«پدافند الکترونیکی و سایبری»
سال سیزدهم، شماره 3، پاییز 1404، ص 40- 17
شاپا الکترونیکی: 4347 -2322 شاپا چاپی: 8979- 2980

بهبود امنیت شبکه گمنامی با استفاده از رمزنگاری *QMNTR*

محمدمهدی دانشور جلایری [1]، پرویز رشیدی خزاعی [2*]

[1] دانشجو کارشناسی ارشد فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی ارومیه. ایمیل m.m.daneshvar@it.uut.ac.ir

[2] استادیار، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه،ایران. (نویسنده مسئول: p.rashidi@uut.ac.ir)

چکیده

در بستر اینترنت و شبکه، تبادل امن داده‌ها به همراه گمنامی فرستنده و گیرنده یکی از نیازهای اصلی کاربران بوده است. ازاین‌رو، انواع شبکه‌های گمنامی طراحی و توسعه پیداکرده‌اند. معماری شبکه گمنامی و ضعف ساختاری سیستم رمزنگاری به‌کاررفته در آن‌ها باعث بروز مشکلات امنیتی متعددی شده است و با پیشرفت پردازش‌های کوانتومی، حملات متعددی طراحی و به‌طور موفقیت‌آمیزی امنیت شبکه گمنامی را مختل کرده است. سازوکارهای مختلفی برای بهبود امنیت شبکه‌های گمنامی ارائه‌شده است که برخی از آنان صرفاً جنبه نظری داشته و قابل پیاده‌سازی نبوده و برخی دیگر نیز دارای ضعف‌ها و آسیب‌پذیری‌های جدی هستند که قابلیت استفاده ندارند. شکسته شدن دستگاه‌های رمزنگاری، آسیب‌پذیر بودن امضاءهای دیجیتال کلاسیک و الگوریتم‌های رمزنگاری غیر مقاوم در برابر حملات کوانتومی ازجمله ضعف‌های مهم معماری شبکه‌های گمنامی می‌باشند. برای غلبه بر این چالش‌ها، ساختاری امن با به‌کارگیری سیستم رمزنگاری *QMNTR* و امضاء دیجیتال *LRS* مبتنی بر ساختار مسیریابی پیازی، جهت امن سازی شبکه گمنامی پیشنهادشده است. نتایج بررسی‌ها و ارزیابی فنی نشان می‌دهد ساختار معماری پیشنهادی توانایی مقابله با انواع تهدیدات را بهبود داده و باعث تضمین قابلیت اطمینان به رله‌ها در شبکه گمنامی شود. به‌علاوه، با پیچیدگی زمانی مناسب، امنیت توزیع کلید را افزایش و سربار ارتباط را کاهش داده است و با به‌کارگیری امضاء دیجیتال *LRS*، به ارتقای امنیت شبکه گمنامی کمک نموده است و کارایی قابل قبولی نیز دارد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی- پژوهشی

دریافت: 09 تیر 1404

بازنگری: 13 مرداد 1404

پذیرش: 18 شهریور 1404

ارائه آنلاین: 11 مهر 1404

کلیدواژه‌ها:

ساختار شبکه‌های گمنامی

امضاء دیجیتال

رمزنگاری QMNTR

امضاء دیجیتال LRS

استناد: دانشور جلایری, محمد مهدی ,رشیدی خزاعی, پرویز. (1404). ارتقای امنیت شبکه گمنامی با استفاده از رمزنگاری QMNTR. *پدافند الکترونیکی و سایبری*، 13(3)، ص 40-17. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1404.13.3.3.2

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

1. مقدمه

تاکنون روش‌های متعددی برای امن سازی، محرمانگی و یکپارچگی محتوای پیام‌های ردوبدل شده در بسترهای ارتباطی، ارائه‌شده است. شبکه‌های گمنامی [1] به‌طورکلی به‌منظور ایجاد بستر امن تبادل داده استفاده می‌شوند. پژوهشگران حوزه امنیت، گمنامی را [1] یک ویژگی امنیتی مهم تلقی می‌کنند و پیاده‌سازی آن را برای رسیدن به ارتباطی با ویژگی امنیت مضاعف لازم، می‌دانند. مسیریابی پیازی [2] یکی از برجسته‌ترین روش‌های طراحی یک شبکه‌ی گمنامی است [2] که در چهار دهه گذشته معرفی و به‌صورت گسترده‌ای از آن استفاده‌شده است [3]. ساختار آن بر شبکه چند رله‌ای پایه‌گذاری شده و برای ارتباط با هر رله یک بستر امنیتی مستقل ایجاد می‌کند. آغاز پروژه شبکه گمنامی در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی دریایی ایالات‌متحده بود که در اواخر سال 2003 توسعه این پروژه به خارج از ارتش آمریکا برای بهبود امنیت و حریم خصوصی کاربران اینترنت تحت عنوان سامانه تُر [3] سپرده شد. تُر به‌سرعت در بستر اینترنت مورد اقبال عمومی قرار گرفت، طوری که در ژانویه سال 2010 حدود 1000 رله عمومی داشت و این تعداد در ژانویه 2015 به 8000 رله افزایش یافت که امروزه دارای حداقل 7000 رله [4] تثبیت‌شده است. ازآنجاکه این شبکه همواره بستری برای فعالیت‌های مخرب نیز بوده است رقیب جدی برای دولت‌هایی محسوب می‌شود که به دنبال ایجاد نظارت و محدودیت در بستر اینترنت هستند به‌عنوان‌مثال دولت روسیه طی یک مسابقه‌ای که در جولای 2014 برگزار شد عنوان کرده بود درصورتی‌که هر شهروند روسی بتواند باعث ایجاد رخنه و خراب‌کاری در شبکه تُر بشود 110000 دلار پاداش دریافت می‌کند. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است شبکه گمنامی هنوز هم آسیب‌پذیر است [4]. پژوهشگران برای بهبود امنیت شبکه گمنامی، سیستم رمزنگاری *NTRU* را جایگزین سیستم رمزنگاری کلاسیک *RSA* نموده و جهت حفظ حریم خصوصی از امضای دیجیتال از *NSS* به‌جای الگوریتم‌های چکیده ساز استفاده کردند که *NSS* به‌عنوان یک مکمل برای سیستم رمزنگاری *NTRU* به کار گرفته شد[5]. با توجه به آسیب‌پذیری‌های وارده طی چند سال گذشته در معماری *NTRU* که در بخش 3-5- به آن‌ها اشاره خواهیم کرد، ضرورت ایجاب می‌کند معماری شبکه گمنامی را بازطراحی کرده و آن را بهبود بخشیم. بدین منظور معماری شبکه گمنامی را موردبازنگری قرار داده و مطابق با معماری رمزنگاری شبکه گمنامی ساختار جدیدی پیشنهادشده است.

در این ساختار سیستم رمزنگاری *QMNTR* [6] جایگزین رمزنگاری کلاسیک خواهد شد که امضاء دیجیتال *LRS* [5] [7] نیز در کنار آن به‌کارگیری می‌شود. رمز و امضاء ارائه‌شده به‌عنوان یک جایگزین برای سیستم رمزنگاری کلاسیک جهت بهبود امنیت و عملکرد شبکه گمنامی معرفی خواهد شد. با استفاده از الگوریتم رمزنگاری *QMNTR*، به‌عنوان یکی از انواع نسل جدید دستگاه‌های رمزنگاری مقاوم در برابر حملات کوانتومی، با افزایش پیچیدگی الگوریتم نسبت به نسخه‌های پیشین خود باعث ارتقاء امنیت شبکه گمنامی خواهیم شد. به‌کارگیری امضاء دیجیتال *LRS* کمک خواهد کرد که ناشناسی بدون قید و شرط فراهم شود. همچنین به کار بردن امضاء دیجیتال *LRS* بسیاری از مشکلات امضاءهای حلقه معمولی را حل خواهد کرد و بسیار بهینه‌تر و امن‌تر خواهد بود[7].

دیدگاه پیتر شور جهت توسعه الگوریتم‌های کوانتومی چندجمله‌ای برای فاکتورگیری اعداد صحیح و محاسبه لگاریتم‌های گسسته، علاقه به محاسبات کوانتومی را به‌شدت افزایش داد. الگوریتم‌های پیتر شور [8] به‌سرعت فوق‌العاده‌ای نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک دست یافتند و برای مسائل خارج از حوزه مکانیک کوانتومی اعمال شدند و می‌توانند برای شکستن دستگاه‌های رمزنگاری استفاده شود [9]. درنتیجه بایستی در استفاده از رمزنگاری کلاسیک بازنگری جدی داشته باشیم و اگر بخواهیم بازهم از همان روش‌های کلاسیک برای تشکیل کلید استفاده کنیم، نیاز است کلید عمومی را با طول بیشتر از 2048 کیلوبیت انتخاب نماییم که به‌راحتی قابل شکسته شدن توسط پردازش‌های کوانتومی فعلی نباشد.

این موضوع خود مشکلات زیادی در بردارد ازجمله مهم‌ترین این مشکلات، موضوع ارتباطات بلادرنگ در روابط گمنام است. سنگین شدن کلید عمومی باعث افزایش تأخیر در تبادل اطلاعات در شبکه می‌شود که به توانایی پردازش در شبکه بستگی دارد، و صرفاً در شبکه با تأخیر بالا کارایی مناسب‌تری دارد. ازاین‌رو محققان اقدام به طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های رمزنگاری پیچیده، جدید و سبک مبتنی بر هم‌گشت یا کانولُوشِن [6] در ریاضیات کردند.

یکی از اولین انواع آن سامانه‌های رمزنگاری *NTRU* [7] بود[10]. این سیستم رمزنگاری یک نمونه از سامانه‌های رمزنگاری احتمالاتی است که پس از ابداع این سیستم رمزنگاری، انواع مختلفی از آن

[1] *Anonimity Networks*
[2] *Onion Routing*
[3] *Tor*
[4] *Relay*
[5] *linkable Ring Signatures*
[6] *Convolution*
[7] *Number Theory Research Unit*

توسط محققین با استفاده از ساختارهای جبری متفاوتی پیشنهادشده است که سیستم رمزنگاری *QMNTR* یکی از جدیدترین توسعه‌های *NTRU* اولیه است. امروزه محاسبات کوانتومی موردتوجه بسیاری از پژوهشگران قرارگرفته که ابداع انواع سامانه‌های رمزنگاری که اخیراً پس از *QMNTR* توسعه پیداکرده‌اند خود دلیل واضحی برای این موضوع است و می‌توان به سامانه‌های رمزنگاری *QOTRU,NTRSH,AHQTR, QOCNTR,QSTRU* اشاره کرد [11]. روش‌های مقاوم‌سازی پیشین در شبکه گمنامی بر اساس مؤلفه‌هایی نظیر: تغییر اندازه بسته به یک مقدار معین و استفاده از مؤلفه لایی گذاری (افزودن دنباله‌هایی از بسته‌ها و ترافیک ساختگی) عمل می‌کردند. گلوگاه اصلی این روش‌ها افزایش سربار چند صد برابری در پهنای باند و سربار زمانی، و به‌تبع آن عدم امکان استفاده عملی از روش‌های مقاوم‌سازی مبتنی بر این دو مؤلفه بود. عدم وجود پهنای باند کافی و عدم امکان افزایش طول کلید در معماری سیستم رمزنگاری و تسهیل در اجرای حمله منع سرویس و امکان حذف بسته‌های با اندازه ثابت حاصل از روش مقاوم‌سازی در رله اول (محل اعمال حمله)، عدم توانایی مؤثر در پیشگیری از وقوع دیگر حملات و حمله اثرانگشت [1] از دیگر مشکلات این روش‌ها بود. واضح است که شکستن مستقیم گمنامی از طریق پروتکل مورداستفاده در این معماری امنیتی معادل با شکستن الگوریتم رمز خواهد بود و فقط با استفاده از روش‌های پردازش کوانتومی شکستن الگوریتم رمز در شبکه گمنامی امکان‌پذیر است. پیشرفت قابل‌توجه در ارائه رویکردهای جدید برای طراحی انواع حملات بر روی شبکه‌های گمنامی و سامانه‌های رمزنگاری از یک‌سو و لزوم استفاده روزافزون از شبکه‌های گمنامی در بستر اینترنت از سوی دیگر، موجب ایجاد انگیزه‌ی بیشتر برای ارائه یک شبکه گمنامی مقاوم در برابر انواع حملات در بین پژوهشگران شده است. با توجه به اهمیت امنیت ارتباطات و حفظ گمنامی در کاربردهای آتی نظیر شبکه‌های اجتماعی و اینترنت اشیاء [2] و دیگر سامانه‌های گمنامی زیرساختی، ضرورت ارائه روش‌های مقاوم‌سازی جهت ارتقاء درجه گمنامی در کاربردهای گفته را تأیید می‌کند.

ازاین‌رو در چند سال اخیر، موج جدیدی از پژوهش‌ها برای ارائه انواع روش‌های مقاوم‌سازی پدید آمده است. در این پژوهش روشی برای تبادل کلید و رمزنگاری در سطح شبکه گمنامی بر اساس روش‌های پیشین ارائه‌شده است که به‌کارگیری و پیاده‌سازی آن در شبکه گمنامی باعث افزایش امنیت پیکره سیستم در برابر حملات کوانتومی و دیگر حملات مهم شد خواهد شد و به سهم خود نوعی اصلاح ساختار معماری در شبکه گمنامی برای مقابله با حملات جدید است. پروتکل توزیع کلید شبکه گمنامی با استفاده از الگوریتم رمزنگاری *QMNTR* و امضا دیجیتال *LRS* بهبود داده‌شده تا در برابر حملات تأثیر گزار بر روی تبادل کلید و انواع حملات مردمیانی در شبکه گمنامی مقاومت کافی داشته باشد. نتایج حاصل از پژوهش ارائه‌شده در مقایسه با پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد روش پیشنهادی در برابر انواع حملات شامل: حملات کوانتومی،منع سرویس [3]،تحلیل ترافیک [4]، و مردمیانی [5]، از مقاومت کافی برخوردار بوده و گمنامی بدون قید و شرط را در شبکه تأمین، و امنیت فرآیند توزیع و تبادل کلید را بهبود داده است.

ساختار مابقی مقاله به این شرح است که در بخش دوم ساختار شبکه گمنامی ارائه‌شده است. در بخش سوم تعریف مسئله و آسیب‌پذیری‌های شبکه گمنامی به همراه برخی از چالش‌های کنونی آن مطرح می‌شود. در بخش چهارم مشکلات فعلی معماری شبکه گمنامی بحث و بررسی‌شده که ضروری است بازطراحی معماری شبکه گمنامی با رعایت آن‌ها صورت گیرد. در بخش پنجم رمزنگاری *QMNTR* و امضاء دیجیتال *LRS* معرفی‌شده است. در بخش ششم نحوه پیاده‌سازی روش پیشنهادی تشریح شده است که در پایان قسمت آسیب‌پذیر پروتکل توزیع کلید به لحاظ امنیتی ارتقاء پیدا خواهد کرد. در بخش هفتم، روش پیشنهادی از جوانب مختلف تجزیه‌وتحلیل شده است که نتایج ارزیابی، بهبود امنیت شبکه گمنامی را نشان می‌دهد. در بخش هشتم نتیجه‌گیری و در بخش نهم نیز پیشنهادها و کارهای آتی در خصوص موضوع تحقیق ارائه‌شده است.

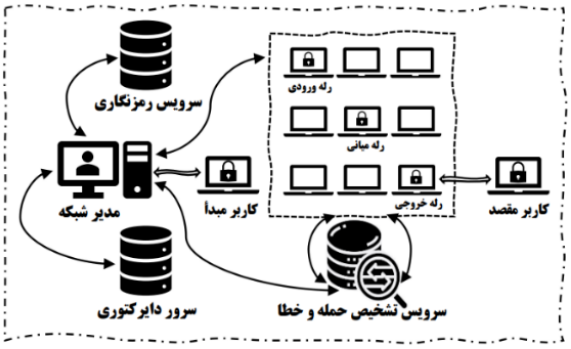
2. ساختار شبکه گمنامی پیشنهادی

یکی از اشتباهات رایج در طراحی شبکه گمنامی این است که کاربر شبکه به‌عنوان بخشی از شبکه گمنامی در نظر گرفته شود و خود وظیفه پیدا کردن رله‌های موجود در شبکه، انتخاب و تشکیل مسیر را بر عهده داشته باشد. به‌وسیله این نوع طراحی آسیب‌پذیر، فهرستی از تمامی سامانه‌های موجود در شبکه قابل‌استخراج است. علاوه بر این در صورت آلوده بودن سیستم کاربر شبکه گمنامی، امنیت زیرساخت شبکه گمنامی طراحی‌شده با چالش مواجه خواهد شد. مهاجم از طریق آلوده کردن سیستم کاربر مسیرهای ارتباطی را از طریق روش‌هایی مانند تجزیه‌وتحلیل ترافیک شناسایی کرده که با تغییر در الگوی جریان شبکه گمنامی، جریانی خاص به‌وسیله روش‌هایی نظیر

[1] *Fingerprint Attack*
[2] *Internet of Thing*
[3] *Denial of Services Attack (DOS)*
[4] *Traffic Analysis Attack*
[5] *Man-In-The-Middle (MITM)*

نشانه‌گذاری مبتنی بر فاصله [12] نشانه‌گذاری شده و در مرزهای خروجی شبکه آن جریان ردیابی می‌گردد. درنهایت پس از ره‌گیری شبکه اقدام به نفوذ در زیرساخت شبکه، تحلیل معماری و اجرای انواع حملات بر روی مؤلفه‌های مختلف شبکه گمنامی می‌کند.

