فصل نامه تخصصی مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

فصل نامه تخصصی مهندسی مخابرات جنوب

صاحب امتیاز : دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

نشانی : بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، حوزه معاونت پژوهشی، دفتر مجله تخصصی مهندسی مخابرات جنوب

تلفن : ۰۹۱۰۷۸۳۷٤۲۰ **فاکس** :۰۷۷۳۳۵۵۵٤۱۳

سایت نشریه: https://jce.bushehr.iau.ir **شاپا الکترونیکی**: ۲۹۸۰-۹۲۳۱

نشانی الکترونیکی : jce.iaub@gmail.com - jce@iaubusher.ac.ir

نشریه در پایگاههای ملی و بین المللی زیر نمایه شده است:

DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS | معاونت پژوهشی دفتر سیاست گذاری و برنامه ریزی امور پژوهشی | magiran | پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی SID

Google Scholar | پایگاه استنادی علوم جهان اسلام ISC | CIVILICA We Respect the Science | ACADEMIA

این مجله بر اساس مجوز انتشارشماره ۸۷/٤۲۲۰۹۲ تاریخ ۸۹/۱۰/۲۲ مدیر کل دفتر گسترش تولید علم دانشگاه آزاد اسلامی انتشار می یابد.

فصلنامه تخصصی مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

شاپا: ۹۲۳۱-۲۹۸۰

سال پانزدهم، شماره پنجاه و هفت، پائیز ۱۴۰۴

فهرست

JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1339

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

High Efficiency X-band MMIC Power Amplifier for Remote Sensing Satellites

Razieh Narimani [1*] | Vali Talebzadeh[2] | Ahad Farhadi[3]

[1]Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
r.narimani@isrc.ac.ir

[2]Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
v.talebzadeh@isrc.ac.ir

[3]Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
a.farhadi@isrc.ac.ir

Correspondence
Razieh Narimani, Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
r.narimani@isrc.ac.ir

Main Subjects:
MMIC Power Amplifier

Paper History:
Received: xxx
Revised: xxx
Accepted: xxx

Abstract

The advancements in the space telecommunication industry and the need to design transmitters with high transmission bit rate on the one hand, and the limitation of the power consumption of satellite modules on the other hand, have made the importance of power amplifiers, as one of the main components of the transmitters with the highest power consumption, being highly efficient even more than before. Is. In this paper, we investigate a method to increase the efficiency and linearity of a two-stage class AB power amplifier using a 500nm GAN HEMT for the transmitter of a sensing satellite to send images obtained in the X frequency band. The designed amplifier has a saturation power of 49.84dBm, a gain of 23.9dB, and an efficiency of 37% in the frequency range of 10.7-11.2GHz with a drain voltage of 40V, which has a higher output power and gain compared to other similar amplifiers in this band. The linearity characteristics of this amplifier are 1dB AM/AM, 4dB/dB AM/PM, and 23dBc IM3 at the center frequency of 10.95GHz and it has a bandwidth of 36MHz.

Keywords: Power Amplifier, Satellite Transmitter, GaN HEMT Technology, Integrated Circuits.

Highlights

- Power amplifier design with high output power and efficiency.
- Power amplifier design to transmit data from a remote sensing satellite.
- Power consumption Reduction of the satellite transmitter by increasing the efficiency of the power amplifier.

Citation: R. Narimani, V. Talebzadeh, and V. Farhadi, "High Efficiency X-band MMIC Power Amplifier for Remote Sensing Satellites," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 1–14, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1339 [in Persian].

1. Introduction

Nowadays, HEMT transistors with ALGaN/GaN semiconductor technology are widely used in the design of power amplifiers [1]. High breakdown voltage, high-speed, high-power density, and high efficiency are the most basic advantages of HEMTs, which make them a suitable option for designing high-power amplifiers [2]. Many studies have been conducted on GaN HEMT MMICs [3].

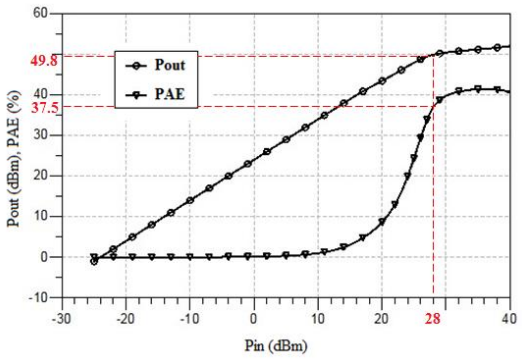
The X-band is one of the most common frequency bands for transmitting satellite images. Therefore, designing a transmitter with high power efficiency is very important due to the power consumption limitation. Many papers have studied GaN-based MMIC power amplifiers [4]. Amplifiers based on this technology have greatly contributed to reducing the size and complexity of the amplifier module while improving efficiency in space communication systems [5]. In this paper, a two-stage MMIC class AB power amplifier with an efficiency of 37% using a 500nm GaN HEMT is designed for the transmitter of a remote sensing satellite to transmit images. The proposed amplifier has an output power of 49.84 dBm with a gain of 23.9 dB at a center frequency of 10.95 GHz with a radio bandwidth of 500 MHz.

2. Proposed manufacturing technology

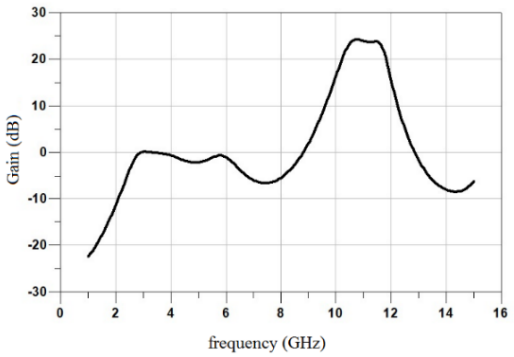
In this article, the manufacturing technology and PDK process specifications manufactured by NRC Canada have been used, which have a minimum gate length of 500 nm for GaN HEMT. The breakdown voltage for this technology is about 100 V, and the maximum operating frequency is 60 GHz. Also, the power density of 5 w/mm2 is achievable according to the substrate structure, and the capacitor used on the chip is MIM with a capacitance density of 20.19 fF/µm2. The resistor on the chip used in this technology is nichrome with a resistivity of 50 Ω/sq. The proposed drain-source bias voltage is 40 V, and the gate-source bias voltage can vary from -8 to +2 V [6].

3. MMIC Amplifier Design

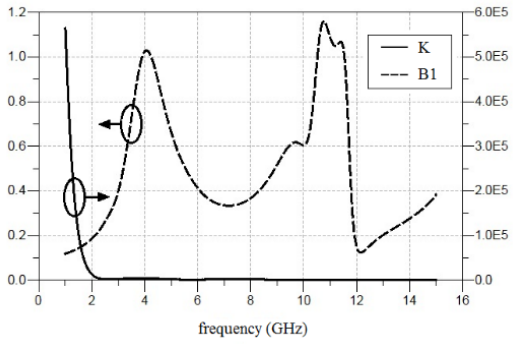
A two-stage class AB power amplifier is designed, which includes a driver and an amplifier stage. The driver consists of four transistors with dimensions of 8×70 µm, and the amplifier consists of four amplifiers with six transistors of 8×70 µm, which are connected in parallel to improve the drain-source current and high-power output. Figure I shows the characteristics of the designed power amplifier. Also, the specification is briefly explained in Table 1.



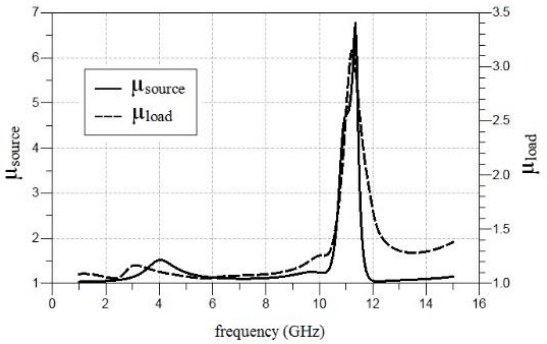
(a) Designed power amplifier P_{out} and PAE



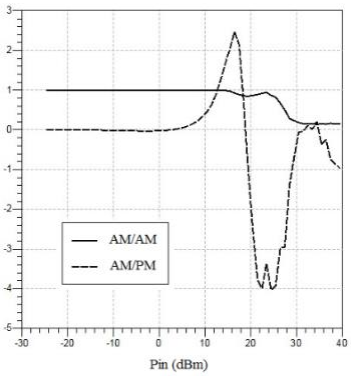
(b) Gain of the power amplifier



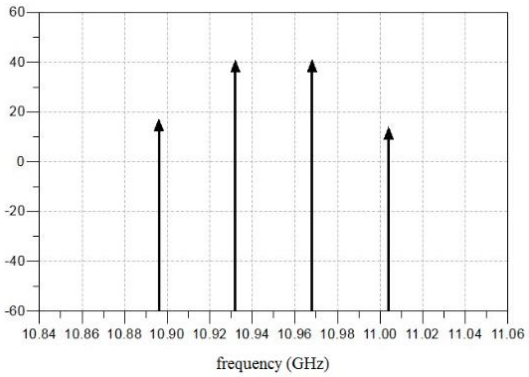
(c) Rollet's stability factor



(d) Geometric Stability factor



(e) AM/AM and AM/PM



(f) IMD in 36MHz Channel

Figure I. Characteristics of the designed power amplifier

Table 1. Specification of the power amplifier

Specification	Value
Frequency	X band (10.95 GHz)
PAE	37% @ Pin=28 dBm
Output power P1dB	49.84 dBm @ Pin=28 dBm
Small signal gain	23.97 dB @ 10.95 GHz
IMD3	-23.5 dBc @ Pin=22 dBm
AM/PM	-4.0 deg/dB
AM/AM	1 dB/dB

4. Conclusion

In this paper, a two-stage MMIC power amplifier with an efficiency of 37% using a 500nm GaN HEMT has been designed for the transmitter of a remote sensing satellite. In the design of the power amplifier, maintaining a balance between the parameters of output power, gain, and linearity of the amplifier is important and determines the design path. As the linear output power increases, the efficiency of the amplifier decreases. Comparing the characteristics of the designed power amplifier with other similar examples shows higher output power and gain, which is confirmed by the FOM parameter.

References

[1] N. Keigo, Y. Yamaguchi, T. Torii, and M. Tsuru. “A Review of GaN MMIC Power Amplifier Technologies for Millimeter-Wave Applications,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E105-C, no. 10, pp. 433-440, 2022, doi: 10.1587/transele.2022MMI0006.

[2] K. Nakatani, Y. Yamaguchi, and M. Tsuru, "A Ka-Band 40 W Output Power and 30 % PAE GaN MMIC Power Amplifier for Satellite Communication," *16th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, London, United Kingdom, 2022, pp. 285-288, doi: 10.23919/EuMIC50153.2022.9783994.

[3] M. Ayad, N. Poitrenaud, V. Serru, M. Camiade, J. Gruenenpuett, and K. J. Riepe, "A High Efficiency MMIC X-band GaN Power Amplifier," *50th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 788-791, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338001.

[4] P. Dennler, D. Schwantuschke, R. Quay, and O. Ambacher, "8–42 GHz GaN non-uniform distributed power amplifier MMICs in microstrip technology," *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259604.

[5] J. Kühn, *AlGaN-GaN-HEMT Power Amplifiers With Optimized Power-Added Efficiency for X-Band Applications*. KIT Scientific Publishing, 2011.

[6] P. Aliparast and A. Farhadi, “Design of X Band High Power Amplifier MMIC Based on AlGaN/GaN HEMT,” *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 16, no. 2, pp. 37-45, 2019 [in Persian].

Declaration of Competing Interest: Authors do not have conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Razieh Narimani: Methodology, literature review, resources, writing original draft preparation; **Vali Talebzadeh:** Supervision, analytical method verification; **Ahad Farhadi:** Simulations and data analysis.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1339

مقاله پژوهشی

تقویت‌کننده توان MMIC راندمان بالا در باند X برای ماهواره‌های سنجشی

راضیه نریمانی*[۱] | ولی طالب‌زاده[۲] | احد فرهادی[۳]

[۱] پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
r.narimani@isrc.ac.ir

[۲] پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
v.talebzadeh@isrc.ac.ir

[۳] پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
a.farhadi@isrc.ac.ir

نویسنده مسئول:
*راضیه نریمانی، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
r.narimani@isrc.ac.ir

موضوع اصلی:
طراحی تقویت‌کننده توان MMIC

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۳۰ تیر ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۶ مهر ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۲۴ مهر ۱۴۰۳

چکیده:

پیشرفت‌های صنعت مخابرات فضایی و نیاز به طراحی فرستنده‌هایی با نرخ بیت ارسالی بالا از یک‌سو و محدودیت توان مصرفی ماژول‌های ماهواره از سوی دیگر، اهمیت بالا بودن راندمان تقویت‌کننده‌های توان را به‌عنوان یکی از اجزای اصلی فرستنده‌ها با بیشترین توان مصرفی، بیش‌ازپیش ساخته است. در این مقاله به بررسی روشی جهت افزایش راندمان و خطینگی یک تقویت‌کننده‌ی توان دو طبقه کلاس AB با استفاده از یک 500nm GAN HEMT برای فرستنده یک ماهواره سنجشی جهت ارسال تصاویر اخذ شده در باند فرکانسی X پرداخته شده است. تقویت‌کننده طراحی شده دارای توان اشباع ۴۹/۸۴dBm، بهره ۲۳/۹dB و راندمان ۳۷٪در بازه‌ی فرکانسی ۱۰/۷-۱۱/۲GHz با ولتاژ دِرین ۴۰V است که در مقایسه با دیگر تقویت‌کننده‌های مشابه در این باند دارای توان خروجی و بهره بالاتر است. مشخصات خطینگی این تقویت‌کننده ۱dB AM/AM، ۴deg/dB AM/PM و ۲۳dBc IM3 در فرکانس مرکزی ۱۰/۹۵GHz بوده و دارای پهنای باند ۳۶MHz است.