با در نظر گرفتن موارد گفته‌شده ضروری است یک شبکه گمنامی ایمن، مقیاس‌پذیر و متمرکزتر مطابق روش پیشنهادی طراحی بشود که قابلیت به‌کارگیری در انواع کاربردها را داشته باشد و از آخرین مکانیسم‌ها و فناوری‌ها در پیاده‌سازی معماری آن استفاده شود. یک شبکه گمنامی را می‌توان به بخش‌های مختلفی تقسیم کرد که پیوند ناپذیری بین اجزای شبکه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بدین منظور اجزا و نحوه پیکربندی شبکه گمنامی را به همراه وظایف مؤلفه‌های آن به تفکیک در ادامه ارائه خواهیم کرد.



شکل (1): اجزای شبکه گمنامی پیشنهادی

2-1. اجزا شبکه گمنامی

مدیریت شبکه: وظیفه این نود تنظیم، مدیریت و پیکربندی ویژگی‌های هر یک از رله‌های موجود و کلیه ارتباطات و مدارهای تشکیل‌شده در بستر شبکه است و می‌تواند در هرجایی از بستر شبکه یا زیرساخت استقرار یابد به‌نحوی‌که بتواند با دیگر مؤلفه‌ها ارتباط برقرار کرده و دستورات مربوطه را ارسال کند که بنا به دلایل امنیتی باید ویژگی پیوند ناپذیری در برابر دیگر رله‌ها در آن رعایت شود.

مسیریابی پیازی و ایجاد مدار: ترافیک شبکه به‌وسیله معماری مسیریابی پیازی از طریق ایجاد مداری از گره‌ها تبادل می‌شود و هر گره صرفاً گره قبلی و بعدی خود را می‌شناسد. داده‌ها در شبکه گمنامی قبل از رسیدن به مقصد از چند گره عبور می‌کنند و به چنین انتخابی از گره‌ها مدار گفته می‌شود که هر مدار به مدت 10 دقیقه استفاده و بازیابی می‌شود [13]. برای افزایش عملکرد و ناشناسی شبکه این مسیر از طریق یک الگوریتم مسیریابی پیچیده انتخاب می‌شود که این الگوریتم گره‌ها را بر اساس پهنای باند گره انتخاب می‌کند.

گره‌هایی که پهنای باند بیشتری دارند، احتمال بیشتری دارد برای انتخاب در مدار به‌کارگیری شوند. قبل از ساخت یک مدار جدید یک مسیر تولید می‌شود، انتخاب این مسیر نیز محدودیت‌هایی دارد. به این صورت که یک روتر دومرتبه برای یک مسیر انتخاب نمی‌شود، بیش از یک روتر در یک زیر شبکه معین برای یک مسیر انتخاب نمی‌شود، و در آخر روتر های غیرقابل اجرا یا نامعتبر انتخاب نمی‌شوند مگر درصورتی‌که پیکربندی‌شده باشند [14].

رله *(relay)*: رله‌ها وظیفه دریافت داده از نود قبلی و انتقال آن به آخرین گره را بر عهده‌دارند. بسته‌های ارسالی و دریافتی در یک پروتکل مشخص‌شده طراحی و تبادل می‌شوند.

سرورهای دایرکتوری: مسیریابی پیازی [15] از یک مکانیسم غیر ایمن و غیرمتمرکز کشف گره به نام *In-band Status* استفاده می‌کرد که به این خاطر سرورهای دایرکتوری را طراحی کردند. گره‌های شبکه در این روش به‌جای این‌که اطلاعات مرتبط با خود را با گره‌های دیگر به اشتراک بگذارد می‌تواند از طریق امضاء کردن آن‌ها با سرور دایرکتوری شبکه گمنامی این کار را انجام دهند. گره‌ها بر اساس فلگ اختصاص داده‌شده توسط سرورهای دایرکتوری به چهار نوع طبقه‌بندی می‌شوند: گره‌های *Guard*، *Middel*، *Exit* و *Double* که به ترتیب با *G*، *M*، *E*، و *D* مشخص می‌شوند. گره‌هایی که دارای فلگ های *Guard* و *Exit* هستند *Dnode* به آن‌ها اختصاص داده می‌شود و گره‌هایی که دارای فلگ *Guard* و *Exit* نیستند *Mnode* در نظر گرفته می‌شود[16].

اگر P_m ، P_{en} و P_{ex} به ترتیب رله میانی[1]، رله ورودی[2]، و رله خروجی[3] باشند، وزن پهنای باند برای گره‌های شبکه گمنامی از نوع t که در موقعیت p در حال سرویس‌دهی هستند را می‌توان با $W_{p.t}$ نشان داد که در آن t برابر $t = G\ ,\ E\ ,\ M\ or\ D$ و p نیز برابر $p = P_{ex}\ ,\ P_{en}\ ,\ P_m$ است. در عمل سرورهای دایرکتوری شبکه گمنامی مقادیر $W_{p.t}$ را بر اساس چند قانون محاسبه و آن‌ها را در شبکه در یک فایل تجمیع و از طریق سرور دایرکتوری منتشر می‌کند. فرض کنید $B_{(ni)}$ و $T_{(ni)}$ به ترتیب پهنای باند و نوع گره در شبکه گمنامی باشند، احتمال تقریبی انتخاب گره ni برای سرویس‌دهی در مدار در موقعیت P را می‌توان بر اساس رابطه (1) تعیین کرد [17].

$$P_{(p.n)} = W_{p.T(ni)}\, B(n_i) \,/\, \Sigma_j W_{p.\ T(nj)}\, B(n_j) \quad (1)$$

سرویس تشخیص حملات و مدیریت خطا: ازآنجاکه مدیر شبکه تنها با رله‌های ابتدایی به‌صورت مستقیم ارتباط دارد و دستورات موردنظر خود را از همین طریق برای رله‌های میانی و انتهایی و

[1] *Middel Relay*
[2] *Guard Relay*
[3] *Exit Relay*

دیگر رله‌ها در سراسر شبکه ارسال می‌کند در صورت وجود خرابی یا قطعی دریکی از رله‌های میانی این امکان وجود دارد از یک رله به بعد بقیه رله‌های مدار در دسترس نباشند. به‌منظور حل این مشکل به‌طور خودکار با استفاده از داده‌های موجود در شبکه ادامه اتصال مدار از مسیر دیگری برقرار خواهد شد. در صورتی هم که رله قطع‌شده رله خروجی باشد با استفاده از داده‌های موجود آخرین رله مدار به‌عنوان رله انتهایی تعیین می‌شود و مدار از مسیر دیگری ارتباط خود را برقرار می‌کند تا رله میانی در هر مدار مشارکت داشته باشد.

دریافت و بررسی گزارش حملات و رویدادها در شبکه گمنامی یکی از مؤلفه‌های اصلی در حفظ امنیت و مدیریت رله‌ها است. سرویس تشخیص حملات و مدیریت خطا در شبکه رویدادها و گزارش‌های را دریافت می‌کند. این سرویس از طریق پروتکل *SNMP* و ترکیب توابع فیلتر توزیع ترافیک می‌تواند راه‌اندازی می‌شود. امروزه تجزیه‌وتحلیل ترافیک شبکه‌ها از طریق روش‌های یادگیری عمیق [18] و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی بدون ناظر [19] امکان‌پذیر است. دستورات شبکه گمنامی به دودسته تقسیم می‌شوند که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهیم کرد.

پورت‌های مختلفی نیز جهت برقراری ارتباط با رله تعیین می‌شود به‌عنوان‌مثال هر رله به‌جز پورت‌های کنترلی برای دریافت دستورات و پورت‌های داده‌ای برای تبادل داده، یک پورت مجزا برای گزارش‌های دارد. به این صورت که هر رله می‌تواند گزارش‌های خود را از طریق رله‌های میانی با ایجاد یک مدار آن‌ها را به سرویس تشخیص حملات و مدیریت خطا تحویل داده و پس از بررسی و پالایش برای مدیر شبکه گمنامی ارسال شود تا در مورد آن تصمیم‌گیری کند.

سرویس رمزنگاری شبکه: با توجه به نوع به‌کارگیری از سامانه گمنامی می‌توان آن را طوری طراحی کرد، که از طریق این سرویس حتی طول کلیدها و نوع الگوریتم رمزنگاری را مشخص کرد که توسط مدیر شبکه در هنگام ایجاد مدار اولیه می‌تواند تعیین شود.

2-2. پیکربندی شبکه گمنامی

هر رله در شبکه بایستی دارای یک آدرس *IP* باشد، ازآنجایی‌که مدیر شبکه باید بتواند در صورت نیاز با رله‌ها ارتباط برقرار کند و بین مدیر و آن رله یک مدار تشکیل می‌شود.

کاربر برای اتصال به سرویس گمنامی باید با رله ابتدایی هر مدار ارتباط برقرار کند. رله خروجی در مدار وظیفه پاسخ به درخواست‌های کاربر را بر عهده دارد و بر اساس نوع درخواست پذیرفته‌شده از طریق رله‌های قبلی خود عمل خواهد کرد به‌نحوی‌که درخواست را طبق هر پروتکلی که دریافت کرده باشد متناسب با آن پاسخ خواهد داد.

درروش پیشنهادی دو نوع مدار می‌تواند تشکیل شود در نوع اول تشکیل مدار در شبکه مطابق سیستم کلاسیک شبکه گمنامی تُر از طریق 3 رله در هر مدار ایجاد می‌شود و در نوع دوم مدیر شبکه می‌تواند از بین رله‌های موجود چندین مدار با مسیرهای مختلف جهت امنیت بیشتر ایجاد کند. مدیر شبکه کلید عمومی نشست را بین گره‌ها به اشتراک می‌گذارد، با هر گره مسیریابی را در شبکه انجام می‌دهد یک شناسه مدار به نام *CellHeader* برای مدار تنظیم می‌کند و پس از ایجاد مدار فرآیند انتقال پیام را انجام می‌دهد. پیام دریافت شده را از طریق پروتکل مربوطه، به اولین رله در مدار رسانده و آن را باز می‌کند. پیام دریافتی به سلول‌هایی با اندازه ثابت 512 بایت که حاوی یک *Pyload* و یک *Header* در هر سلول است، تقسیم می‌شود.

از طریق کلیدهای عمومی که در مدار توسط مدیر شبکه به اشتراک گذاشته‌شده است رله موردنظر بسته داده را دریافت کرده و با کلید خصوصی خود یک‌لایه از رمزنگاری را پس از رمزگشایی آن حذف می‌کند و آدرس رله بعدی را به دست می‌آورد، این روند تا گره خروجی ادامه دارد تا پیام از طریق شبکه به‌صورت متن ساده به مقصد خود برسد. دستورات پیکربندی که از طریق مدیر شبکه گمنامی ارسال و مدیریت می‌شود، به دودسته دستورات کنترل گره‌های شبکه و دستورات کنترل جریان داده در شبکه تقسیم می‌شوند که در جداول شماره (1) و (2) نشان داده‌شده‌اند [16].

درخواست کاربر جهت اتصال به شبکه گمنامی از طریق پروتکل *TCP* در یک پورت و آدرس معین به مدیر شبکه می‌رسد و مدیر اتصال را به‌وسیله پروتکل تعریف‌شده برقرار کرده، سپس یک مدار جدید و یک مسیریاب خروجی برای آن انتخاب می‌کند. پایان دادن به جریان شبکه گمنامی مطابق یک جریان *TCP* است. برای آدرس‌دهی سلول‌های رله، کلاینت یک *Digest* به آن‌ها اختصاص می‌دهد که به‌طور مکرر در فرآیند تبادل داده، تشکیل مدار و رمزنگاری سلول‌ها تکرار می‌شوند. هنگامی‌که یک سلول به یک رله در مدار می‌رسد، سلول رمزگشایی می‌شود، اطلاعات لازم از هدر آن استخراج‌شده و برای رله بعدی ارسال می‌شود و یا به‌صف مدار خروجی (مدار فعال) می‌رود.

هر اتصال مدار دارای یک بافر خروجی است که از طریق آن داده‌ها را به رله بعدی به روش *FIFO* ارسال می‌کند. به‌طورکلی یک اتصال واحد در مدارهای متعدد به اشتراک گذاشته می‌شود، صف‌های مدار حاوی سلول‌ها در بافر خروجی مالتی پلکس

می‌شوند، اگر سلول‌ها به‌طور کامل از صف مدار به بافر خروجی منتقل شوند آن مدار به‌صورت غیرفعال بررسی می‌گردد.

در هر پرش یا اصطلاحاً یک هاپ، یکپارچگی شبکه گمنامی لازم است بررسی شود. هنگامی‌که یک کلاینت از طریق کلید عمومی خود با یک رله جدید ارتباط برقرار می‌کند، به‌وسیله‌ی امضاء دیجیتال تأیید داده‌ها صورت می‌گیرد.

عملیات‌های شبکه گمنامی طبق جداول (1) و (2) صورت می‌گیرد. شناسه مدار، شناسه سلول‌ها و مسیرها در شبکه گمنامی توصیه می‌شود به نحوی تعیین و پیاده‌سازی شوند که از دید مرکز فرماندهی و کنترل یا یک ناظر بیرونی خاصیت پیوند ناپذیری داشته باشند.

جدول (1): بسته دستورات کنترل گره‌های شبکه [16]

Circ ID	*CMD*	*Data*

جدول (2): بسته دستورات کنترل جریان داده [16]

Circ ID	*Relay*	*Stream ID*	*Digest*	*Len*	*CMD*	*Data*

3. آسیب‌پذیری رمزنگاری شبکه گمنامی

در بستر اینترنت، گمنامی موضوع بسیار مهمی است و به این منظور محققان انواع شبکه‌های گمنامی را طراحی کرده‌اند [4]. با ظهور پردازش‌های کوانتومی امنیت شبکه‌های گمنامی و دستگاه‌های رمزنگاری به‌کارگیری شده در آن‌ها با چالش‌های زیادی مواجه شده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهیم کرد[20].

3-1. شکسته شدن سامانه‌های رمزنگاری کلاسیک

با توسعه یافتن پردازش‌های کوانتومی و همچنین وقوع حملات جدید، بررسی ساختار رمزنگاری کلاسیک در شبکه‌های گمنامی ضروری است[20]. لزوم ارائه یک معماری مقاوم در برابر حملات کوانتومی باعث شده تا معماری رمزنگاری شبکه گمنامی بازبینی و اصلاح شود[5]. این حملات تأثیرات مخربی بر روی سامانه‌های رمزنگاری مبتنی بر لگاریتم گسسته و ریاضیات دارند به‌طوری‌که کلیدهای رمزنگاری به‌راحتی و درکسری از ثانیه از طریق فن‌های تجزیه اعداد قابل شکستن و شناسایی است[8].

3-2. آسیب‌پذیری الگوریتم‌های کوانتومی

جدول (3): حملات قابل‌اجرا در سامانه‌های رمزنگاری[22]

نوع رمزنگاری	حملات قابل‌اجرا
NTRU	*Brute force attack, attack on private key, meet in the middle attack, multiple transmission attack, lattice attack*
CTRU	*Brute force attack, attack on private key, meet in the middle attack, multiple transmission attack,attack on public key using Popov normal form*
MaTRU	*Brute force attack, meet in the middle attack, lattice attack*
QTRU	*Brute force attack, lattice attack, message expansion*
NNRU	*Brute force attack,meet in the middle attack,multiple transmission attack,lattice attack doesn't work.*
ETRU	*Brute force attack, attack on private key, meet in the middle attack, multiple transmission attack*
OTRU	*Brute force attack, meet in the middle attack, multiple transmission attack, message expansion*
ILTRU	*Brute force attack,attack on private key, meet inthe middle attack, multiple transmission attack*
GR-NTRU	*Brute force attack, attack on private key, meet in the middle attack, multiple transmission attack, lattice attack*

ابتدا پژوهشگران برای بهبود امنیت شبکه گمنامی سیستم رمزنگاری کلاسیک *RSA* را جایگزین سیستم رمزنگاری کوانتومی *NTRU* کردند این روش دارای ضعف‌ها [8] و آسیب‌پذیری‌هایی بود [21] که کارایی و امنیت شبکه گمنامی را از طریق حملات موفق بسیاری که امروزه بر روی این نوع از سامانه‌های رمزنگاری صورت می‌گیرد تحت تأثیر قرار می‌داد[4].

علاوه بر این پژوهشگران انواع حملات قابل‌اجرا بر روی هر یک از سامانه‌های رمزنگاری کوانتومی را بررسی کرده‌اند که در جدول شماره (3) به‌طور خلاصه به آن‌ها اشاره‌شده است.

3-3. حملات کوانتومی در شبکه گمنامی

حمله *Quantum Insert* در شبکه گمنامی به تغییر مسیر داده‌ها در پاسخ به نتایج مربوط است[23]، نوعی دیگری از حملات مربوط به افزونه‌های سمت مرورگر است. علاوه بر آن از سایر حملاتی که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد، حملات *Transmission-Time* است که از دسته حملات اثرانگشت محسوب می‌شوند و قابلیت حمله مردمیانی را ایجاد می‌کنند[24].

3-4. آسیب‌پذیری نسل دوم شبکه گمنامی

نسل دوم شبکه گمنامی با انجام اصلاحات عمیق ساختاری و بهبود معماری، توسط دینگلدین و همکاران[25] به کمک آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی ایالات‌متحده توسعه پیدا کرد. معماری ارائه‌شده توسط آن‌ها در فرآیند تبادل اطلاعات و تبادل کلیدهای رمزنگاری از الگوریتم‌های *AES-128* برای رمزنگاری

داده‌ها، الگوریتم *RSA-1024* جهت رمزنگاری کلید جلسات، و از الگوریتم تبادل کلید دیفی- هلمن *DH-1024* برای تبادل کلیدها به همراه تابع چکیده ساز *SHA-1* استفاده کرده و برای برقراری ارتباط بین رله‌های داخل شبکه از پروتکل *TLS* بهره‌برداری کرده‌اند که تمامی آن‌ها جزو الگوریتم‌های رمزنگاری کلاسیک بوده و دارای آسیب‌پذیری‌های بسیاری هستند و پرداختن به آن‌ها خارج از موضوع پژوهش خواهد بود.

3-5. مشکلات بازطراحی شبکه گمنامی با NTRU

بازطراحی معماری نسل دوم شبکه گمنامی نخستین بار توسط کرباسی و همکاران [5] او صورت گرفت و یک معماری جدید مبتنی بر سیستم رمزنگاری *NTRU* و امضاء دیجیتال *NSS* ارائه شد. درنتیجه معماری شبکه گمنامی در برابر برخی از تهدیدات و حملات کوانتومی بهبود پیدا کرد که آسیب‌پذیری‌ها و مشکلات معماری ارائه‌شده توسط آن‌ها در ادامه بررسی می‌شود.

3-5-1. رمزگشایی ناموفق NTRU

یکی از چالش‌های *NTRU* این است که گاهی عملیات رمزگشایی با موفقیت انجام نمی‌شود. از روش‌های مطرح‌شده برای حل این مشکل تنظیمات مناسب و انتخاب صحیح پارامترهای رمزنگاری است. با انتخاب صحیح پارامترها و تنظیمات اولیه مناسب هنگام رمزنگاری می‌توانیم احتمال عدم موفقیت در رمزگشایی را کاهش دهیم. اکنون حملاتی که از این آسیب‌پذیری بهره‌برداری می‌کنند نشان می‌دهد روش مطرح‌شده کارایی چندان مناسبی در عمل نداشته است و منجر به این می‌شود امنیت رمزنگاری *NTRU* را تحت تأثیر قرار دهد. به‌عنوان‌مثال در پژوهش صورت گرفته توسط گراهام و همکاران[26] تأثیر شکست‌های رمزنگاری [1] بر امنیت رمزنگاری *NTRU* به‌طور دقیق بررسی‌شده و همچنین حملاتی را مطرح کرده‌اند که از این شکست‌های رمزگشایی برای بازیابی کلید خصوصی استفاده می‌کنند. در مورد این آسیب‌پذیری و بازیابی کلید خصوصی از این طریق، جان آ.پرووس [27] در دانشگاه واترلو کانادا به رمزگشایی ناقص در سیستم رمزگشایی *NTRU* پرداخته و یک مدل حمله‌بر روی *NTRU* ارائه کرده است. همچنین در پژوهش صورت گرفته توسط نیتاج [28] نیز یک حمله برای بازیابی کلیدهای خصوصی ارائه‌شده است.

3-5-2. مشکلات PKI در توزیع سربار محاسبات رمزنگاری NTRU

رمزنگاری کلید عمومی، نیاز به احراز هویت دارد. احراز هویت کلید عمومی توسط یک گواهی کلید عمومی صادرشده از یک مرجع صدور گواهی در زیرساخت کلید عمومی (*PKI*) انجام می‌شود. این مرجع صدور گواهی مشکلاتی در توزیع سربار محاسبات، تأیید و ابطال گواهی‌ها دارد که کیونگ با بررسی این مرجع صدور گواهی، رمزنگاری بدون گواهی را ارائه کرده است. این روش مشکل مدیریت گواهی را در رمزنگاری با کلید عمومی، و مشکل ذخیره کلید در رمزنگاری مبتنی بر هویت را حل می‌کند، درنهایت برای ارتقا روش خود نیز راهکارهایی را ارائه کرده است[29].

3-5-3. حمله مردمیانی در تبادل کلید NTRU

سیلورمن و همکاران[30] از این روش جهت نفوذ به سیستم رمزنگاری *NTRU* استفاده کرده‌اند. در پژوهش انجام‌شده توسط کیونگ، عملیات تبادل کلید سیستم *NTRU* بررسی‌شده و نتایج آن اثبات کرده است که *NTRU* در معرض حمله مردمیانی قرار دارد. مشابه همین آسیب‌پذیری که گفته شد در مرحله مبادله‌ی کلید الگوریتم دیفی هلمن [2] نیز یافت شده است که با استفاده از *ZKP* [3] از آن جلوگیری شده است. (در رمزنگاری روشی است که طرف (اثبات‌کننده) می‌تواند به‌طرف (تصدیق‌کننده) ثابت کند بیانیه یا گواهی ارائه‌شده صحیح است).

این روش فقط صحت بیانیه را تصدیق می‌کند و هیچ اطلاعات اضافه‌ای را به‌جز این حقیقت که بیانیه واقعاً صحت دارد ارسال نمی‌کند). ویجی کومار و همکاران [31] از طرح *ZKP* برای حل مشکل حمله مردمیانی در *NTRU* استفاده کرده‌اند و نتایج آن‌ها نشان داد که حتی با *ZKP* نیز *NTRU* بازهم در برابر حملات مردمیانی آسیب‌پذیر است.

3-5-4. حمله ترکیبی مردمیانی در NTRU

یک روش ترکیبی جدید توسط خوشنویسان و منوچهری [32] مبتنی بر حمله معروف مردمیانی جهت نفوذ به سیستم رمزنگاری *NTRU* ارائه شد.

این روش دارای پیچیدگی زمانی و مکانی کمتری نسبت به سایر حملات همچون روش ونگ است. با توجه به موارد گفته‌شده مبادله کلید *NTRU* در معرض حمله مردمیانی قرار دارد که ارائه یک‌راه حل مناسب برای جلوگیری از این حمله‌بر روی *NTRU* هنوز یک مشکل غیرقابل‌حل تا به این لحظه بوده، و همواره به‌عنوان یک تهدید بزرگ برای این سیستم رمزنگاری محسوب می‌شود. گراهام [33] از طریق دست‌کاری مقادیر *NTRU* و ترکیب آن با این آسیب‌پذیری یک نوع حمله ترکیبی دیگری را بر روی این سیستم رمزنگاری پیاده‌سازی کرد.

---

[1] *Decryption Failure*

[2] *Diffie-Hellman*

[3] *Zero Knowledge Proof*

3-5-4. حملات پخشی بر روی *NTRU*

نوع دیگری از حملات بر روی این سیستم رمزنگاری، حملات پخشی[1] نام دارد که برای اولین بار توسط آستاد[32] مطرح شد. این نوع حمله مهاجم را قادر می‌سازد تا پیام ارسال‌شده توسط فرستنده را بازیابی کرده و آن را به چندین گیرنده تحویل دهد. دینگ و همکاران [34] یک حمله پخشی توسعه‌یافته دیگری به نام حملات پخشی جبر[2] ابداع کردند. این حمله یک پیام واحد را که چندین مرتبه با استفاده از کلیدهای عمومی *NTRU* رمزنگاری‌شده، بازیابی می‌کند.

3-5-5. الگوریتم رمزگشایی BDD

نقاط ضعف موجود در رمزنگاری *NTRU* سبب شد یک الگوریتم رمزگشایی کارآمد به نام *BDD*[3] [30] پیاده‌سازی و برای حمله به رمزنگاری *NTRU* استفاده شود.

3-5-6. حمله بازیابی پیام

از دیگر حملاتی که اخیراً بر روی سیستم رمزنگاری *NTRU* منتشرشده است، حمله بازیابی پیام[4] است که عملکرد آن توسط ماریوس [35] توصیف گشته و درنهایت موفقیت حمله اثبات‌شده است.

4. بهبود شبکه گمنامی

در بخش گذشته به ضعف‌های سیستم رمزنگاری شبکه‌های گمنامی اشاره کردیم. در این قسمت معایب معماری شبکه گمنامی را بر اساس پژوهش صورت گرفته توسط دینگلدین[36] بررسی کرده و در ادامه به ارائه راهکارهایی برای افزایش سرعت و بهبود شبکه گمنامی خواهیم پرداخت.

کنترل ازدحام: ازدحام را می‌توان از طریق به‌کارگیری یک پروتکل غیرقابل‌اعتماد مانند *UDP* برای پیوند های مابین رله‌های شبکه گمنامی بهبود بخشید. روش پیشنهادی دیگر برای کنترل ازدحام[5] در شبکه گمنامی به‌کارگیری پروتکل *PCTCP* است که توسط گلدبرگ [37] طراحی‌شده است و امنیت شبکه را از طریق پروتکل *IPSec* تأمین می‌کند. یک‌راه حل دیگر مهار کردن پروتکل‌هایی است که پهنای باند زیادی را در شبکه درخواست می‌کنند.

ظرفیت شبکه: طبق پروژه متریک [38] دانلود یک مگابایت در شبکه تّر حدود 6 ثانیه طول می‌کشد. با توجه به این‌که ترافیک از چندین رله عبور می‌کند مقدار کل داده‌های منتقل‌شده در شبکه چند برابر شده و پهنای باند استفاده‌شده در شبکه افزایش می‌یابد که در این حالت با داشتن n گره در مدار مقدار ترافیک منتقل‌شده در $2*(n+1)$ ضرب می‌شود. ازآنجایی‌که در معماری کلاسیک شبکه گمنامی به‌طور پیش‌فرض از 3 رله استفاده می‌شود که یک تبادل داده 1 گیگابایتی در آن منجر به هزینه‌ای برابر 8 گیگابایت می‌شود که با افزایش گره‌های مسیریاب در شبکه ظرفیت آن‌ها نیز باید افزایش پیدا کند.

انتخاب مسیر: الگوریتم انتخاب مسیر بار شبکه را به‌طور یکنواخت نمی‌تواند توزیع کند. در این حالت استفاده از یک الگوریتم مسیریابی بهتر می‌تواند ظرفیت کلی شبکه را افزایش دهد. آخرین پژوهش صورت گرفته در این زمینه الگوریتم طراحی‌شده در دانشگاه شیکاگو است که با ترکیب معیارهای مختلف، فرآیند انتخاب مسیر بین گره مبدأ و مقصد را انجام می‌دهد [39]، که پس‌ازآن پژوهش حسینیان [40] به‌طور کامل به ارزیابی و تفسیر الگوریتم مسیریابی شبکه تّر پرداخته است.

مدیریت تأخیر و خطاهای اتصال: کلاینت‌های شبکه گمنامی در مدیریت تأخیر و خرابی‌های اتصال عملکرد مناسبی ندارند. درصورتی‌که گسترش مدار با شکست مواجه شود کل مدار رها می‌شود. بر اساس ساختار شبکه گمنامی پیشنهادی می‌توان طوری شبکه را پیکربندی کرد که در صورت عدم موفقیت تشکیل مدار و یا خرابی آن ارتباط از طریق مسیر دیگری برقرار شود یا از طریق مرکز فرماندهی و کنترل مدیریت شود که مدیر شبکه نسبت به هرگونه اختلال در کمترین زمان آگاهی پیدا کند.

بارگیری داده‌ها از سرورهای دایرکتوری: بسیاری از هزینه‌های بالای شبکه گمنامی حاصل دانلود اطلاعات توسط کلاینت‌ها از سرورهای دایرکتوری و سربار اتصالات *TLS* بین گره‌های شبکه است. طبق گفته دینگلدین حذف رکورد خالی برنامه *TLS* می‌تواند سربار هدر *TCP/IP* را تا 6/3 درصد کاهش دهد. جایگزینی این مرجع مرکزی با یک جزء غیرمتمرکز در شبکه می‌تواند سربار شبکه را کاهش دهد و عملکرد آن را تا حدودی بهینه کند و به این معنی است که ما بیشتر دوست داریم ساختار شبکه گمنامی را غیرمتمرکز ببینیم. ساختار غیرمتمرکز دارای مشکلات خاص خود است. اگرچه تحقیقات زیادی در مورد تمرکززدایی شبکه گمنامی صورت گرفته است و به‌عنوان یک موضوع مهم مطرح است اما هنوز استفاده از روش‌های متمرکز مناسب‌تر است که معایب نبود سرورهای دایرکتوری را تشریح کردیم.

---

[1] *Broadcast Attack*
[2] *Algebra Broad Cast Attack*
[3] *Bounded Distance Decoding*
[4] *Message Recovery Attack*
[5] *Congestion Control*

5. معرفی رمزنگاری QMNTR و امضاء LRS

سیستم رمزنگاری *NTRU* به‌وسیله جبر کواترنیونی[1] با جایگزینی حلقه اصلی در *NTRU* بهبود پیدا کرد و ساختار جدیدی به نام *QTRU* معرفی شد که یک سیستم رمزنگاری چندبعدی است. *QMNTR* نیز بهبودیافته *QTRU* بوده که با استفاده از یک ساختار ریاضی جدید با دو کلید عمومی و پنج کلید خصوصی طراحی‌شده است، که این اصلاح سیستم کلید عمومی را قوی‌تر و ایمن‌تر کرده است. حسن یاسین [6] بر اساس یک ساختار ریاضی جدید با به‌کارگیری جبر کواترنیونی، *QTRU* را بهبود داده و آن را *QMNTR* نامیده است، و اثبات آن نشان می‌دهد که سیستم رمزنگاری *QMNTR* از *QTRU* هم ایمن‌تر است. *QTRU* یکی از توسعه‌های ابتدایی سیستم *NTRU* بود که توسط ملکیان و همکاران [41] طراحی، و ابداع شد.

سپس یک سیستم رمزنگاری کلید عمومی غیر انجمنی با سرعت‌بالا به نام *OTRU* پیاده‌سازی کردند [42]. این سیستم رمزنگاری با سرعت‌بالا هشت بردار داده را به‌صورت موازی در هر دور رمزنگاری می‌کند. *OTRU* اولین قدم در طراحی سامانه‌های رمزنگاری کلید عمومی با جبر غیر انجمنی بود که توانست به‌عنوان نقطه شروعی برای طراحی سایر سامانه‌های رمزنگاری غیر انجمنی با ساختار جبری متفاوت و ویژگی‌های بهتر شود. *NTRU* به 4 پارامتر که اعداد صحیح بودند بستگی داشت، که هرکدام از پارامترهای عمومی آن تعریف خاص خود را دارد. این پارامترها در رمزنگاری *QMNTR* به 8 پارامتر افزایش پیداکرده‌اند. لازم به ذکر است سیستم رمزنگاری *QMNTR* بهبودیافته سیستم *QTRU* است. در رابطه شماره (2) سطح امنیتی کلیدهای رمزنگاری این دو سیستم، با در نظر گرفتن پارامترهای عمومی آن‌ها مقایسه شده است[6].

$$QMNTR \left(\frac{N!}{(d_g!)^2(N-2d_g)!}\right)^4 \left(\frac{N!}{(d_u!)^2(N-2d_u)!}\right)^4 \left(\frac{N!}{(d_s!)^2(N-2d_s)!}\right)^4$$

$$QTRU \left(\frac{N!}{(d_g!)^2(N-2d_g)!}\right)^4 \qquad (2)$$

رابطه فوق جهت تخمین امنیت و احتمال موفقیت حملات، ارائه‌شده است که هر یک از عبارات به‌طور خلاصه یک فضای جستجو خاص را برای تخمین تعداد حالات یا گزینه‌های ممکن نشان می‌دهند. با توجه به ضرایب این دو سیستم رمزنگاری، سطح امنیتی کلید رمزنگاری *QMNTR* سه برابر *QTRU* بوده و سطح امنیت پیام در *QMNTR* دو برابر *QTRU* است. *QMNTR* ازنظر سرعت با توجه به جدول شماره (4) کمی ضعیف‌تر از *QTRU* عمل می‌کند. درنهایت با در نظر گفتن قدرت امنیتی و محاسبات پیچیده‌تر به لحاظ امنیتی عملکرد بهتری دارد [6].