کلیدواژه‌ها: تقویت‌کننده توان، فرستنده ماهواره، فناوری GaN HEMT، مدارات مجتمع یکپارچه.

تازه‌های تحقیق:

- طراحی تقویت‌کننده توان با توان خروجی و راندمان بالا.
- طراحی تقویت‌کننده توان جهت کاربرد فضایی برای ارسال داده‌های یک ماهواره سنجشی.
- کاهش توان مصرفی فرستنده ماهواره با افزایش راندمان تقویت‌کننده توان.

۱-مقدمه

پیشرفت‌های روزافزون صنعت ارتباطات فضایی و نیاز به فرستنده‌هایی با نرخ بیت بالا از یک‌سو و محدودیت‌های توان مصرفی ماژول‌ها در ماهواره از سوی دیگر، چالش جدی برای طراحان برای برقراری لینک ارتباطی مطمئن، ایجاد نموده است. بهبود توان مصرفی و راندمان تقویت‌کننده‌های توان به‌عنوان یکی از اجزای اصلی فرستنده‌ها که بیشترین توان مصرفی را در این ماژول دارند، نقش مهمی در بهبود عملکرد فرستنده ایفا می‌نماید [۱]. درزمینهٔ طراحی تقویت‌کننده‌های توان راندمان بالا در مدارات ماکروویوی پژوهش‌های بسیاری انجام شده است [۲-۷].

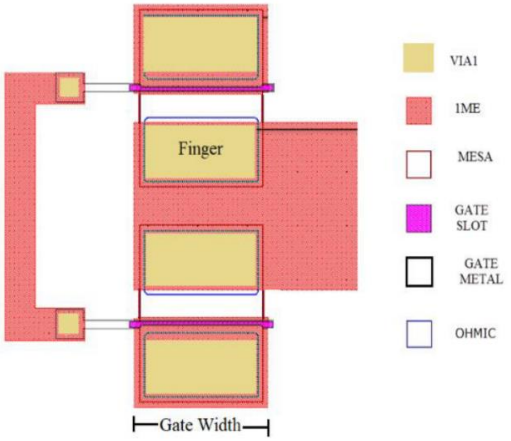
امروزه ترانزیستورهای HEMT[1] با فناوری نیمه‌هادی ALGaN/GaN به‌صورت گسترده‌ای در طراحی تقویت‌کننده‌های توان مورداستفاده قرار می‌گیرند [۸]. ولتاژ شکست بالا، سرعت بالا، چگالی توان بالا و راندمان بالا از اساسی‌ترین مزایای HEMTهاست که آن‌ها را به گزینه مناسبی برای طراحی تقویت‌کننده توان بالا تبدیل می‌کند [۹]. مطالعات زیادی در زمینه مدارات مجتمع یکپارچه (MMIC)[2]ی GaN HEMT صورت گرفته است [۱۰].

بر اساس استانداردهای ITU[3]، باند فرکانسی X یکی از باندهای فرکانسی رایج جهت ارسال تصاویر ماهواره‌ای به شمار می‌رود. طراحی یک فرستنده در این باند با راندمان توان بالا با توجه به محدودیت توان مصرفی، بسیار اهمیت دارد. در مقالات بسیاری به مطالعه در زمینه تقویت‌کننده‌های توان MMIC مبتنی بر فناوری GaN پرداخته شده است [۱۱]. تقویت‌کننده‌های مبتنی بر این فناوری، به کاهش اندازه، پیچیدگی ماژول تقویت‌کننده، بهبود راندمان و تحقق توان بالا در سیستم‌های مخابرات فضایی کمک زیادی نموده است [۱۲].

در این مقاله یک تقویت‌کننده توان دو طبقه‌ی MMIC کلاس AB با راندمان ۳۷٪ به کمک یک 500nm GaN HEMT برای فرستنده یک ماهواره سنجشی جهت ارسال تصاویر اخذ شده طراحی شده است. تقویت‌کننده پیشنهادی در فرکانس مرکزی ۱۰/۹۵GHz با پهنای باند رادیویی ۵۰۰MHz دارای توان خروجی ۴۹/۸۴dBm به همراه بهره ۲۳/۹dB است.

۲-معرفی فناوری ساخت پیشنهادی

در این مقاله برای طراحی و شبیه‌سازی تقویت‌کننده از فناوری ساخت و مشخصات پروسه PDK[4] ساخت شرکت NRC کانادا استفاده شده است که دارای مشخصه حداقل طول گیت ۵۰۰ نانومتر برای HEMT GaN است. ولتاژ شکست برای این فناوری در حدود ۱۰۰ ولت و حداکثر فرکانس کاری ۶۰ گیگاهرتز ارائه شده است. همچنین چگالی توان $5\ w/mm^2$ با توجه به ساختار بستر قابل تحقق بوده و خازن استفاده شده بر روی تراشه از نوع MIM[5] با چگالی ظرفیت خازنی $0/19fF/\mu m^2$ است. مقاومت بر روی تراشه بکار رفته در این فناوری از نوع نیکروم با مقاومت ویژه ۵۰ Ω/sq است.



شکل ۱: نمایی از ساختار ترانزیستور.
Figure 1. Structure of transistor.

[1] high-electron-mobility transistor
[2] Monolithic Microwave Integrated Circuit
[3] International Telecommunication Union
[4] Process Design Kit
[5] Metal Insulator Metal

پروسه استفاده شده جهت طراحی و شبیه‌سازی تقویت‌کننده دارای ترانزیستور با Finger و پهنای گیت[1] متغیر است. به‌طور مثال شکل ۱ با مشخصه ۱۰۰×۲ میکرومتر مشخص می‌شود که عدد ۲ مربوط به تعداد Finger و ۱۰۰ پهنای گیت را بیان می‌کند.

ولتاژ بایاس درین-سورس پیشنهاد شده در این پروسه ۴۰ ولت و ولتاژ بایاس گیت-سورس از ۸- تا ۲+ ولت می‌تواند متغیر باشد. از مشخصه‌های دیگر این پروسه می‌توان به ضخامت زیرلایه (۷۵ میکرومتر)، ثابت دی‌الکتریک (۱۰) در ترانزیستور و ثابت دی‌الکتریک (۶.۵) برای خازن و نیز میزان رسانایی هادی ($4.1\ e^7 s/m$) اشاره کرد [۱۳].

۳-پارامترهای تقویت‌کننده توان

هدف از طراحی تقویت‌کننده در این مقاله، راندمان بالا، پایداری خوب و خطی بودن فاز در کنار یک بهره مناسب است [۱۴]. برخی از پارامترهای مهم تقویت‌کننده‌ها در ادامه تشریح شده است.

۳-۱-راندمان

راندمان (PAE)[2] نسبت توان خروجی مؤثر و توان ورودی DC است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (۱)$$

که در آن Pout و Pin به ترتیب توان خروجی و ورودی سیگنال رادیویی و PDC توان DC سیگنال ورودی است [۱۵].

۳-۲-پایداری

پایداری تقویت‌کننده تابعی از پارامترهای اسکترینگ آن بوده و نشان‌دهنده مقاومت آن در برابر نوسان است. ضریب پایداری رولت که بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود، می‌بایست بزرگتر یا مساوی یک باشد (K≥1) تا تقویت‌کننده بدون قید و شرط پایدار باشد [۱۳].

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2 S_{12} S_{21}} \geq 1 \quad (۲)$$

پارامترهای فوق نیز با معادلات زیر بیان می‌شوند:

$$\Delta = |S_{11} S_{22} - S_{21} S_{12}| < 1 \quad (۳)$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 > 0 \quad (۴)$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2 > 0 \quad (۵)$$

شرط k≥1، شرط لازم برای پایداری بوده و برای داشتن پایداری باید شروط |Δ|<1، یا B1>0 یا B2>0 در کنار K≥1 برقرار باشند. به‌عنوان یک جایگزین ساده‌تر، پارامترهای μ_{Source} و μ_{load} به کمک روابط ۶ و ۷ در نظر گرفته شده و فاکتورهای پایداری هندسی نامیده می‌شوند.

$$\mu_{source} = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \Delta(S_{11}^*)| + |S_{21} S_{12}|} \geq 1 \quad (۶)$$

$$\mu_{load} = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - \Delta(S_{22}^*)| + |S_{21} S_{12}|} \geq 1 \quad (۷)$$

[1] Gate Width
[2] power added efficiency

AM/AM-۳-۳ و AM/PM

در تقویت‌کننده‌های توان، جهت سنجش خطینگی پارامتر AM/PM مورد سنجش قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده انحراف فاز نامطلوب خروجی ناشی از تغییرات دامنه ورودی است. علاوه بر این، نسبت تغییرات دامنه خروجی به دامنه ورودی نیز AM/AM نامیده می‌شود[۱۶].

IMD3-۴-۳

IMD3[1] یک پارامتر خطی برای اندازه‌گیری اختلاف دامنه سیگنال اصلی و هارمونیک سوم آن در تست دو تُن است. در این حالت خاصیت حافظه‌دار بودن تقویت‌کننده منجر به رفتار غیرخطی شده و در فرکانس‌های $2f_1-f_2$ و $2f_2-f_1$ اندازه‌گیری می‌شود [۱۷]. بیشترین اختلاف نشان‌دهنده عملکرد بهتر تقویت‌کننده است.

بهره-۵-۳

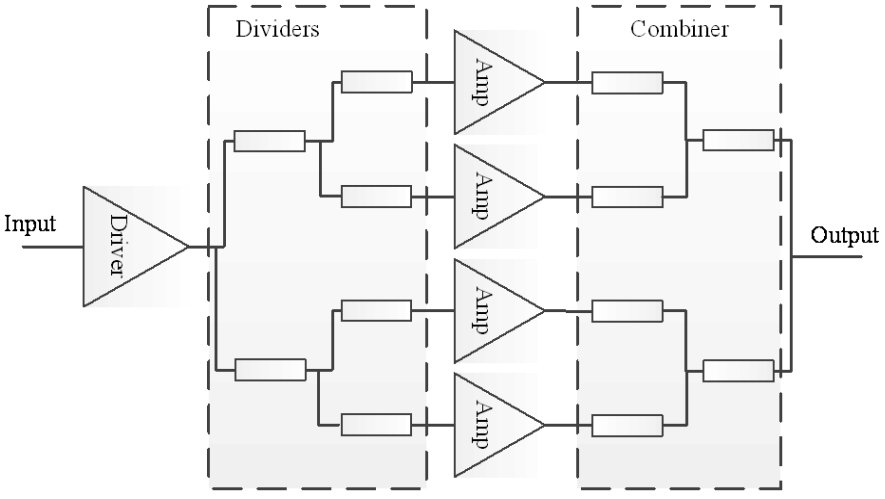
بهره یک تقویت‌کننده توان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (۸)$$

این رابطه بیان‌گر وجود یک رابطه خطی بین ورودی و خروجی تقویت‌کننده بوده و مادامی‌که عوامل غیرخطی ساز تأثیرگذار شوند، برقرار است [۱۶] .

MMIC طراحی تقویت‌کننده-۴

هدف از طراحی، داشتن یک تقویت‌کننده باند X برای ارتباطات ماهواره‌ای (۱۰/۷-۱۱/۲GHz) است. با توجه به محدودیت توان مصرفی المان‌های یک ماهواره، وجود بهره خوب در کنار راندمان بالا، نیاز اصلی در طراحی فرستنده‌های فضایی است. در این مقاله، از تکنولوژی ۵۰۰nm AlGaN/GaN HFET، برای طراحی تقویت‌کننده توان MMIC دو طبقه‌ای استفاده شده است. شکل۲ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده توان MMIC پیشنهادی را نشان می‌دهد.