جدول (4): مقایسه پیچیدگی الگوریتم‌های رمزنگاری[43]

شماره	الگوریتم	کلید	رمزنگاری	رمزگشایی
1	*NTRU*	*1Ć*	*1Ć and 1Ą*	*2Ć and 1Ą*
2	*BITRU*	*8 Ć*	*8Ć and 1Ą*	*16Ć and 1Ą*
3	*BOTRU*	*8 Ć*	*8Ć and 4Ą*	*24Ć and 4Ą*
4	*BCTRU*	*16 Ć*	*16Ć and 8Ą*	*32Ć and 12Ą*
5	*QTRU*	*16 Ć*	*16Ć and 4Ą*	*32Ć and 4Ą*
6	*PQTRU*	*32 Ć*	*32Ć and 4Ą*	*64Ć and 4Ą*
7	*NTRS*	*36 Ć*	*18Ćand 6Ą*	*45Ć and 6Ą*
8	*NTRSH*	*54 Ć*	*18Ćand 6Ą*	*189Ć and 6Ą*
9	*OTRU*	*64 Ć*	*64Ć and 8Ą*	*1024Ć and 8Ą*
10	*NTRTE*	*64 Ć*	*6Ć and 8Ą*	*96Ć and 8Ą*
11	*QOBTRU*	*64 Ć*	*64Ć and 8Ą*	*256Ć and 8Ą*
12	*QMNTR*	*80 Ć*	*80Ć and 4Ą*	*1088Ć and 4Ą*
13	*QOTRU*	*80 Ć*	*32Ćand 8Ą*	*38Ć and 8Ą*
14	*TOTRU*	*17 Ć*	*17Ć and 16Ą*	*1536Ć and 16Ą*
15	*HXDTRU*	*256 Ć*	*256Ć and 16Ą*	*4096Ć and 16Ą*

جدول (4) جزئیات الگوریتم‌های کوانتومی را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد که $\acute{C}$ میزان پیچیدگی ضرب کانوُلوشِن و $\acute{A}$ میانگین جمع چندجمله‌ای فرآیند رمزنگاری و رمزگشایی الگوریتم را نشان می‌دهد. در این جدول پیچیدگی تولید کلید رمزنگاری و رمزگشایی، به ترتیب از پایین به بالا مرتب‌شده است. منطقی است که با افزایش پیچیدگی الگوریتم، امنیت آن بهبود پیداکرده است، اما سرعت فرآیند رمزنگاری و رمزگشایی کاهش پیدا می‌کند [43].

به‌کارگیری *QMNTR* با توجه به ارثبری ویژگی‌های مثبت و قدرت سیستم رمزنگاری *NTRU* و دیگر دستگاه‌هایی نظیر *QTRU* به همراه مقاومت بالا و مناسب در برابر حملات کوانتومی همچنین به خاطر سنگین‌تر بودن محاسبات به‌کاررفته در سیستم رمزنگاری در مقایسه با سامانه‌های رمزنگاری دیگر به همراه کاربردهای عام دیگر این سیستم رمزنگاری شامل به‌کارگیری در رأی‌گیری الکترونیکی و تراکنش‌های مالی و به‌طورکلی برنامه‌هایی که به‌صورت هم‌زمان و توزیع‌شده از چندین منبع استفاده می‌کنند، می‌تواند کارایی مناسبی داشته و آن را از دیگر سامانه‌های رمزنگاری متمایز کند.

[1] *Quaternion Algebra*

همان‌طور که می‌دانیم نحوه رمزنگاری در شبکه‌های ترکیبی [1] به‌صورت لایه‌ای بوده که معماری ابتدایی تُر نیز این‌گونه است. روش پیشنهادی ما نیز مانند معماری پایه شبکه‌های گمنامی پیاده‌سازی می‌شود. در معماری شبکه کلاسیک تُر امنیت بیشتر بر اساس تعداد لایه‌ها بیان می‌شد و اکثر ارزیابی‌های امنیتی بر مبنای حداقل و حداکثر لایه‌های ارتباطی موردنیاز بود. درروش پیشنهادی علاوه بر ویژگی‌های فوق بر روی جنبه‌های دیگری مانند مقاومت در مقابل حملات کوانتومی و ارتقا امنیت سیستم توزیع کلید و رمزنگاری تأکید خواهیم کرد. به‌طورکلی با پیاده‌سازی رمزنگاری *QMNTR* و نسل‌های آینده این نوع از سامانه‌های رمزنگاری در ساختارهای گمنام ساز مبتنی بر شبکه می‌توان گام مهمی در راستای ارتقا این نوع شبکه‌ها برداشت.

کینگ و همکارانش برای کاهش سایز امضاء، ارتقای کارایی تولید امضاء و تأیید طرح *UALRS* [44] مبتنی بر مشبک‌ها در مطالعات صورت گرفته و آزمایش‌ها انجام‌شده یک طرح *LRS* مبتنی بر *NTRU* طراحی کردند که معماری آن در [7] توضیح داده‌شده است. پژوهشگران از طریق بررسی طرح‌های احراز هویت مختلف مبتنی بر مسائل فاکتورگیری اعداد صحیح بزرگ و لگاریتم گسسته، دریافتند که این دسته از طرح‌های احراز هویت در برابر حملات کوانتومی مقاومت کافی را ندارند، لذا بایستی به انتخاب و پیاده‌سازی طرح‌های ایمن‌تر که مقاومت مناسبی در برابر حملات کوانتومی دارند بپردازند[45].

امضاء دیجیتال *LRS* ناشناسی بدون قید و شرط را برای ما فراهم می‌کند و به کار بردن آن به‌جای توابع چکیده ساز، بسیار ایمن‌تر خواهد بود، که بسیاری از مشکلات امضاءهای حلقه معمولی را حل خواهد کرد. ناشناسی یا گمنامی بدون قید شرط بدین معنی است با فرض وجود 1 کاربر در *RS* احتمال وجود هر دشمنی باقدرت محاسباتی و زمان نامحدود، به‌درستی نشان داده شود. طراحی یک *RS* با ناشناسی بدون قید و شرط کار دشواری نیست.

درواقع اکثر طرح‌های سنتی *RS* می‌تواند ناشناسی بدون قید و شرط را برآورده کنند. این طرح امضاء دیجیتال احراز هویت سریع می‌تواند به‌عنوان یک مکمل برای بهبود امنیت سیستم رمزنگاری *QMNTR* پیاده‌سازی شود و از کلیدهای عمومی و خصوصی آن استفاده کند که از ویژگی‌های مهم آن می‌توان به جعل ناپذیری، نداشتن *Trap door* و امکان به‌کارگیری در سامانه‌های رمزنگاری مختلف اشاره کرد. درنهایت با به‌کارگیری امضاء دیجیتال *LRS* و احراز هویت داده‌های تبادل شده مهاجم داخل شبکه نمی‌تواند پیام‌ها و داده‌های جعلی خود را به کلاینت ارسال کند. در این حالت با احراز هویت داده‌های تبادل شده پیچیدگی بار محاسباتی که به‌کل شبکه اضافه می‌شود در کنار محاسبات سیستم رمزنگاری به قدرت پردازش قابل‌توجهی نیاز دارد که امروزه با افزایش توان محاسبات سامانه‌های پیشرفته امکان پردازش داده‌ها تا سطوح بسیار بالایی امکان‌پذیر است.

موفقیت‌آمیز نبودن عملیات رمزگشایی در برخی از حالت‌های خاص سیستم رمزنگاری *NTRU* یکی از چالش‌های مطرح‌شده این سیستم رمزنگاری است که راه‌حل مناسبی تاکنون برای آن ارائه نشده است.

پژوهشگران از این آسیب‌پذیری برای بازیابی کلیدهای خصوصی و طراحی انواع حملات بر روی *NTRU* استفاده کرده‌اند که به آن اشاره شد و در صورت استفاده از آن در شبکه گمنامی می‌تواند تهدید بزرگی برای امنیت و کارایی شبکه محسوب شود.

طراحی شبکه گمنامی پیشنهادی ضمن حل مشکلات مطرح‌شده، گمنامی را تا سطوح بسیار بالایی تضمین خواهد کرد. بهبود بخش آسیب‌پذیر پروتکل توزیع کلید با کارگیری امضاء دیجیتال *LRS* در رمزنگاری *QMNTR* و استفاده آن در شبکه گمنامی پیشنهادی، روش جدیدی بوده که تاکنون پیاده‌سازی نشده و علاوه بر آن تا به این لحظه هیچ‌گونه آسیب‌پذیری خاصی نیز در خصوص معماری پیشنهادی منتشرنشده است.

6. تشریح و پیاده‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش مطابق با معماری رمزنگاری شبکه گمنامی ساختار جدیدی پیشنهاد داده‌ایم. درروش پیشنهادی سیستم رمزنگاری *QMNTR* جایگزین *NTRU* خواهد شد که امضاء دیجیتال *LRS* در کنار آن به‌کارگیری می‌شود. بنابراین شبکه گمنامی طراحی‌شده علاوه برنداشتن آسیب‌پذیری‌های رمزنگاری *NTRU* در برابر حملات جدید کامپیوترهای کوانتومی نیز مقاومت بسیار بالایی خواهد داشت.

6-1. به‌کارگیری امضاء دیجیتال LRS در کنار سیستم رمزنگاری QMNTR

مشابه آنچه توسط کینگ پیاده‌سازی شده بود [7]، طرح امضاء دیجیتال *LRS* را می‌توان مانند دیگر طرح‌های امضاء دیجیتال [46] بر مبنای سیستم رمزنگاری *QMNTR* پیاده‌سازی کرد که در مرحله تولید کلید، سیستم رمزنگاری *QMNTR* و امضاء دیجیتال *LRS* هر دو بتوانند از یک کلید عمومی یکسان استفاده کنند. بر اساس این روش می‌توان حجم محاسبات در شبکه گمنامی را کاهش داد. کینگ و همکاران خود اثبات کارایی و امنیت طرح خود را بر اساس مدل امنیتی *UALRS* ارزیابی کرده‌اند که این مدل توسط *Liu* [7] ارائه‌شده است.

[1] *Mix Network*

درنهایت طرح *LRS* مبتنی بر *QMNTR* را نیز هم می‌توان از همان روش اثبات کرد. نتایج اثبات‌شده توسط کینگ و همکاران او نشان داد که طرح پیشنهادی آن‌ها ناشناسی بدون قید و شرط را برآورده می‌کند. همچنین جدیدترین و کارآمدترین طرح‌های امضاء توسط کینگ و همکاران او مورد تحلیل و بررسی قرارگرفته که این طرح عملکرد مناسب‌تری را نسبت به دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه به خود اختصاص داده است[44,47].

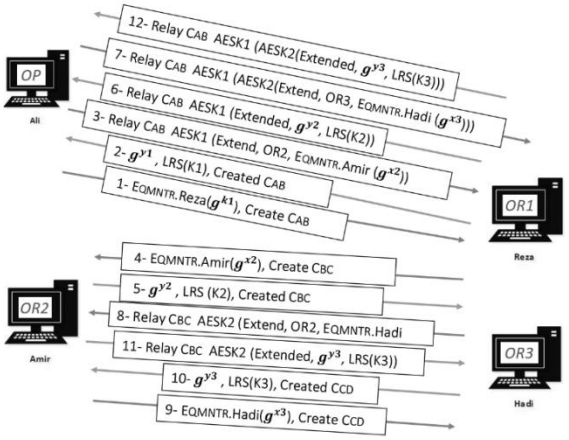
در ادامه با طراحی مجدد معماری شبکه گمنامی، جایگاه این دو فن را در سیستم رمزنگاری مشخص خواهیم کرد. لازم به ذکر است نحوه تولید کلیدها و فرآیند رمزنگاری و رمزگشایی سیستم رمزنگاری *QMNTR* در [6] آمده است. در این معماری امضاء دیجیتال *LRS* به دلیل توانایی‌های امنیتی بهتر، جایگزین بسیار مناسبی برای روش *NSS* بوده که می‌تواند امنیت ایجاد کلید جلسه و انتقال امن کلید را ارتقا دهد و غیر از محرمانگی کلید، هویت دارنده کلید، جعل ناپذیری، هویت پیام، یکپارچگی پیام، عدم انکار در ارتباطات و مهم‌تر از همه ناشناسی بدون قید و شرط را فراهم کند که نسبت به طرح پیشین خود یعنی *NSS* بسیار قوی‌تر است.

6-2. بهبود پروتکل توزیع

برای ارتقاء شبکه گمنامی از آخرین و قوی‌ترین فن‌های موجود جهت بهبود قسمت‌های آسیب‌پذیر خصوصاً پروتکل توزیع کلید استفاده می‌شود، که این بهبود در این بخش از طریق پیاده‌سازی معماری پیشنهادی صورت می‌گیرد.

علی به‌عنوان گره آغازین و ارسال‌کننده داده در شبکه گمنامی کار خود را شروع می‌کند، در ابتدا لازم است تا برای شروع ارتباط گمنام کلیدهای عمومی گره‌های میانی مدار را به دست آورد تا بتواند به‌صورت لایه‌ای اطلاعات را با الگوریتم *QMNTR* رمز کرده و به مقصد برساند. مسیرها از طریق *CircID* مشخص می‌گردند که در انتقال از هر لایه به لایه دیگر به سلول‌ها نیز تعلق‌گرفته تا داده‌ها به‌صورت گمنام تبادل شوند، طبق شکل (2) از علی به هادی مسیرهای C_{AB}، C_{BC} و C_{CD} تشکیل و کلیدهای عمومی گره‌های میانی نیز از طریق الگوریتم *QMNTR* تولیدشده‌اند. برای انتقال امن اطلاعات شبکه باید حداقل دارای3 گره میانی باشد.

مثال مطرح‌شده صرفاً برای تشریح عملکرد شبکه گمنامی با 2 گره صورت گرفته است که در شکل (2) هادی را رله خروجی در نظر می‌گیریم. اطلاعات بایستی به‌صورت بسته‌هایی از داده مرحله‌به‌مرحله ارسال شود و ترتیب ارسال نیز بر اساس قوانین شبکه گمنامی به انجام می‌شود.



شکل (2): مراحل توزیع کلید و ارسال پیام در شبکه

پس‌ازآن که اطلاعات مجموعه کلیدهای مسیر در اختیار علی قرار گرفت، مرحله تولید کلید جلسه آغاز می‌شود، لازم به ذکر است که این کلید صرفاً برای استفاده در همان مدار بوده و برای رمزنگاری در همان جلسه و نشست به کار می‌رود. در معماری جدید پیشنهادی ارائه‌شده برای انتقال نیمه کلید موردنظر در پروتکل توافق دیفی- هلمن لازم است تا نیمه کلید رمز شود، در این ساختار نیمه کلید اول توسط *QMNTR* رمز شده و نیمه کلید بعدی و همچنین کلید نهایی در سمت گره مقصد در آخر ایجاد می‌شود که با روش *LRS* امضاءشده و به مبدأ بازمی‌گردد. درنهایت پس از انتقال درست اطلاعات و بررسی آن در شبکه طبق معماری شبکه گمنامی کلیدهای *K1* تا *K3* تشکیل می‌شوند که همان کلیدهای جلسه و نشست در گره‌های میانی به شمار می‌روند. با توجه به این‌که ساختار توزیع کلید دیفی- هلمن از سیستم هشینگ قوی برای تبادل کلید استفاده می‌کند توافقات به صورتی تعیین می‌شود که در سراسر شبکه یکپارچگی حفظ گردد. امنیت پروتکل دیفی - هلمن مبتنی بر دشواری حل مسئله لگاریتم گسسته است که باید مواردی در ارتباط با امنیت این پروتکل لحاظ گردد. در این خصوص در بخش سوم به آسیب‌پذیری‌های سامانه‌های رمزنگاری مبتنی بر لگاریتم گسسته اشاره کردیم.

درصورتی‌که تحت شرایط خاصی این الگوریتم به‌کارگیری نشود شکستن امنیت این پروتکل و یافتن کلید رمز مشترک با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند پولیگ - هلمن نسبتاً آسان و در زمان کوتاهی قابل انجام خواهد بود [48]. به‌تازگی پژوهشگران حوزه رمزنگاری اقدام به پژوهش بر روی الگوریتم‌های تبادل کلید کوانتومی کرده، که هنوز قابلیت به‌کارگیری، مانند سامانه‌های رمزنگاری کوانتومی، به‌صورت عمومی را ندارند و به‌عنوان حوزه پژوهشی بسیار جدیدی مطرح‌شده‌اند [49،50].

به‌کارگیری رمزنگاری کوانتومی در رمزنگاری داده‌های تبادل شده نیز تا به این لحظه میسر نبوده و صرفاً می‌توان کلیدهای یک ارتباط را از طریق آن‌ها رمز کرده و امنیت کلیدهای رمزنگاری را از آن طریق ارتقاء داد. انتظار می‌رود در آینده‌ای بسیار نزدیک روند تکاملی موارد گفته‌شده به‌سرعت طی شود و به‌صورت عملی مورداستفاده قرار گیرد. مسئله مهم دیگری که مطرح است این است که امضاء دیجیتال *NSS* یک روش احراز هویت و امضاء دیجیتال مکمل سیستم رمزنگاری کلید عمومی *NTRU* بود.

ازآنجایی‌که *LRS* نیز پس‌ازآن برای *NTRU* طراحی‌شده است، ضروری است جهت به‌کارگیری *LRS* برای سیستم رمزنگاری *QMNTR* ملاحظات خاصی در نظر گرفته شود تا بتوانیم از این دو فناوری در کنار یکدیگر استفاده کنیم، که به آن اشاره کردیم. پس از توزیع درست کلید در شبکه گمنامی اطلاعات با الگوریتم ایمن *AES* رمز می‌شوند. در این معماری برای افزایش ضریب امنیتی الگوریتم *AES* از نوع 256 بیتی آن استفاده‌شده است. همان‌طور که می‌دانیم لایه‌های بیشتر در شبکه گمنامی می‌تواند ضریب امنیت را به‌صورت نمایی بالا ببرد، که در اینجا نشان‌دهنده اهمیت توزیع امن کلید در لایه‌های شبکه گمنامی است. درنهایت همان‌طور که شبکه گمنامی در برابر حملات کوانتومی بایستی مقاومت کافی داشته باشد با اصلاح کلی معماری شبکه گمنامی از طریق پیاده‌سازی طرح *LRS* مبتنی بر *QMNTR* امنیت شبکه گمنامی تا سطوح بسیار بالایی قابل تضمین خواهد بود.