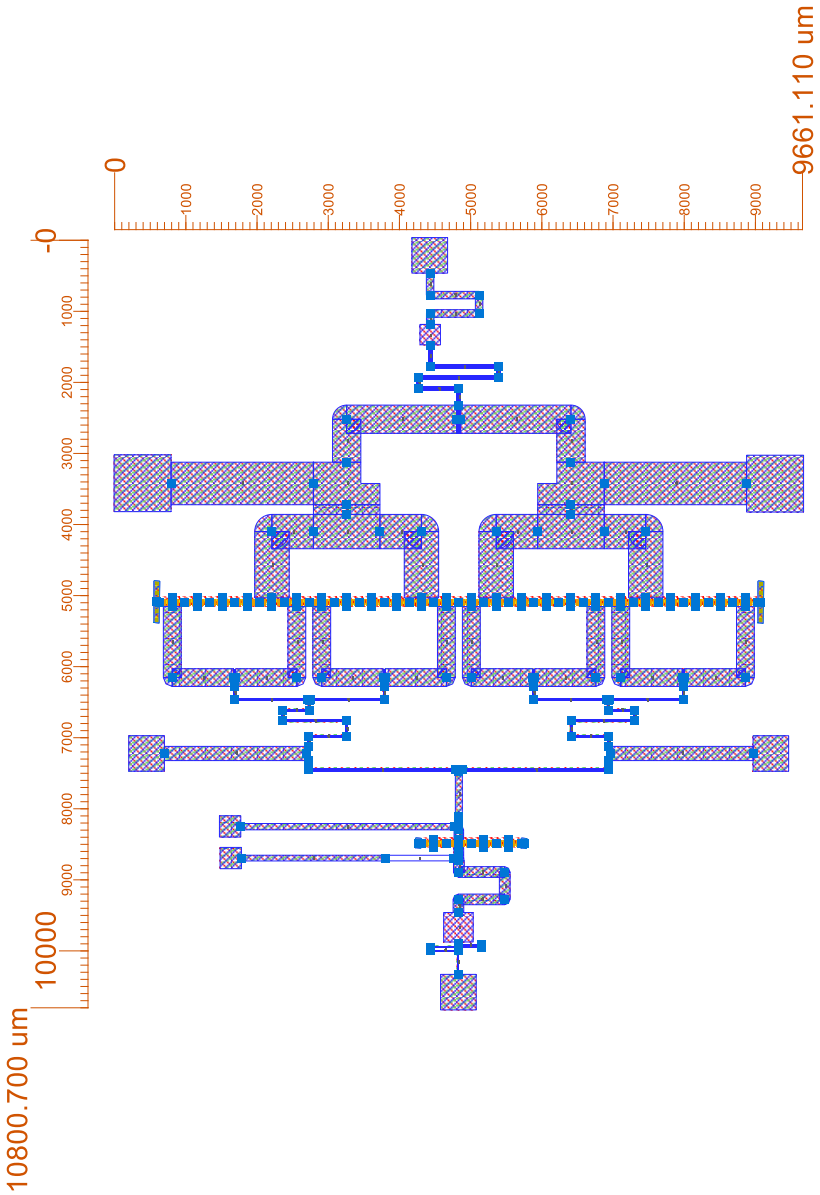


شکل ۲: بلوک دیاگرام تقویت‌کننده توان
Figure 2. Block diagram of power amplifier

در این پژوهش، یک تقویت‌کننده توان دو طبقه کلاس AB طراحی شده است که شامل طبقه‌ی درایور و تقویت‌کننده می‌شود. درایور از چهار ترانزیستور با ابعاد ۸×۷۰μm و تقویت‌کننده نیز از چهار آمپلی‌فایر با شش ترانزیستور ۸×۷۰μm تشکیل شده است که برای بهبود جریان دِرِین-سورس و خروجی توان بالا به‌صورت موازی به هم متصل می‌شوند.

[1] third-order intermodulation distortion

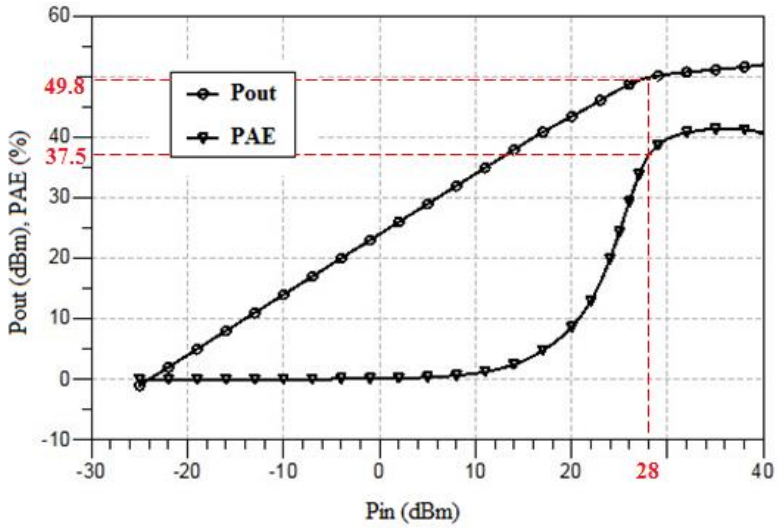
در هنگام طراحی می‌بایست پارامترهای P1dB، بهره، پایداری وPAE مورد بررسی قرار بگیرد که در این طراحی، به کمک نرم‌افزار Advanced Design System Momentum (ADS) و Design Kit GaN500 تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های موردنیاز انجام شده است. ابعاد نهایی طرح حدود ۹/۷×۱۰/۸میلی‌متر و مساحت تقریبی آن $۱۰۴mm^2$ است.



شکل ۳: تقویت‌کننده توان طراحی شده
Figure 3. Designed power amplifier

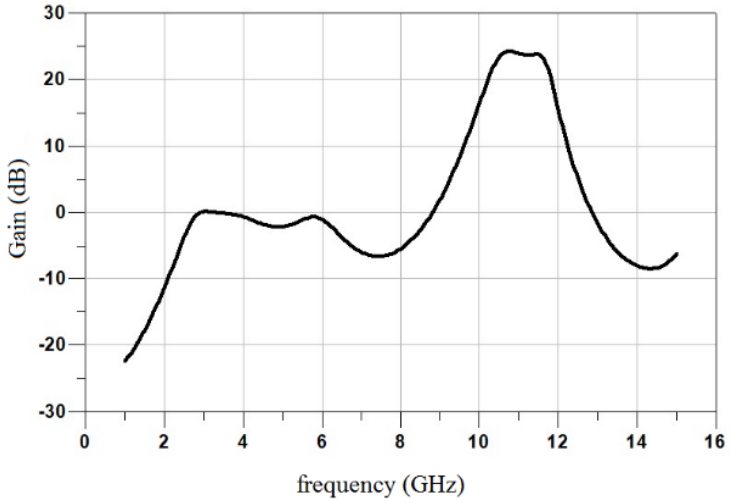
در هر دو طبقه، ولتاژ درِین ۴۰V و ولتاژ گیت ۲/۲V- اعمال‌شده و برای دستیابی به توان خروجی بالاتر در تقویت‌کننده‌ی اصلی، ترانزیستورها در ناحیه خطی بایاس شده‌اند. استفاده کمتر از قطعات نیز در طبقه درایور و تقویت‌کننده موجب کاهش توان مصرفی نهایی تقویت‌کننده می‌شود. شکل ۳ طرح و ابعاد MMIC طراحی شده را نشان می‌دهد.

شکل ۴ مشخصه‌های Pout و PAE را به‌عنوان تابعی از Pin در فرکانس ۱۰/۷GHz نشان می‌دهد. در شرایطی که توان سیگنال ورودی 28dBm است، P1dB و PAE به ترتیب ۴۹/۸dBm و ۳۷٪ به‌دست‌آمده است. بر این اساس برای ماکزیمم توان خطی، راندمان ۳۷٪ است. با افزایش توان سیگنال ورودی به ۴۰dBm، ۴۰/۵PAE٪ و توان خروجی اشباع شده ۵۱/۸۶dBm است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با توجه به مینیمم توان ورودی موردنیاز برای درایو کردن تقویت‌کننده، مقدار PAE تا رسیدن به حد مطلوب ورودی، صفر است.



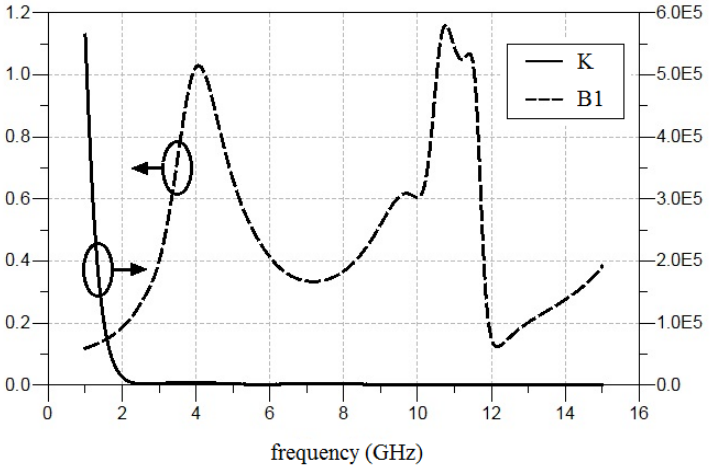
شکل ۴: P_{out} و PAE تقویت‌کننده طراحی شده
Figure 4. Designed power amplifier P_{out} and PAE

از سوی دیگر با توجه به موازی کردن چند ترانزیستور با یکدیگر در هر طبقه، بهبود راندمان در توان‌های ورودی بالاتر خود را نشان می‌دهد. شکل ۵ بهره تقویت‌کننده در فرکانس مرکزی ۱۰/۹۵GHzرا نشان می‌دهد. بر این اساس پهنای باند رادیویی تقویت‌کننده موردمطالعه ۵۰۰MHz و بهره ۲۳/۹۷dB قابل حصول است.

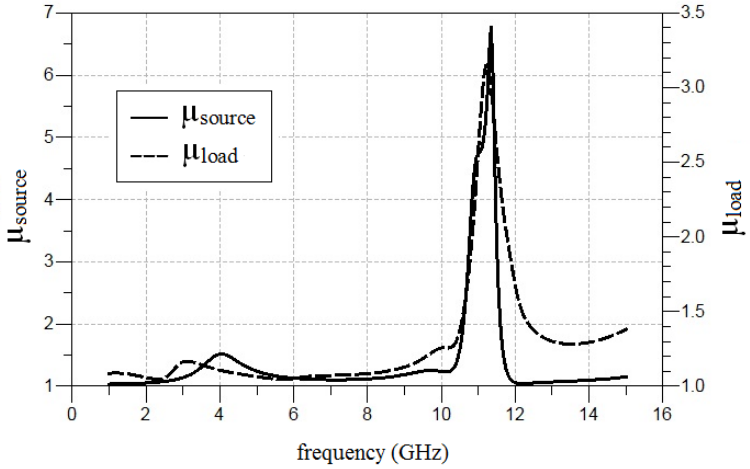


شکل ۵: بهره تقویت‌کننده
Figure 5. Gain of power amplifier

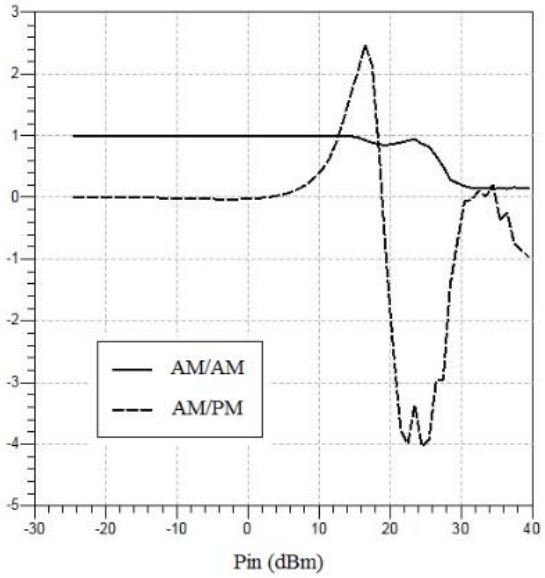
پایداری تقویت‌کننده نیز یکی دیگر از الزامات طراحی است که به آن اشاره شده است. ضریب پایداری رولت (K) و پایداری هندسی (μ_{Source} و μ_{load}) بیش از یک هستند که به معنای پایدار بودن تقویت‌کننده توان طراحی شده در کل محدوده فرکانسی است. این پارامترهای پایداری در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.