6-3. مراحل رمزنگاری شبکه گمنامی پیشنهادی

مراحل رمزنگاری همواره بر مبنای معماری شبکه گمنامی در هر اصلاحی ثابت خواهد بود به این صورت که مطابق با روش‌های پیشین در مرحله اول با توجه به شکل شماره (3) ابتدا علی درخواست خود، مبنی برساخت کلید جلسه با رضا را به او ارسال می‌کند. این درخواست شامل یک‌نیمه کلید است که توسط کلید عمومی رضا و با رمزنگاری *QMNTR* رمز شده است. انتقال اطلاعات درنهایت صورت گرفته و در گره رضا رمزگشایی می‌شود. در مرحله دوم رضا در پاسخ کلید نهایی را تولید کرده و با روش *LRS* امضاء نموده و آن را به علی ارسال می‌نماید. در این مرحله کلید جلسه‌ی *K1* (ارتباط بین علی و رضا) تولید می‌گردد.

همین روند در مرحله سوم توسط علی اما برای توافق کلید با امیر انجام می‌شود. نکته مهم این است که اطلاعات موردنظر توسط کلید عمومی امیر رمز شده و با انتقال اطلاعات از مسیر رضا، برای وی قابل‌رؤیت نیست. در مرحله چهارم، پنجم و ششم تشکیل کلید جلسه‌ی *K2* (ارتباط بین علی و امیر) ایجاد می‌شود. در مرحله‌ی هفتم نیز نیمه کلید توافقی با هادی ارسال خواهد شد. توجه کنید که برای گذر از هر لایه (یعنی رضا و امیر) یک مرحله رمزنگاری و رمزگشایی با الگوریتم *AES-256* فراهم‌شده است. رضا با کلید *K1* اطلاعات لایه اول را رمزگشایی کرده و می‌داند که بسته باید برای امیر ارسال شود اما محتویات بسته را نمی‌داند چون از کلید جلسه‌ی *K2* اطلاعی ندارد. همچنین امیر بسته را با کلید جلسه‌ی *K2* رمزگشایی کرده و می‌داند بسته‌ای باید به هادی برسد. این تنها نمونه‌ای از نحوه رمزنگاری لایه‌ها و پروتکل‌های استفاده‌شده است که در دولایه میانی طراحی‌شده است. برای حفظ امنیت سیستم لازم است لایه‌ها به حداقل 3 لایه انتقال یابد که باعث افزایش مراحل خواهد شد. دستوره های به‌کاررفته در هر مرحله به شرح شکل شماره (2) است، که ارسال بسته داده از گره شماره 1 (علی) به گره شماره 4 (هادی) را توسط 2 گره میانی، از طریق پروتکل اصلاح‌شده شبکه گمنامی را نشان می‌دهد. پس از دریافت بسته (توافق نیمه کلید) توسط هادی، آخرین کلید نیز تولیدشده و همین مراحل رو به عقب اجرا می‌شوند، نهایتاً در مرحله‌ی دوازدهم کلیدهای *k1* تا *k3* توافق شده و می‌توان تبادل داده، و اجرای دیگر دستورات را از طریق شبکه گمنامی اصلاح‌شده آغاز کرد.

با افزایش تعداد گره‌های مسیر ارتباطی، تنها مجموع پردازش‌ها در شبکه گمنامی بیشتر می‌شود و تغییری در ماهیت و روش‌های رمزنگاری یادشده، انجام نخواهد شد. دستورات به‌کاررفته در مثال مطرح‌شده به ترتیب به‌صورت زیر است.

1- $\boldsymbol{E}_{QMNTR.Reza}(g^{x1})$, *Create* C_{AB}
2- g^{y1} , *LRS(K1), Created* C_{AB}
3- *Relay* C_{AB} *AESK1 (Extend, OR2,* $\boldsymbol{E}_{QMNTR.Amir}(g^{x2})$*)*
4- $\boldsymbol{E}_{QMNTR.Amir}(g^{x2})$, *Create* C_{BC}
5- g^{y2} , *LRS (K2), Created* C_{BC}
6- *Relay* C_{AB} *AESK1 (Extended,* g^{y2}*, LRS(K2))*
7- *Relay* C_{AB} *AESK1 (AESK2(Extend, OR3,* $\boldsymbol{E}_{QMNTR.Hadi}(g^{x3})$*))*
8- *Relay* C_{BC} *AESK2 (Extend, OR2,* $\boldsymbol{E}_{QMNTR.Hadi}(g^{x3})$*)*
9- $\boldsymbol{E}_{QMNTR.Hadi}(g^{x3})$, *Create* C_{CD}
10- g^{y3} , *LRS(K3), Created* C_{CD}
11- *Relay* C_{BC} *AESK2 (Extended,* g^{y3}*, LRS(K3))*
12- *Relay* C_{AB} *AESK1 (AESK2(Extended,* g^{y3}*, LRS(K3)))*

7. تجزیه‌وتحلیل روش پیشنهادی

همواره دغدغه طراحان و کاربران سامانه‌های گمنامی این بوده است که سامانه گمنامی مورداستفاده و طراحی‌شده بتواند سطح امنیتی قابل قبولی را ارائه کند. پژوهشگران این حوزه نیز به این بخش از مطالعات در مورد شبکه‌های گمنامی آن‌طور که شایسته است به آن نپرداخته‌اند. به‌غیراز روش محاسبه درجه گمنامی، تنها کار پژوهشی صورت گرفته در این خصوص مرتبط می‌شود به مقاله استیون مرداک [51] که نتایج او نشان می‌دهد توسعه‌ی انواع روش‌های اندازه‌گیری میزان گمنامی ارائه‌شده و به‌کارگیری معیارهای بهتر جهت ارزیابی سامانه‌های گمنامی اهمیت بالایی دارد، که تاکنون روش جامع و دقیقی در این حوزه ارائه نشده است.

مرداک صرفاً به شناخت و تبیین اهمیت این موضوع پرداخته و خود او نیز راه‌حل مناسبی ارائه نکرده است. طبق بررسی‌های انجام‌گرفته، برای ارزیابی امنیتی سامانه‌های گمنامی هنوز معیار ثابت و مشخصی ارائه نشده که بتوانیم به‌صورت عملیاتی آن را به‌کارگیری کنیم. از طرفی دیگر هر شبکه گمنامی اجزا و مؤلفه‌های خاص خود را دارد که ارائه یک معیار مشخص برای اندازه‌گیری سطح امنیتی آن، ارزیابی شبکه گمنامی را پیچیده‌تر می‌کند و می‌توان آن را به‌عنوان یک چالش در حوزه شبکه‌های گمنامی بررسی کرد. درروش پیشنهادی علاوه بر مبدأ و مقصد ارتباط، داده‌های تبادل شده نیز غیرقابل‌شناسایی هستند که در ادامه این بخش نتایج کلی حاصل از ارزیابی سامانه گمنامی پیشنهادی بررسی و در حد امکان با پژوهش‌های مرتبط مقایسه خواهد شد.

7-1. تحلیل روش پیشنهادی در برابر حملات تأثیرگذار بر روی تبادل کلید

در این بخش، مقاومت روش پیشنهادی در برابر چند حمله مهم، که بیشترین اثرگذاری را بر روی فرآیند توزیع و تبادل کلید در شبکه گمنامی دارند، بررسی‌شده است. طبق مطالعات صورت گرفته بر روی پژوهش‌های انجام‌شده در این خصوص، بیشترین حملاتی که بر روی پروتکل توزیع و تبادل کلید تأثیرگذار هستند در دسته‌بندی حملات مرد در وسط قرار می‌گیرند این حملات در شبکه گمنامی عبارت‌اند از :

- *Induced Tor Guard Selection*
- *Off-Path Mitm (Man in the middle Attack)*
- *Types of DOS Attacks*
- *BotNet Abuse*

آسیب‌پذیری‌های موجود در مرحله تبادل کلید باعث ایجاد فرصت مناسبی برای مهاجمان شبکه گمنامی شده است به‌نحوی‌که مهاجمان می‌توانند به‌راحتی خود را به‌عنوان یکی از رله‌های شبکه گمنامی معرفی کنند. ویژگی ناشناسی بدون قید و شرط و جعل ناپذیری در مرحله تبادل کلید، با استفاده از امضاء دیجیتال *LRS* در معماری شبکه منجر به تضمین قابلیت اطمینان به کلیه رله‌ها در شبکه گمنامی خواهد شد.

با به‌کارگیری ساختار پیشنهادی و با فرض این‌که مهاجم توانسته است سرویس تشخیص حملات و مدیریت خطا را دور بزند، تحت برخی شرایط خاص درصورتی‌که بتواند در ابتدای تشکیل مدار به کلیدهای عمومی رله‌ها دسترسی پیداکرده و یک نشست از طریق کلیدی که در اختیار دارد با دیگر رله‌های شبکه گمنامی ارتباط برقرار کند و سپس فرآیند تبادل کلید خود را با الگوریتم *LRS* انجام دهد، می‌تواند خود را به‌عنوان یکی از رله‌های شبکه معرفی کند.

در این حالت در وهله اول مهاجم باید از طریق تحلیل شبکه الگوریتم کاری آن را پیداکرده و سپس اقدام لازم را انجام دهد که کاری پیچیده، سخت، و غیرممکن خواهد بود و روش ما در برابر موارد گفته‌شده مقاومت کافی را دارد.

7-2. بهبود درجه گمنامی

درجه گمنامی دستگاهی است که در اجلاس فناوری افزایش حریم خصوصی (*PET*) در سال 2002 پیشنهاد شد. دو مقاله ایده اصلی استفاده از آنتروپی را به‌عنوان مبنایی برای اندازه‌گیری رسمی ناشناسی مطرح کردند که این ایده‌های ارائه‌شده با تفاوت‌های بسیار جزئی در تعریف نهایی درجه گمنامی بسیار مشابه یکدیگر بودند[52]. درجه گمنامی علاوه بر سامانه‌های گمنامی، امروزه معیاری برای اندازه‌گیری در حوزه‌هایی نظیر حریم خصوصی، بلاک چین، ارز دیجیتال، و... نیز است که در ادامه به آن بیشتر اشاره خواهیم کرد.

درحالت‌کلی‌حملات مختلفی بر روی معماری و ساختار شبکه گمنامی تأثیرگذار هستند، ازآنجایی‌که بسیاری از آسیب‌پذیری‌ها در شبکه گمنامی ناشی از ضعف الگوریتم‌های رمزنگاری است، استفاده از یک ساختار رمزنگاری ایمن و قدرتمند باعث ارتقاء درجه گمنامی و بهبود امنیت خواهد شد.

با توجه به آسیب‌پذیری‌های گفته‌شده در خصوص معماری روش‌های پیشین که از طریق پردازش‌های کوانتومی و موارد دیگر مورد مخاطره قرار می‌گرفتند، تحلیل مستقیم پروتکل می‌تواند به‌صورت عملی قابل انجام باشد. هرگونه شکست در گمنامی یا کاهش درجه گمنامی از طریق تحلیل مستقیم پروتکل، کاملاً وابسته به معماری امنیتی مورداستفاده در ساختار شبکه گمنامی است که روش ما در برابر این شکست مقاومت بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد. در اکثر سناریوهای مربوط به انتقال داده ازجمله بلاک چین، محاسبات ابری و *Edge Computing* فرستنده داده معمولاً می‌خواهد ناشناس باشد درحالی‌که برای گیرنده قابل‌اعتماد بودن داده‌ها اهمیت دارد. امضاء دیجیتال *LRS* یک فناوری خوبی است که ضمن برآوردن الزامات فوق می‌تواند به بهبود درجه گمنامی یک رابطه کمک کند. درجه گمنامی تنها معیار رسمی ارائه‌شده تا به این لحظه برای اندازه‌گیری میزان گمنامی یک عضو از میان یک مجموعه است. مفهوم درجه گمنامی به‌صورت یک طیف برای تمامی انواع گمنامی قابل‌تعریف بوده که از اصل آنتروپی نظریه اطلاعات در یک توزیع احتمال بهره می‌برد و بر اساس احتمالاتی که مهاجم پس از مشاهده سیستم به کاربران تخصیص می‌دهد محاسبه

می‌گردد. باید به این نکته اشاره کرد که در یک شبکه گمنام، درجه گمنامی را می‌توان با افزایش تعداد کاربران یا تعداد رله‌های میانی بهبود داد. اما باید توجه داشت که افزایش تعداد کاربران یا طبقات، باکم تأخیر بودن شبکه در تضاد است و بایستی شرایط کاربردی آن نیز موردتوجه قرار گیرد. لازم به ذکر است درصورتی‌که مدل حمله توسط مهاجم تغییر کند نتایج به‌دست‌آمده دیگر معتبر نیستند. پژوهشگران بین ناشناسی داده و ناشناسی اتصال تمایز قائل می‌شوند. ناشناسی داده به معنی فیلترینگ هر نوع شناسایی اطلاعات از داده‌های تبادل شده در یک برنامه خاص است و ناشناسی اتصال به معنی پنهان کردن هویت مبدأ و مقصد در طول تبادل داده‌ها است.

این نکته حائز اهمیت است که درجه گمنامی میزان ناشناسی اتصال را می‌تواند ارزیابی‌اند. اغلب سامانه‌های گمنامی کم تأخیر، درجه گمنامی مناسبی را ارائه می‌دهند اما با مشکل مقیاس‌پذیری مواجه هستند که این مسئله از طریق یک طراحی مناسب کنترل خواهد شد. درجه حریم خصوصی به تعداد رله‌های در معرض خطر در مقابل تعداد کل شرکت‌کنندگان در شبکه نیز بستگی دارد. منطقی است که با بهبود امنیت پروتکل توزیع کلید، درجه گمنامی نیز مطابق با آن افزایش پیدا کند.

درجه گمنامی با استفاده از رابطه (2) تعریف می‌شود، که در این رابطه $H(x)$ برابر با آنتروپی شبکه گمنامی پس از وقوع حمله و H_M معادل با بیشترین آنتروپی که شبکه گمنامی می‌تواند داشته باشد است[52].

$$d = \frac{H(x)}{H_M} \qquad (3)$$

که آنتروپی شبکه از طریق رابطه (3) محاسبه می‌شود. در رابطه pi برابر با احتمال انتخاب یک رله از میان N رله همسان است، که N برابر تعداد کل رله‌های موجود است.

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{N} pi \log_2(pi) \qquad (4)$$

در ضمن بیشترین درجه گمنامی زمانی حادث می‌شود که تمامی رله‌ها از احتمال یکسانی برای انتخاب شدن برخوردار باشند و درواقع احتمال هر رله برابر $\frac{1}{N}$ باشد. در این صورت مقدار H_M از رابطه (5) محاسبه می‌شود.

$$H_M = -\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N} \log_2\left(\frac{1}{N}\right) = -\log 2\,(N) \qquad (5)$$

با در نظر داشتن تعریف درجه‌ی گمنامی، مقدار آن عددی در بازه [0و1] است که درجه‌ی گمنامی صفر ("0") به مفهوم فاش و قابل‌اثبات بودن هویت فرستنده پیام و درجه‌ی گمنامی یک ("1") به معنای اینکه همه اعضاء مجموعه گمنامی با احتمال یکسانی فرستنده پیام می‌باشند، است.

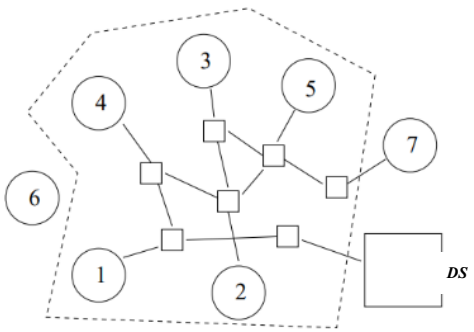
اولویت انتخاب رله‌ها برای قرارگیری در مدار شبکه گمنامی، بر اساس پهنای باند اعلام‌شده آن‌ها به سرور دایرکتوری است. با در نظر گرفتن شرایط گفته‌شده، میزان پایداری کیفیت ارتباط و همچنین یکسان بودن قدرت پردازش رله‌ها در کنار هم بایستی تحت یک استاندار خاص در نظر گرفته‌شده باشد که در صورت افت کیفیت سرویس برای برقراری ارتباط، مقیاس‌پذیری و شرط احتمال یکسان انتخاب رله‌ها در مدار بایستی تا حد قابل قبولی حفظ گردد. بررسی‌ها نشان داده است که درجه گمنامی برای ارزیابی سطح حریم خصوصی دستگاه‌ها و اندازه‌گیری مقدار اطلاعاتی که مهاجم با به‌کارگیری سناریوهای مختلف از طریق طراحی یک حمله خاص به دست می‌آورد کاربرد دارد [52].

انواع حملات و مدل‌های مختلف آن در شبکه گمنامی پیاده‌سازی شده است. به‌عنوان‌مثال مهاجمی را در نظر می‌گیریم که توانایی این را دارد تا مجموعه‌ای از مسیرهای ممکن را محدود کند و زیرمجموعه‌ای از اعضای شبکه گمنامی یا همان رله‌ها را به دست آورد که این زیرمجموعه حاوی فرستنده‌های احتمالی داده در سراسر شبکه گمنامی خواهند بود.

در این حالت به‌صورت انتزاعی می‌توان در نظر گرفت با انجام حمله *Brute Force* بر روی هرکدام از رله‌ها، تمام‌مسیرهای معکوس ممکن، به فرستنده/گیرنده را می‌شود به دست آورد. یا به‌جای این روش مهاجم می‌تواند برخی از رله‌ها را در اختیار خود داشته و تعدادی از رله‌های مجموعه شبکه گمنامی را حذف کند.