شکل ۶: ضریب پایداری رولت
Figure 6. Rollet's stability factor



شکل ۷: فاکتورهای پایداری هندسی
Figure 7. Geometric Stability factor

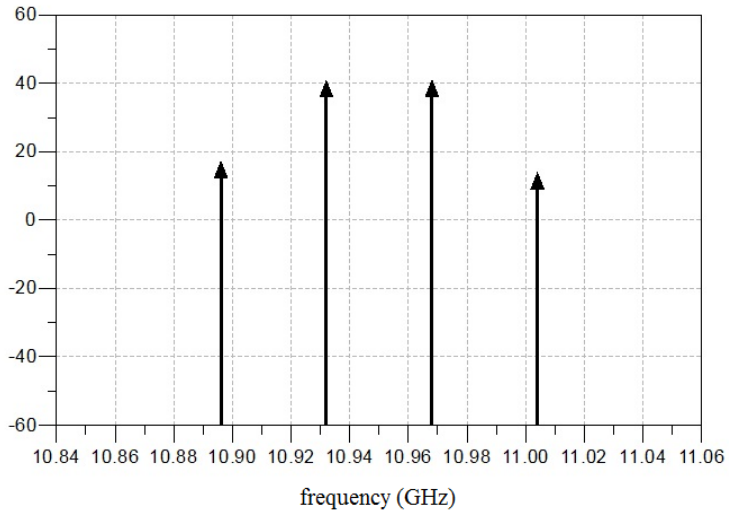


شکل ۸: AM/AM و AM/PM
Figure 8. AM/AM and AM/PM

شکل ۸ مشخصه‌های AM/AM و AM/PM را بر اساس توان سیگنال ورودی نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، کمترین مقدار AM/PM برابر ۴deg/dB- است و معادل توان ورودی ۲۴/۵dBm است که با نزدیک شدن مقدار AM/PM به صفر تغییرات فاز نسبت به دامنه کمتر شده و موجب مطلوب‌تر شدن طراحی می‌گردد. برای دیگر سیگنال‌های ورودی، AM/PM بیشتر است و درنتیجه تقویت‌کننده در مقادیر مختلف فاز، خطی است.

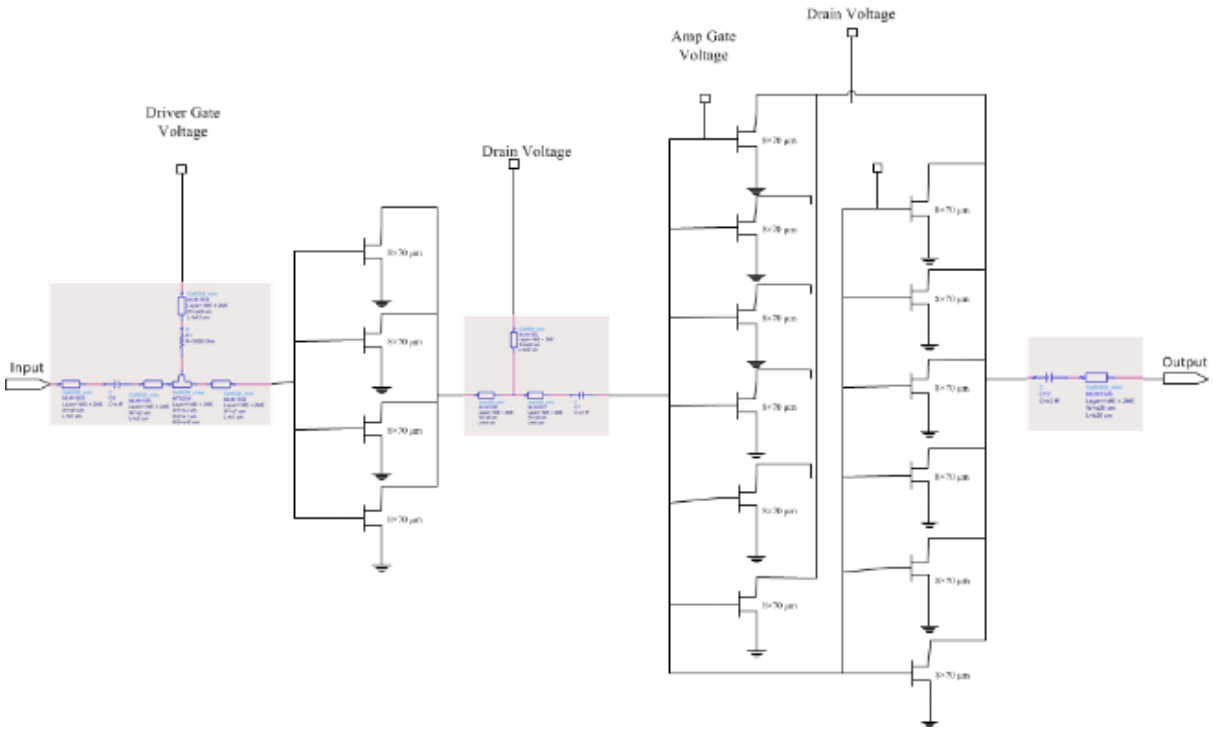
مشخصات IMD3 در کانال با پهنای باند ۳۶MHz با توان سیگنال ورودی ۲۸dBm در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل‌های ۱۰ و ۳ نیز به ترتیب شماتیک و طرح تقویت‌کننده را نشان می‌دهند. ابعاد نهایی MMIC طراحی شده در این مقاله، ۱۰/۸×۹/۶۶۱mm با مساحت ۱۰۴/۳۴mm^2 است.



شکل ۹: IMD در کانال 36MHz

Figure 9. IMD in 36MHz Channel



شکل ۱۰: شماتیک MMIC طراحی شده

Figure 10. Shematic of desined power amplifier

جدول ۱: مشخصات تقویت‌کننده توان
Table 1. Specification of the power amplifier

Specification	Value
Frequency	X band (10.95 GHz)
PAE	37% @ Pin=28 dBm
Output power P1dB	49.84 dBm @ Pin=28 dBm
Small signal gain	23.97 dB @ 10.95 GHz
IMD3	-23.5 dBc @ Pin=22 dBm
AM/PM	-4.0 deg/dB
AM/AM	1 dB/dB

مشخصات تقویت‌کننده توان طراحی شده در جدول ۱ به‌طور خلاصه آمده است.

یکی دیگر از پارامترهایی که در بررسی تقویت‌کننده به آن پرداخته می‌شود، عدد شایستگی (FOM) در جدول است که از رابطه ۹ محاسبه‌شده [۱۸] و برای تقویت‌کننده طراحی شده ۱۱۰/۲ است. در این رابطهPout توان خروجی، f0 فرکانس مرکزی برحسب گیگاهرتز و PAE راندمان تقویت‌کننده است.

$$FOM = P_{out}\left(dBm\right) + Gain\left(dB\right) + 20\log(f_0) + 10\log\left(PAE\right) \quad (۹)$$

در جدول ۲ مقایسه مختصری از تقویت‌کننده‌های طراحی شده با تقویت‌کننده موردبحث در این مقاله نشان داده شده است.