شکل شماره (4) نمونه‌ای کوچک از یک شبکه گمنامی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل درمجموع 7 رله در این سیستم وجود دارد و ما فرض می‌کنیم که مهاجم موفق شده است رله/کاربر شماره 6 و 7 را از مجموعه رله‌های فرستنده/گیرنده احتمالی حذف کند. اگر N اندازه مجموعه ناشناس یا شبکه گمنامی ما باشد حداکثر آنتروپی برای N کاربر برابر است با:

$$H_M = log_2(N) \qquad (6)$$



شکل (3): مثال درجه گمنامی[52].

تصور کنید که مهاجم زیرمجموعه‌ای از مجموعه ناشناس S را به دست آورده است که حاوی فرستنده/گیرنده احتمالی در شبکه هستند که اندازه زیرمجموعه S برابر با رابطه (7) است.

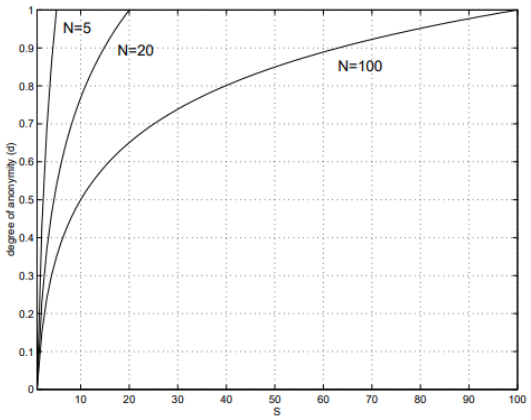
$$S = \ (1 \le S \le N\ ) \qquad (7)$$

با در نظر گرفتن این‌که مهاجم نمی‌تواند احتمالات متفاوتی را به کاربران متعلق به این زیرمجموعه اختصاص دهد بر اساس رابطه (8) خواهیم داشت:

$$pi = \frac{1}{S}.1 \le i \le s\ ;\ pi = 0\ .S + 1 \le i \le N \quad (8)$$

درنهایت با توجه به مثال مطرح‌شده، آنتروپی پس از حمله، و درجه گمنامی شبکه برابر با رابطه (9) است.

$$H(X) = log_2(S)\ .\ d = \frac{H(X)}{H(M)} = \frac{log_2(S)}{log_2(N)} \qquad (9)$$



شکل (4): درجه گمنامی محاسبه‌شده یک شبکه مبتنی بر مسیریابی پیازی را با توجه به مجموعه S برای $N=5$, $N=20$ و $N=100$ نشان می‌دهد[52].

با توجه به نمودار بالا و موارد گفته‌شده S تعداد رله‌های فرستند و گیرنده احتمالی در اختیار مهاجم و N تعداد کل رله‌ها است. به‌عنوان‌مثال برای به دست آوردن درجه گمنامی $d \ge 0/8$ داریم : برای $N=5$ به $S \ge 3$ نیاز داریم، برای $N=20$ کاربر به $S \ge 12$ نیاز داریم، و برای $N=100$ به $S \ge 40$ نیاز داریم. به این صورت که با افزایش S احتمال در اختیار داشتن رله‌ها توسط مهاجم کاهش می‌یابد و با کاهش آن مهاجم نمی‌تواند احتمالات متفاوتی را به کاربران متعلق به زیرمجموعه خودش اختصاص دهد.

معماری قدرتمند روش پیشنهادی، مقاومت بسیار بالایی در برابر نفوذ مهاجم و در اختیار گرفتن زیرمجموعه‌ای از کاربران شبکه دارد که از به دست آوردن هرگونه اطلاعات به‌وسیله‌ی سناریوهای مختلف توسط مهاجم در مورد شبکه گمنامی جلوگیری می‌کند و مهاجم قادر نیست احتمالات متفاوتی را به کاربران متعلق به زیرمجموعه‌ای که در اختیار دارد نسبت دهد. درنتیجه مهاجم امکان نفوذ نداشته و عملکرد مناسبی از خود در شبکه نشان نمی‌دهد که با توجه به شرایط گفته‌شده روش پیشنهادی منجر به بهبود درجه گمنامی خواهد شد.

با بهبود معماری شبکه گمنامی از طریق روش پیشنهادی و به‌کارگیری سیستم رمزنگاری *QMNTR* و امضاء دیجیتال *LRS* احتمال دسترسی مهاجم به شبکه مطابق با مدل حمله مطرح‌شده با توجه به عدم امکان تحلیل مستقیم پروتکل بسیار سخت و غیرقابل‌تصور است.

LRS نه‌تنها ویژگی *RS* معمولی مانند صحت، جعل ناپذیری و ناشناسی را برآورده می‌کند، بلکه می‌تواند برای قضاوت در مورد این‌که آیا دو امضاء متفاوت توسط یک امضاء کننده امضاءشده‌اند (همان قابلیت پیوند) استفاده شود.

امضاء حلقه قابل پیوند می‌تواند تعیین کند آیا دو امضاء کننده یکسان در حلقه عضو هستند یا خیر. به بیانی دیگر می‌توان گفت *LRS* در شرایطی که ناشناس بودن و تکرارناپذیری لازم است نیز مفید است که منجر به بهبود درجه گمنامی شده است.

7-3. تحلیل و ارزیابی پروتکل توزیع کلید

پژوهشگران در ارزیابی پروتکل‌ها و سامانه‌های امنیتی غالباً معیارهای میزان پردازش، حافظه موردنیاز، و پهنای باند مصرف‌شده توسط پروتکل‌ها و الگوریتم‌ها را موردبررسی قرار می‌دهند. واضح است که ازلحاظ سرعت کارایی، الگوریتم‌های *NTRU* و *NSS* به علت ساختاری ساده‌تر و محاسبات کمتر، عملکرد بسیار سریع‌تری داشته باشند.

مشکلات سیستم رمزنگاری *NTRU* علی‌الخصوص موفقیت‌آمیز نبودن رمزگشایی در حالت‌های خاص و انواع حملات طراحی‌شده از این طریق، توانایی مقاومت آن را در برابر مهاجمین قوی با مشکل مواجه کرده است. با توجه به این‌که درروش پیشین این مکانیسم بخش اصلی پروتکل توزیع و تبادل کلید را تشکیل می‌داد، نمی‌تواند گمنامی را در شبکه به‌خوبی تأمین کند. ساختار توسعه‌یافته رمزنگاری *QMNTR* و ترکیب آن با امضاء دیجیتال *LRS* معماری بسیار پیچیده و قوی‌تری را جهت ارائه سرویس گمنامی ایجاد می‌کند. در حملات تحلیل ترافیک بر روی شبکه گمنامی، مهاجم به دنبال جمع‌آوری اطلاعاتی نظیر شناسه مدارهای شبکه، رله‌ها و مکان استقرار آن‌ها، معماری شبکه گمنامی و نحوه پیاده‌سازی آن، و تشخیص جریان ترافیک شبکه است. جمع‌آوری، دسته‌بندی و پردازش این اطلاعات می‌تواند باعث شناسایی موقعیت مرکز فرماندهی و کنترل و اجزای مهم شبکه گمنامی شود و از این طریق امکان بروز حملات منع سرویس در بستر شبکه گمنامی افزایش می‌یابد.

ارائه گمنامی بدون قید و شرط توسط الگوریتم *LRS* در کنار به‌کارگیری از یک تابع فیلتر توزیع ترافیک این امکان را به شبکه می‌دهد که در برابر حملات تحلیل ترافیک نیز مقاومت کافی را داشته باشد. در طراحی شبکه گمنامی از طریق روش پیشنهادی، در نظر گرفتن توانایی محاسباتی رله‌های شبکه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و نبایستی تأثیر منفی در کارایی شبکه داشته باشد. با توجه به محاسبات پیچیده و زیاد االگوریتم‌های به‌کارگیری شده میزان توانایی پردازش در رله‌ها باید پاسخ گوی نیازمندی‌های شبکه گمنامی طراحی‌شده از این طریق باشد.

اصلی‌ترین مزیت به‌کارگیری *NTRU* و *NSS* در شبکه گمنامی، مقدار کمتر سربار محاسباتی بود. درروش پیشنهادی نیز سربار پردازشی زیادی بر روی رله‌ها توسط شبکه گمنامی تحمیل نمی‌شود که قادر به پردازش آن نباشند.

با به‌کارگیری سخت‌افزار مناسب می‌توان مقدار سربار محاسباتی اضافی روش پیشنهادی را پوشش داد. مطالعه و بررسی نتایج پژوهشگران حوزه امنیت نشان داده است که همواره میزان گمنامی به‌دست‌آمده غالباً با میزان کارایی شبکه رابطه معکوس خواهد داشت، درواقع هر چه الگوریتم یا پروتکل ازنظر ارائه سرویس‌های گمنامی و امنیتی قوی‌تر باشد میزان کارایی و سرعت به دلیل افزایش پردازش اطلاعات و سربار محاسبات تا حدودی کاهش می‌یابد، استفاده از سخت‌افزارهای پیچیده‌تر و پردازنده‌های قوی می‌تواند به بهبود کارایی رله‌ها کمک قابل‌توجهی داشته باشد. با توجه به موارد گفته‌شده در ادامه تحلیل امنیتی اجزای مهم پروتکل توزیع کلید را با در نظر گرفتن معیارهای مختلف بررسی خواهیم کرد.

7-3-1. تحلیل و ارزیابی سیستم رمزنگاری

بررسی میزان پیچیدگی عملیات به‌کاررفته در سیستم رمزنگاری را می‌توان به‌عنوان یکی از پارامترهای تحلیل و ارزیابی در نظر گرفت. در جدول شماره (4) تعداد عملیات‌های سامانه‌های رمزنگاری مختلف بررسی و ارائه شد که با توجه به مقادیر جدول، سیستم رمزنگاری *NTRU* برای تولید کلید، یک‌مرتبه ضرب کانولُوشِن، برای رمزنگاری یک‌مرتبه ضرب کانولُوشِن و یک‌مرتبه جمع چندجمله‌ای نیاز داشت، و در آخر برای رمزگشایی نیز دومرتبه ضرب کانولُوشِن و یک‌بار جمع چندجمله‌ای صورت می‌گرفت، که در مقایسه با سیستم رمزنگاری پیشنهادی ما یعنی *QMNTR* این مقادیر مشابه فوق به ترتیب به 80 مرتبه عمل ضرب کانولُوشِن، 80 مرتبه عمل ضرب و 4 مرتبه عمل جمع چندجمله‌ای و 1088 مرتبه عمل ضرب و 4 مرتبه عملیات جمع بر روی چندجمله‌ای‌ها صورت می‌گیرد.

افزایش پیچیدگی به‌کاررفته در این سیستم رمزنگاری مقاومت آن را در برابر انواع حملات کوانتومی تضمین خواهد کرد و به‌کارگیری آن باعث شکست‌ناپذیر شدن پروتکل توزیع و تبادل کلید و عدم اجرای موفق انواع حملات جهت شکستن کلیدهای به‌کاررفته در شبکه گمنامی شده است. بدیهی است که میزان پیچیدگی عملیات، و مدت‌زمان پردازش موردنیاز برای شکستن الگوریتم رمزنگاری با توجه به قدرت مناسب سیستم رمزنگاری به‌صورت منطقی افزایش خواهد یافت که در این حالت تحت هیچ شرایطی شکستن خود الگوریتم رمز توجیه منطقی نخواهد داشت و مهاجم بایستی روش‌های دیگری را طراحی و به کارگیری‌کند.

7-3-2. تحلیل امنیت و کارایی امضاء دیجیتال پروتکل توزیع کلید

با صرف‌نظر از بیان کاربردهای خاص حوزه امضاء دیجیتال، اهداف و تمرکز اصلی آن‌ها همواره بر روی اجرای احراز هویت و کمک به حفظ یکپارچگی داده‌ها بوده است.

علاوه بر آن معیارهایی نظیر عدم انکار، کارایی، هزینه، بازده زمانی، انعطاف‌پذیری، قابلیت پیوند و غیره... نیز در خصوص ارزیابی آن‌ها موردتوجه پژوهشگران این حوزه قرارگرفته است.

آسیب‌پذیری‌ها و بازده پایین امضاءهای دیجیتال مبتنی بر لگاریتم گسسته و ریاضیات باعث طراحی و توسعه طرح‌های جدیدتری بر پایه محاسبات کوانتومی شد که امضاء دیجیتال *NSS* به‌عنوان یک مکمل برای سیستم رمزنگاری *NTRU* درگذشته معرفی‌شده بود. نتایج مقایسه کارایی و سرعت بین *NSS* و امضاءهای دیجیتال قبل از آن مانند *RSA* و *ECDSA* نشان‌دهنده تحولی بسیار عظیم در حوزه به‌کارگیری الگوریتم‌های رمزنگاری و امضاءهای دیجیتال مقاوم در برابر حملات کوانتومی بود[53].امنیت امضاء دیجیتال *LRS* همانند نسخه پیشین خود یعنی *NSS* وابسته به سیستم رمزنگاری *NTRU* و مقاومت در برابر حملات کوانتومی است، درنتیجه امنیت بسیار بالایی را فراهم می‌کند. سرعت چشم‌گیر روند مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته در دهه اخیر بر روی امضاءهای حلقه قابل پیوند (*LRS*) نشان‌دهنده لزوم اهمیت به‌کارگیری آن‌ها در معماری‌های امنیتی عصر حاضر است [54،55].

جداول تهیه‌شده در بخش‌های بعد آخرین نتایج ارزیابی صورت گرفته توسط پژوهشگران بر روی امنیت و کارایی انواع امضاءهای دیجیتال *LRS* را نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم امضاء دیجیتال کینگ [7] همان الگوریتم به‌کارگیری شده در پروتکل توزیع و تبادل کلید پیشنهادی، در این جداول با دیگر طرح‌های امضا دیجیتال در ابعاد مختلف بررسی، مقایسه و ارزیابی‌شده است. امضاء دیجیتال *LRS* به دلیل کارایی و توانایی بالا در تأمین

گمنامی بدون قید و شرط، جعل ناپذیری و قابلیت پیوند، سربار ارتباط و پیچیدگی زمانی کمتر، باعث تمایز خود با طرح‌های دیگر امضاءهای دیجیتال شده است. همچنین داده‌های حاصل‌شده نشان می‌دهد در مقایسه با دیگر طرح‌ها نسبتاً منابع کمتری مصرف می‌کند و این موضوع بسیار بااهمیت است. درنتیجه با استفاده از امضاء دیجیتال *LRS* در پروتکل توزیع کلید امنیت و کارایی شبکه گمنامی ارتقاءیافته است.

7-3-2-1. تحلیل و مقایسه سربار ارتباط

در جدول (5) نسبت زمانی که صرف تلاش برای برقراری ارتباط با اعضاء حلقه صورت می‌گیرد یا همان سربار ارتباط امضاء دیجیتال بررسی، ارزیابی و مقایسه شده است که در آن θ برابر است با $mn^{1.5}log\ n\ -\sqrt{n}\ log\ n$ و l تعداد اعضای حلقه است.

جدول (5): مقایسه سربار ارتباط (به بیت) [55]

الگوریتم امضا	کلید عمومی	کلید خصوصی	اندازه امضاء
GW [56]	*mn log p*	*2mn log p*	*2mn log θ + 2ln + (m + 1)n log p*
Qing [7]	*n log p*	*2n log p*	*nl log p*
AM [57]	*mn log p*	*2mn log p*	*2mn log θ + 2n*
RS[55]	*mn log p*	*2mn log p*	*2mn log θ + 2n*
LRS[55]	*mn log p*	*2mn log p*	*2mn log θ + 2n*

به‌طور خلاصه نتایج حاصل از جدول نشان می‌دهد که اندازه کلید عمومی،کلید خصوصی، طرح‌های [55] با طرح [56] برابر است. اندازه امضاء طرح‌های [55] و [57] برابر است و درنهایت اندازه امضاء [55] در مقایسه با طرح کینگ [7] بزرگ‌تر است.

به بیانی دیگر هرچه کلید عمومی، کلید خصوصی، و اندازه امضاء کوچک‌تر باشد سربار ارتباط کم‌تری را خواهیم داشت که به‌طور مشخص با توجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول روش پیشنهادی سربار ارتباطی کم‌تری دارد و نشان‌دهنده این است که امضاء دیجیتال *LRS* در مدت‌زمان کم‌تری می‌تواند با اعضای حلقه خود ارتباط برقرار کند.

7-3-2-2. تحلیل و مقایسه پیچیدگی زمانی

محاسبه پیچیدگی زمانی اجرای الگوریتم‌های امضاء دیجیتال جهت ارزیابی کارایی الگوریتم از اهمیت بالایی برخوردار بوده که در ادامه پیچیدگی زمانی طرح‌های امضاء مختلف بررسی و ارزیابی‌شده است. با توجه به جدول شماره (6) حرف m تعداد اجزای یک بردار چندجمله‌ای و l تعداد اعضای حلقه است.

جدول (6): مقایسه بین هزینه‌های زمانی (*Time Cost*) [55]

الگوریتم	*KeyPair*	الگوریتم امضاء	تائید اعتبار
GW [56]	*(2m − 1)TMul + TInv*	*(2l + 4m +3l − 2)TMul*	*(2lm + 3)TMul*
Qing[7]	*TMul + TTrap + TSam*	*lTMul + 2TSd + 2TRs*	*lTMul*
AM [57]	*(2m − 1)TMul + TInv*	*(lm + m)TMul*	*(lm + 1)TMul*
RS[55]	*mTMul*	*(lm + m +l − 1)TMul*	*(lm + l)TMul*
LRS[55]	*mTMul*	*(lm + m + l − 1)TMul*	*(lm + l)TMul*

لازم به ذکر است، به هنگام محاسبه پیچیدگی زمانی از محاسبه برخی از عملیات‌های سبک مانند عملکرد هش و انتخاب اعداد تصادفی صرف‌نظر شده است، و عمدتاً هزینه زمانی ضرب چندجمله‌ای (T_{Mul}) و وارونگی چندجمله‌ای (T_{Inv}) در محاسبات در نظر گرفته‌شده است. محاسبه زمان اجرای الگوریتم‌های *Gaussian sampling algorithm* ، *rejection sampling algorithm* ، *trapdoor generation algorithm* و *Sample Pre algorithm* هرکدام به ترتیب با T_{Sd} ، T_{RS}، T_{Trap} و T_{Sam} نشان داده می‌شوند، که در [7] T_{Trap}، T_{Sam}، T_{Sd} و T_{RS} ها برای *Signature* و *KeyPair* استفاده می‌شود. *KeyPair* همان ترکیب کلید عمومی و خصوصی است که به ترتیب برای رمزگذاری و رمزگشایی داده‌ها استفاده می‌شوند.

نتایج ارزیابی جدول شماره (6) نشان می‌دهد که هزینه امضاء و هزینه تائید یا *Verification Cost* در طرح چنگتانگ کو [55] کمتر از طرح امضاء کارلوس و همکاران[56] است و هزینه *KeyPair* آن نیز از طرح‌های کارلوس[56] و طرح ون‌گو[57] کم‌تر است. طرح امضاء دیجیتال *LRS* کینگ [7] در *KeyPair* و دیگر موارد نسبت به طرح‌های کارلوس[56] و طرح ون‌گو [57] عملکرد مطلوب‌تری دارد که در پروتکل توزیع کلید از آن استفاده کرده‌ایم.

با توجه به این‌که در شبکه گمنامی عملیات رمزنگاری و رمزگشایی به‌صورت لایه‌ای انجام می‌شود، پیچیدگی زمانی کم‌تر در هر مرحله می‌تواند بار محاسباتی شبکه را کاهش دهد که در طرح کینگ پیچیدگی زمانی مطلوبی را نسبت به دیگر طرح‌ها مخصوصاً در *KeyPair* مشاهده می‌کنیم و با استفاده آن درروش پیشنهادی پیچیدگی زمانی مناسبی خواهیم داشت.

7-3-2-3. تحلیل کارایی و بررسی عملکردی

در جدول (7) طرح چنگتانگ‌کو با چهار طرح دیگر من‌جمله [7] ازنظر عملکرد بررسی و ارزیابی‌شده است[55]. هر دو امضاء حلقه انکارپذیر و امضاء حلقه قابل پیوند امضاءهای حلقه‌ای با ویژگی خاص خود هستند که می‌توانند برای کاربردهای مختلف به‌کارگیری شوند. امضاء حلقه قابل‌انکار می‌تواند ثابت کند که عضو حلقه در صورت لزوم و به دلیل منطقی عملیات امضاء را انجام نداده است در برابر آن امضاء حلقه قابل پیوند می‌تواند

تعیین کند آیا دو امضاء کننده یکسان در حلقه عضو هستند یا خیر که امروزه پژوهشگران این حوزه در تلاش هستند یک طرح امضاء حلقه قابل پیوند و قابل‌انکار طراحی کنند. با توجه به نتایج جدول (7) می‌توانیم به این نتیجه برسیم که تنها طرح چنگتانگ کو [55] و طرح کینگ [7] در برابر حملات کوانتومی ایمن هستند.

طرح [7] با داشتن قابلیت پیوند و مقاومت در برابر حملات کوانتومی سطح امنیتی بسیار بالایی را نسبت به اغلب طرح‌های امضاء ارائه می‌دهد که با استفاده از آن درروش پیشنهادی مقاومت شبکه گمنامی در برابر انواع حملات، خصوصاً حملات کوانتومی افزایش پیداکرده است.

جدول (7): مقایسه عملکرد امضاءهای دیجیتال [55]

الگوریتم امضا	مقاومت کوانتومی	قابلیت انکار	قابلیت پیوند
LJ [58]	ندارد	ندارد	دارد
GW [56]	دارد	دارد	ندارد
Qing [7]	دارد	ندارد	دارد
AM [54]	دارد	ندارد	ندارد
RS[55]	دارد	ندارد	ندارد
LRS[55]	دارد	ندارد	دارد

7-4. تحلیل عملکرد روش پیشنهادی در برابر سامانه‌های مسدودکننده ترافیک گمنام

سامانه‌های مختلفی جهت تشخیص ترافیک شبکه گمنامی مبتنی بر مسیریابی پیازی و دیگر ترافیک‌های گمنام و مخرب در شبکه طراحی و توسعه‌یافته‌اند که امروزه از روش‌هایی نظیر یادگیری عمیق برای مدل‌سازی رفتار و سپس تحلیل جریان ترافیک شبکه استفاده می‌شود[59].

به‌غیراز این روش ساختارهای متنوع دیگری توسط پژوهشگران این حوزه طراحی و توسعه پیداکرده‌اند که پرداختن به همه آن‌ها خارج از موضوع این تحقیق است [61-60].

به‌طورکلی این سامانه‌ها ترافیک شبکه را به‌صورت بر خط بررسی کرده سپس وجود ترافیک گمنام یا مخرب در خروجی میزبان‌های شبکه را بررسی می‌کند و در صورت احراز شرایط، فعالیت میزبان را به روش مخصوص خود متوقف می‌کند که می‌توان ترافیک سامانه گمنامی پیشنهادی را از طریق پیاده‌سازی یک محیط آزمایشگاهی در برابر این نوع سامانه‌ها قرارداد و در آخر ترافیک تبادل شده را ارزیابی کرد.

درصورتی‌که ارتباط با شبکه داخلی از طریق شبکه گمنامی به نحوی انجام‌گرفته باشد که کاربر نهایی یا میزبان / رله عملیات رمزگشایی و رمزنگاری را انجام ندهد علاوه بر آن پیش از عبور ترافیک از شبکه داخلی در آخرین گام داده‌ها رمزنگاری‌شده نباشند و همچنین در اولین گام در خروج از میزبان نیز انتقال داده به همین شکل انجام‌گرفته باشد، امکان شناسایی و رهگیری ترافیک توسط این نوع سامانه‌ها با چالش بزرگی مواجه خواهند شد که به‌عنوان یکی از مخاطرات و گلوگاه‌های این دسته از سامانه‌ها می‌تواند در نظر گرفته شود.

با در نظر گرفتن این شرایط در صورتی امکان تشخیص موفق وجود خواهد داشت که قابلیت ره‌گیری تعبیه‌شده در سامانه از قدرت بسیار بالایی برخوردار باشد. به‌عنوان‌مثال از طریق تغییر بخشی از داده‌های تبادل شده و ره‌گیری مسیر جریان داده می‌توان به مسیر ایجادشده توسط شبکه گمنامی پی برد. با توجه به این‌که درروش ارائه‌شده هیچ‌کدام از کاربران شبکه به‌عنوان بخشی از شبکه گمنامی در نظر گرفته نمی‌شوند و تمام عملیات انجام‌شده بر عهده رله‌ها قرار دارد و همچنین کلیه تبادلات نیز تحت نظر سرویس تشخیص حملات انجام‌شده که در صورت هرگونه تغییر مخرب درداده ها، فعالیت شبکه را متوقف خواهد کرد. همچنین در کنار آن با استفاده از تابع پالایه توزیع ترافیک امکان اجرای حملات تحلیل ترافیک از مهاجم سلب شده است. درنتیجه امکان مسدود کردن و ره‌گیری ترافیک به همراه تحلیل معماری شبکه گمنامی از طریق روش پیشنهادی با در نظر گرفتن موارد گفته‌شده بسیار سخت و تا حد زیادی غیرممکن خواهد بود.

7-5. مقایسه پژوهش‌های مرتبط با روش پیشنهادی

انواع سامانه‌ها و شبکه‌های گمنامی با رویکردها و معماری‌های مختلف طراحی و توسعه پیداکرده‌اند، که هرکدام از آن‌ها کارایی مختلفی داشته و به‌منظور اهداف خاص موردنظر خود به‌کارگیری می‌شوند.

مقایسه دقیق بین پژوهش‌های مرتبط با سامانه گمنامی پیشنهادی، به دلیل وجود تفاوت بین اهداف و کاربرد انواع شبکه‌های گمنامی مورد ارزیابی، تفاوت در معماری به‌کارگیری شده در سامانه‌ها، پارامترها و اجزای مختلف انواع سامانه‌ها، و تنظیمات آن‌ها با سامانه پیشنهادی و همچنین عدم وجود یک معیار و قالب ثابت و مشخص در حوزه ارزیابی شبکه‌های گمنامی، مقایسه بین آن‌ها را به امری بسیار پیچیده تبدیل کرده که فقدان پژوهشی مشابه و یک مجموعه داده ارزیابی‌شده در این زمینه آن را سخت‌تر هم خواهد کرد.

بنابراین با انتخاب شبیه‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده به لحاظ معماری در این زمینه، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی، و دیگر روش‌ها با در نظر گرفتن سنجه‌های مختلف، بر اساس چند معیار

مشترک و نتایج حاصل‌شده از تحلیل‌های این فصل بین آن‌ها صورت گرفته است.

جدول (8): مقایسه با پژوهش‌های پیشین

شبکه گمنامی	حملات کوانتومی	حملات منع سرویس	تحلیل ترافیک	ناشناسی بدون قید و شرط	حملات *MITM*
روش پیشنهادی	✓	✓	✓	✓	✓
سامانه [5]	✓	×	✓	×	×
سامانه [25]	×	×	×	×	×
سامانه [62]	×	✓	×	×	✓
سامانه [63]	×	✓	✓	×	×
سامانه [64]	✓	×	×	×	✓
سامانه [65]	×	✓	✓	×	×
سامانه [66]	×	✓	✓	×	×

در جدول (8) مقایسه‌ای کلی بین روش پیشنهادی و سایر پژوهش‌های مرتبط جهت بهره‌برداری و اثبات قدرت سامانه پیشنهادی ارائه‌شده است.

با توجه به جدول (8) نتایج ذیل حاصل می‌گردد:

- ✓ فقط روش پیشنهادی ما و سامانه [5] و [64] در برابر انواع حملات کوانتومی مقاومت کافی را دارد.
- ✓ در مقایسه با روش‌های دیگر تنها روش پیشنهادی ماست که به علت معماری خاص خود توانایی مقاومت در برابر انواع حملات را خواهد داشت.
- ✓ نسل دوم شبکه گمنامی در برابر حملات مطرح‌شده مقاومت لازم را ندارد و نشان‌دهنده منسوخ شدن معماری این نوع از شبکه‌های گمنامی است.
- ✓ فقط سامانه‌های [25]، [62] و [64] نمی‌توانند از خود در برابر حملات تحلیل ترافیک مقاومت نشان دهند.
- ✓ با استفاده از امضاء دیجیتال *LRS* که ویژگی جعل ناپذیری را در مرحله تبادل کلید روش پیشنهادی برقرار می‌کند، امکان اجرای موفق حملات *MITM* بر روی رله‌ها از مهاجم سلب خواهد شد.
- ✓ با استفاده از امضاء دیجیتال *LRS* ویژگی ناشناسی بدون قید

و شرط در شبکه گمنامی برقرار می‌شود. امضاء دیجیتال *LRS* باعث تضمین قابلیت اطمینان رله‌ها در ساختار پیشنهادی شده و رله‌های تأییدشده به مشابه اعضاء حلقه عمل می‌کنند. بنابراین صرفاً رله‌ای که از طریق *LRS* تأییدشده باشد در مجموعه رله‌ها دارای اعتبار بوده و تعیین این‌که از کدام کلید برای تأیید رله استفاده‌شده ازنظر محاسباتی غیرممکن است.

7-6. نوآوری‌های پژوهش

در نظر گرفتن کاربر به‌عنوان بخشی از شبکه به‌نحوی‌که خود وظیفه مسیریابی را بر عهده داشته باشد از اشتباهات رایج طراحی شبکه گمنامی بود که در ساختار پیشنهادی پیکربندی شبکه مطابق آنچه در پژوهش گفته شد تغییر پیداکرده است.

همچنین پژوهشگران به جنبه‌هایی نظیر جعل ناپذیری و ناشناسی بدون قید و شرط در شبکه گمنامی تاکنون نپرداخته بودند که بازطراحی معماری، رفع معایب، تجمیع و یکپارچه‌سازی انواع مکانیسم‌ها در ساختار پیشنهادی علاوه بر ارتقاء شبکه باعث تأمین قابلیت‌های امنیتی مانند مقاومت در برابر رهگیری شبکه، طراحی انعطاف‌پذیر، تشخیص و جلوگیری از نفوذ مهاجمین، مسیریابی چند مسیری، انتخاب مسیر بهینه، مدیریت خطا و تأخیر، طراحی پیوند ناپذیر، و کنترل ازدحام شد.

روش ارائه‌شده پویایی لازم جهت به‌کارگیری در انواع کاربردها را داشته و از آخرین فناوری‌ها در پیاده‌سازی معماری آن استفاده‌شده است.

باوجود ارائه نوآوری پژوهش حاضر در بخش‌های مختلف مقاله و توضیح آن‌ها، جدول شماره (9) شاخص‌ترین جنبه‌های مهم نوآوری‌های ارائه‌شده را به تفکیک بیان می‌کند.

جدول (9): نوآوری‌های پژوهش

اجزا ساختار شبکه پیشنهادی	بررسی جنبه‌های مختلف نوآوری
مرکز فرماندهی و کنترل	پیوند ناپذیری، مقاومت در برابر حملات تحلیل ترافیک
مسیریابی و ایجاد مدار	مسیریابی بهینه، افزایش پهنای باند، کنترل ازدحام
تشخیص حملات و مدیریت خطا	رفع خطاهای شبکه و مسیریابی، جلوگیری از نفوذ و اجرای حملات
سرویس رمزنگاری شبکه گمنامی	ارتقاء سیستم رمزنگاری از طریق جایگزینی (رمزنگاری *QMNTR* و امضاء دیجیتال *LRS*)

8. نتیجه‌گیری

یکی از قسمت‌های مهم این پژوهش تحلیل پروتکل توزیع و تبادل کلید بود که با ذکر مثال‌های مختلف آن را ارزیابی کردیم. همچنین در ادامه معیارهای گمنامی و کارآمدی روش پیشنهادی را نسبت به روش قبلی بررسی کردیم که کلیه موارد بررسی‌شده قدرتمندی و امنیت روش پیشنهادی را نشان داده است. به‌علاوه

الگوریتم امضاء دیجیتال *LRS* از منظر معیارهای گفته‌شده و نتایج حاصل از جدول‌ها تحلیل شد. سپس روش پیشنهادی را در برابر سامانه‌های جدید کنترل ترافیک گمنام، بررسی و ارزیابی کردیم که درنهایت با استخراج معیارهای ارزیابی مشترک برای شبکه گمنامی نتایج حاصل از جدول (8) ارائه شد.

گمنامی امروزه به‌عنوان یک اصل اساسی در روابط بین مؤلفه‌ها در نظر گرفته‌شده است. با افزایش روزافزون تهدیدات سایبری علیه اهداف مختلف، نیازمندی به‌کارگیری انواع سامانه‌های گمنامی و رعایت ویژگی‌های امنیتی دیگری مانند پیوند ناپذیری و مقیاس‌پذیری بیش‌ازپیش احساس شده است و از سویی دیگر با تنوع حملات طراحی‌شده بر روی این دسته از سامانه‌ها نیاز به بهبود مستمر معماری به‌کاررفته در آن‌ها ضروری است تا همواره توانایی مقابله با انواع تهدیدات نوین سایبری را داشته باشند.

آسیب‌پذیری‌های موجود در مرحله تبادل کلید شبکه گمنامی این فرصت را به مهاجم می‌داد که از طریق روش‌هایی مانند حمله مردمیانی به‌راحتی خود را به‌عنوان یکی از رله‌های شبکه گمنامی معرفی کند.

ویژگی ناشناسی بدون قید و شرط و جعل ناپذیری در مرحله تبادل کلید که حاصل استفاده از امضاء دیجیتال *LRS* است باعث تضمین قابلیت اطمینان رله‌ها در شبکه گمنامی شد.

همچنین مشکلات موجود در ساختار سیستم رمزنگاری *NTRU* و توانایی پایین امضاء دیجیتال *NSS* نسبت به فناوری‌های پس از خود، باعث کاهش ضریب امنیتی ایجاد کلید جلسه و انتقال امن کلید در شبکه گمنامی شده بود که با ترکیب سیستم رمزنگاری *QMNTR* و امضاء دیجیتال *LRS* در کنار طراحی مناسب ارائه‌شده، معماری قدرتمندی پیشنهاد و شبیه‌سازی شد.

ساختار ارائه‌شده درروش پیشنهادی ضمن اینکه توانایی مقابله با انواع تهدیدات را دارد از درجه گمنامی و کارایی مناسبی برخوردار بوده و امنیت پروتکل توزیع و تبادل کلید شبکه گمنامی را بهبود داده است که با به‌کارگیری امضاء دیجیتال *LRS* سربار ارتباط، پیچیدگی زمانی و کارایی مناسبی را ارائه می‌دهد.

9. پیشنهادها و پژوهش‌های آتی

اقدامات قابل انجام در پژوهش‌های آتی بدین شرح ارائه می‌گردند:

- پیاده‌سازی سامانه گمنامی با استفاده از یک معماری پایه قدرتمند و بهینه‌تر
- بازطراحی شبکه گمنامی با استفاده از سامانه‌های رمزنگاری قدرتمند و جدیدتر و الگوریتم‌های امضاء دیجیتال بهینه‌تر
- به‌کارگیری سیستم پیشنهادی در کنار مکانیسم‌ها و سامانه‌های امنیتی دیگر، به این صورت که پس از بررسی کلی سازوکار و مکانیسم‌های امنیتی که امروزه برای حفظ حریم خصوصی در شبکه‌ها و سازمان‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد و با توجه به وضعیت سامانه‌های آن‌ها، بررسی این مسئله که چگونه می‌توانیم معماری گمنامی در شبکه را در کنار هر یک از این مکانیسم‌های امنیتی ارائه کنیم، به‌عنوان یک طرح، می‌تواند موردتحقیق توسط پژوهشگران این حوزه قرار گیرد.
- پیاده‌سازی یک معماری غیرمتمرکز بهینه برای شبکه گمنامی
- طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های کوانتومی بهتر جهت به‌کارگیری درتبادل داده‌ها و رمزنگاری آن‌ها در بسترهای مختلف
- ارائه یک معیار ارزیابی غیر از روش درجه گمنامی برای تعیین سطح امنیتی انواع سامانه‌های گمنامی
- طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند تشخیص ترافیک گمنام در شبکه

10. مراجع

[1] Egners, André, et al. "Introducing SOR: SSH-based onion routing." 2012 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. (pp. 280-286) IEEE, 2012. https://doi.org/10.1109/WAINA.2012.89.

[2] Bennett, Krista, and Christian Grothoff. "GAP–practical anonymous networking." International Workshop on Privacy Enhancing Technologies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (pp. 141-160), 2003 .https://doi.org/10.1007/978-3-540-40956-4_10.

[3] G. Danezis and C. Diaz, "A survey of anonymous communication channels," Technical Report MSR-TR-2008-35, Microsoft Research, Tech. Rep., 2008. https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2008/02/tr-2008-35.pdf.

[4] Karunanayake, Ishan, et al. "De-anonymisation attacks on tor: A survey." IEEE Communications Surveys & Tutorials 23.4 (2021): 2324-2350. https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3093615.

[5] A. Hasani Karbasi, "Designing Anonymous Communication System by Lattice-Based Cryptography", Journal of Electronic & Cyber Defence Vol 2, No. 3, 2014. Available: https://sid.ir/paper/243126/en.

[6] Yassein, Hassan R., Asia A. Abidalzahra, and Nadia M. Al-Saidi. "A new design of NTRU encryption with high security and performance level." AIP Conference Proceedings. Vol. 2334. No. 1. AIP Publishing LLC, 2021. doi.org/10.1063/5.0042312.

[7] Ye, Qing, et al. "Efficient Linkable Ring Signature Scheme over NTRU Lattice with Unconditional Anonymity."Computational Intelligence and Neuroscience p.8431874 (2022). https://doi.org/10.1155/2022/8431874.

[8] Shor, Peter W. "Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a

quantum computer." SIAM review 41.2 (1999): 303-332. https://doi.org/10.1137/S0036144598347011.

[9] Rivest, Ronald L., Adi Shamir, and Leonard Adleman. "A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems." Communications of the ACM 21.2 (1978):120-126. https://doi.org/10.1145/359340.359342.

[10] Hoffstein, Jeffrey, Jill Pipher, and Joseph H. Silverman. "NTRU: A ring-based public key cryptosystem." International algorithmic number theory symposium. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998. pp. 267-288 https://doi.org/10.1007/BFb0054868.

[11] Abo-Alsood, H. H., and H. R. Yassein. "QOTRU: A New Design of NTRU Public Key Encryption Via Qu-Octonion Subalgebra." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1999. No. 1. IOP Publishing, 2021. https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1999/1/012097.

[12] A. Ahmadi, M. Dehghani , M. Saleh Esfehani, "A Problem Solving Method to Boundary of Interval Based Watermark in Anonymous Network Flows" , Journal Of Electronical & Cyber Defence Vol. 5, No. 2, 2017, Serial No. 18 (in persian). https://ecdj.ihu.ac.ir/article_200141_cfff7f6f5afa0a3158d587f66e5719dd.pdf.

[13] Wang, Tao, et al. "Congestion-aware path selection for Tor." Financial Cryptography and Data Security: 16th International Conference, FC 2012, Kralendijk, Bonaire, Februray 27-March 2, 2012, Revised Selected, Papers 16 98-113. Springer Berlin Heidelberg, 2012. doi.org/10.1007/978-3-642-32946-3_9.

[14] The Tor Stack Exchenge,"Tor client pick Tor nodes for circuit creation," Retrieved from http://tor.stackexchange.com/questions/113/how-does-a-tor client-pick-tor-nodes-for-circuit-creation on July 21, 2018.

[15] Jagerman, Rolf, et al. "The fifteen year struggle of decentralizing privacy-enhancing technology." arXiv preprint,arXiv:1404.4818 (2014). https://arxiv.org/abs/1404.4818.

[16] Ahmad, Imran, et al. "A New Look at the TOR Anonymous Communication System." Journal of Digital Information Management 16.5 (2018): 223. https://doi.org/10.6025/jdim/2018/16/5/223-229.

[17] Wang, Xiao, et al. "An empirical analysis of family in the Tor network." 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2013. (pp. 1995-2000). https://doi.org/10.1109/ICC.2013.6654817.

[18] M.Asadi, S. parsa ,M. A. Jebreil, V.Majidnezhad "P2P Botnet Detection Using Deep Learning Method" , Journal of Electronical & Cyber Defence Vol. 8, No. 2, 2020, Serial No. 30 (In persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1399.8.2.1.3.

[19] Z. Zhong, C. Xie and X. Tang, "Intrusion Traffic Detection and Classification Based on Unsupervised Learning," in IEEE Access, vol. 12, pp. 67860-67879, 2024, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3400213.

[20] SPIEGEL Staff, Quantum Spying: GCHQ Used Fake LinkedIn Pages to Target Engineers‖, DER SPIEGEL, November 2013.

[21] van Vredendaal, Christine. "Reduced memory meet-in-the-middle attack against the NTRU private key." LMS Journal of Computation and Mathematics 19.A (2016): 43-57. https://doi.org/10.1112/S1461157016000206.

[22] Singh, Sonika, and Sahadeo Padhye. "Generalisations of NTRU cryptosystem." Security and Communication Networks 9.18 (2016): 6315-6334. https://doi.org/10.1002/sec.1693.

[23] Goodin, D. "How the NSA might use Hotmail, Yahoo or other cookies to identify Tor users." Ars Technica (2013). http://arstechnica.com/security.

[24] Zhu, Ye, et al. "Correlation-based traffic analysis attacks on anonymity networks." IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 21.7 (2009): 954-967. https://doi.org/10.1109/TPDS.2009.146.

[25] Dingledine, Roger, Nick Mathewson, and Paul F. Syverson. "Tor: The second-generation onion router." USENIX security symposium. Vol. 4. 2004. https://dl.acm.org/doi/10.5555/1251375.1251396.

[26] Howgrave-Graham, Nick, et al. "The impact of decryption failures on the security of NTRU encryption." Annual International Cryptology Conference. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45146-4_14.

[27] Proos, John. "Imperfect decryption and an attack on the NTRU encryption scheme." Cryptology ePrint Archive (2003). https://ia.ca/2003/002.

[28] Nitaj, Abderrahmane. "Cryptanalysis of NTRU with two public keys." Cryptology ePrint Archive (2011). https://doi.org/10.1109/ISEASP.2017.7976980.

[29] Shim, Kyung-Ah. "Security vulnerabilities of four signature schemes from NTRU lattices and pairings." IEEE Access 8 (2020): 85019-85026. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990413.

[30] Xu, Liqing, et al. "Vulnerable Public Keys in NTRU Cryptosystem." Chinese Annals of Mathematics, Series B 41.5 (2020): 657-664. https://doi.org/10.1007/s11401-020-0225-6.

[31] Yadav, Vijay Kumar, S. Venkatesan, and Shekhar Verma. "Man in the middle attack on NTRU key exchange." Communication, Networks and Computing: First International Conference, CNC 2018, Gwalior, India, March 22-24, 2018, Revised Selected Papers 1. Springer Singapore, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2372-0_2.

[32] S. Khoshnevisan, K. manochehri — "New Method Base on MITM Attack on NTRU Encryption system", Research in Science and Technology - Istanbul-Turkey

security." Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 28.2 (2022): 1164-1173. http://doi.org/10.11591/ijeecs.v28.i2.pp1164-1173.

[44] J. K. Liu, M. H. Au, W. Susilo, and J. Zhou, "Linkable ring signature with unconditional anonymity," IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 26, no. 1, pp. 157– 165, 2013. https://doi.org/10.1109/TKDE.2013.17.

[45] Wang, Shangping, Ru Zhao, and Yaling Zhang. "Lattice-based ring signature scheme under the random oracle model." International Journal of High Performance Computing and Networking 11.4 (2018): 332-341. https://doi.org/10.1504/IJHPCN.2018.093236.

[46] Zhang, Huang, et al. "Anonymous post-quantum cryptocash." International Conference on Financial Cryptography and Data Security. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58387-6_25.

[47] Beullens, Ward, Shuichi Katsumata, and Federico Pintore. "Calamari and Falafl: logarithmic (linkable) ring signatures from isogenies and lattices." International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security. Cham: Springer International Publishing, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64834-3_16.

[48] Pohlig, Stephen, and Martin Hellman. "An improved algorithm for computing logarithms over GF (p) and its cryptographic significance (corresp.)." IEEE Transactions on information Theory 24.1 (1978): 106-110. https://doi.org/10.1109/TIT.1978.1055817.

[49] Escribano Pablos, José Ignacio, and María Isabel González Vasco. "Secure post-quantum group key exchange: Implementing a solution based on Kyber." IET Communications 17.6 (2023): 758-773. https://doi.org/10.1049/cmu2.12561.

[50] W. Li et al., "High-rate quantum key distribution exceeding 110 Mb s−1," Nat. Photon., vol. 17, no. 5, pp. 416–421, May 2023 https://doi.org/10.1038/s41566-023-01166-4.

[51] Murdoch, Steven J. "Quantifying and measuring anonymity." International Workshop on Data Privacy Management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54568-9_1.

[52] Diaz, Claudia, et al. "Towards measuring anonymity." International Workshop on Privacy Enhancing Technologies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. https://doi.org/10.1007/3-540-36467-6_5.

[53] Hoffstein, Jeffrey, et al. "NTRUSIGN: Digital signatures using the NTRU lattice." Cryptographers' track at the RSA conference. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. https://doi.org/10.1007/3-540-36563-X_9.

[54] Odoom, Justice, et al. "Linked or unlinked: A systematic review of linkable ring signature schemes." Journal of Systems Architecture 134 (2023): 102786. https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2022.102786.

14 March 2016 (in Persion). Available: https://sid.ir/paper/858473/fa.

[33] Howgrave-Graham, Nick. "A hybrid lattice-reduction and meet-in-the-middle attack against NTRU." Advances in Cryptology-CRYPTO 2007: 27th Annual International Cryptology Conference, Santa Barbara, CA, USA, August 19-23, 2007. Proceedings 27. Springer Berlin Heidelberg, (pp. 150-169) 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74143-5_9.

[34] Ding, Jintai, Yanbin Pan, and Yingpu Deng. "An algebraic broadcast attack against NTRU." Information Security and Privacy: 17th Australasian Conference, ACISP 2012, Wollongong, NSW, Australia, July 9-11, 2012. Proceedings 17. Springer Berlin Heidelberg, 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31448-3_10.

[35] Adamoudis, Marios, and Konstantinos A. Draziotis. "Message recovery attack to NTRU using a lattice independent from the public key." arXiv preprint arXiv:2203.09620 (2022). https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.09620.

[36] Dingledine, Roger, and Steven J. Murdoch. "Performance Improvements on Tor or, Why Tor is slow and what we're going to do about it." Online: http://www.torproject.org/press/presskit/2009-03-11-performance.pdf (2009): 68.

[37] AlSabah, Mashael, and Ian Goldberg. "PCTCP: per-circuit TCP-over-IPsec transport for anonymous communication overlay networks." Proceedings of the 2013 ACM SIGSAC conference on Computer & communications security. 2013. https://doi.org/10.1145/2508859.2516715.

[38] Tor Metrics Project website, "Tor project Anonimity online," Available at https://metrics.torproject.org.

[39] Xu, Liqing, et al. "Vulnerable Public Keys in NTRU Cryptosystem." Chinese Annals of Mathematics, Series B 41.5 (2020): 657-664. https://doi.org/10.1007/s11401-020-0225-6.

[40] S. H. Hosseinian Barzi , M. Anarfarhad , "Evaluation and proof of routing algorithm in Tor anonymity network" , Scientific Journal of Electronic & Cyber Defense Vol. 11, No. 3, Autumn 2023, Serial No. 43. (in persian) dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.2.1.4.

[41] Malekian, Ehsan, Ali Zakerolhosseini, and Atefeh Mashatan. "QTRU: a lattice attack resistant version of NTRU PKCS based on quaternion algebra." preprint, Available from the Cryptology ePrint Archive: http://eprint.iacr.org/2009/386.pdf (2009).

[42] Malekian, Ehsan, and Ali Zakerolhosseini. "OTRU: A non-associative and high speed public key cryptosystem." 2010 15th CSI international symposium on computer architecture and digital systems. IEEE, pp. 83-90. 2010. https://doi.org/10.1109/CADS.2010.5623536.

[43] Abdulwahhab, Saba Alaa, Qasim Mohammed Hussein, and Imad Fakhri Al-Shaikhli. "An overview of number theory research unit variant development

[55] Cao, Chengtang, Lin You, and Gengran Hu. "A Novel Linkable Ring Signature on Ideal Lattices." Entropy 25.2 (2023): 237. https://doi.org/10.3390/e25020237.

[56] Aguilar Melchor, Carlos, et al. "Adapting Lyubashevsky's signature schemes to the ring signature setting." Progress in Cryptology–AFRICACRYPT 2013: 6th International Conference on Cryptology in Africa, Cairo, Egypt, June 22-24, 2013. Proceedings 6. Springer Berlin Heidelberg, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38553-7_1.

[57] Gao, Wen, et al. "Lattice-based deniable ring signatures." International Journal of Information Security 18 (2019): 355-370. https://doi.org/10.1007/s10207-018-0417-1.

[58] Liu, Joseph K., Victor K. Wei, and Duncan S. Wong. "Linkable spontaneous anonymous group signature for ad hoc groups." Information Security and Privacy: 9th Australasian Conference, ACISP 2004, Sydney, Australia, July 13-15, 2004. Proceedings 9. Springer Berlin Heidelberg, (pp. 325-335) ,2004. https://doi.org/10.1007/978-3-540-27800-9_28.

[59] Farhad Fathi, "Discovering and Blocking Botnets Command and Control Channels in the Anonymous Network with Onion Routing (TOR) ", Master. Thesis, Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, October, 2019.

[60] Ling, Zhen, et al. "Torward: Discovery, blocking, and traceback of malicious traffic over tor." IEEE Transactions on Information Forensics and Security 10.12 (2015): 2515-2530. https://doi.org/10.1109/TIFS.2015.2465934.

[61] Deng, Ziye, et al. "Identifying tor anonymous traffic based on gravitational clustering analysis." 2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Vol. 2. IEEE, 2017. https://doi.org/10.1109/IHMSC.2017.133.

[62] Elgzil, Abdelhamid, et al. "Cyber anonymity based on software-defined networking and Onion Routing (SOR)." 2017 IEEE conference on dependable and secure computing. pp. 358-365 , IEEE, 2017. https://doi.org/10.1109/DESEC.2017.8073856.

[63] Kita, Kentaro, et al. "Producer anonymity based on onion routing in named data networking." IEEE Transactions on Network and Service Management 18.2 (2020): 2420-2436. https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3019052.

[64] Ghosh, Satrajit, and Aniket Kate. "Post-Quantum Forward-Secure Onion Routing: (Future Anonymity in Today's Budget)." International Conference on Applied Cryptography and Network Security. Cham: Springer International Publishing, pp.263-286, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28166-7_13.

[65] Yang, Lei, and Fengjun Li. "mTor: A multipath Tor routing beyond bandwidth throttling." 2015 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). IEEE, pp. 479-487 2015. https://doi.org/10.1109/CNS.2015.7346860.

[66] AlSabah, Mashael, et al. "The path less travelled: Overcoming Tor's bottlenecks with traffic splitting." Privacy Enhancing Technologies: 13th International Symposium, PETS 2013, Bloomington, IN, USA, July 10-12, 2013. Proceedings 13. Springer Berlin Heidelberg, pp. 143-163, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39077-7_8.