جدول ۲: مقایسه چند تقویت‌کننده توان
Table 2. Comparison of several power amplifiers

Frequency Range	Technology	Gain (dB)	Vd (V)	Pout (dBm)	PAE (%)	FOM	Ref.
10GHz	GaN MMIC	20.4	20	40	55	98	[3]
X Band	GaN MMIC	14	21	36.4	57	88	[4]
9.5-10.5 GHz	GaN MMIC	8	32	42.55	50	88	[5]
9.8 GHz	GaN MMIC	12	30	34.77	71	85.6	[6]
X Band	GaN MMIC	11	30	47	50	95	[7]
10.95 GHz	GaN MMIC	23.9	40	49.84	37	110.2	here

همان‌طور که در جدول قابل‌مشاهده است، تقویت‌کننده طراحی شده دارای عدد شایستگی بالایی نسبت به نمونه‌های دیگر در یک بازه فرکانسی مشخص (باند X)، دارای توان خروجی بیشتر و بهره بالاتری است. در این تقویت‌کننده توان خروجی ۴۹/۸۴dBm به ازای توان ورودی ۲۸dBm به همراه بهره ۲۳/۹dB به‌دست‌آمده است.

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تقویت‌کننده توان دو طبقه‌ی MMIC با راندمان ۳۷٪ به کمک یک 500nm GaN HEMT برای فرستنده یک ماهواره سنجشی جهت ارسال تصاویر اخذ شده طراحی شده است. در طراحی تقویت‌کننده توان حفظ موازنه بین پارامترهای توان خروجی، بهره و خطینگی تقویت‌کننده اهمیت داشته و مسیر طراحی را مشخص می‌نماید. به‌طوری‌که با افزایش توان خطی خروجی، راندمان تقویت‌کننده کاهش می‌یابد. مقایسه مشخصات تقویت‌کننده توان طراحی شده با نمونه‌های مشابه دیگر بیان‌کننده توان خروجی و بهره بالاتر است که پارامتر FOM مؤید این مسئله است.

مراجع

[1] L. Kang, W. Chen, and A. Wu, "A Reconfigurable S-/X-Band GaN MMIC Power Amplifier," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 6, pp. 547-550, June 2022, doi: 10.1109/LMWC.2022.3141230.

[2] K. Fukunaga, T. Sugitani, Y. Yamaguchi, D. Tsunami, M. Hangai, and S. Shinjo, "X-band 100 W-class Broadband High Power Amplifier Using High Power Density GaN-HEMTs," *IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)*, Hiroshima, Japan, 2020, pp. 67-69, doi: 10.1109/RFIT49453.2020.9226232.

[3] A. Zai, Dongxue Li, S. Schafer, and Z. Popovic, "High-efficiency X-band MMIC GaN power amplifiers with supply modulation," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, Tampa, FL, USA,

2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/MWSYM.2014.6848545.

[4] A. Margomenos *et al*., "X band highly efficient GaN power amplifier utilizing built-in electroformed heat sinks for advanced thermal management," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Seattle, WA, USA, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/MWSYM.2013.6697330.

[5] H. Uchida, H. Noto, K. Yamanaka, M. Nakayama, and Y. Hirano, "An X-band internally-matched GaN HEMT amplifier with compact quasi-lumped-element harmonic-terminating network," *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6258359.

[6] M. Litchfield, M. Roberg, and Z. Popović, "A MMIC/hybrid high-efficiency X-band power amplifier," *IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications*, Austin, TX, USA, 2013, pp. 10-12, doi: 10.1109/PAWR.2013.6490172.

[7] J. Kamioka, Y. Tarui, Y. Kamo, and S. Shinjo, "54% PAE, 70-W X-Band GaN MMIC Power Amplifier With Individual Source via Structure," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1149-1152, Dec. 2020, doi: 10.1109/LMWC.2020.3031273.

[8] N. Keigo, Y. Yamaguchi, T. Torii, and M. Tsuru. "A Review of GaN MMIC Power Amplifier Technologies for Millimeter-Wave Applications," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E105-C, no. 10, pp. 433-440, 2022, doi: 10.1587/transele.2022MMI0006.

[9] K. Nakatani, Y. Yamaguchi, and M. Tsuru, "A Ka-Band 40 W Output Power and 30 % PAE GaN MMIC Power Amplifier for Satellite Communication," *16th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, London, United Kingdom, 2022, pp. 285-288, doi: 10.23919/EuMIC50153.2022.9783994.

[10] M. Ayad, N. Poitrenaud, V. Serru, M. Camiade, J. Gruenenpuett, and K. J. Riepe, "A High Efficiency MMIC X-band GaN Power Amplifier," *50th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 788-791, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338001.

[11] P. Dennler, D. Schwantuschke, R. Quay, and O. Ambacher, "8–42 GHz GaN non-uniform distributed power amplifier MMICs in microstrip technology," *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259604.

[12] J. Kühn, *AlGaN-GaN-HEMT Power Amplifiers With Optimized Power-Added Efficiency for X-Band Applications*. KIT Scientific Publishing, 2011.

[13] P. Aliparast and A. Farhadi, "Design of X Band High Power Amplifier MMIC Based on AlGaN/GaN HEMT," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 16, no. 2, pp. 37-45, 2019 [in Persian].

[14] S. Masuda *et al*., "Over 10W C-Ku band GaN MMIC non-uniform distributed power amplifier with broadband couplers," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Anaheim, CA, USA, 2010, pp. 1388-1391, doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517992.

[15] C. Campbell, C. Lee, V. Williams, M. -Y. Kao, H. -Q. Tserng, and P. Saunier, "A Wideband Power Amplifier MMIC Utilizing GaN on SiC HEMT Technology," *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium*, Monterey, CA, USA, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSICS.2008.38.

[16] S. Kassim and F. Malek, "Microwave FET amplifier stability analysis using Geometrically-Derived Stability Factors," *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIAS.2010.5716171.

[17] T.J. Rouphael, *Wireless Receiver Architectures and Design: Antennas, RF, Synthesizers, Mixed Signal, and Digital Signal Processing*. Academic Press, 2014.

[18] H. Pandey, "Power Amplifire gain," Available: http://www.scribd.com.

JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.71656/jce.2025.1128536

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

Multi-Input Multi-Output Compact Antenna with One-Way Circular Polarization for WiMAX 3.5 and ITU-R Applications

Mir Tohid Aribi [1]

1Department of Electrical Engineering, Miy.C., Islamic Azad University, Miyandoab, Iran.
tohid.aribi@iau.ac.ir

Correspondence
Tohid Aribi, Assistant Professor of Electrical Engineering, Miy.C., Islamic Azad University, Miyandoab, Iran.
tohid.aribi@iau.ac.ir

Main Subjects:
Antenna Design

Paper History:
Received: 8 August 2024
Revised: 17 August 2024
Accepted: 26 August 2024

Abstract

In this research, a compact multi-layer microstrip antenna for Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems with dual-band circular polarization capability has been designed, simulated, and fabricated. The antenna structure employs separate coupling networks for each frequency band, each comprising a hairpin resonator, a straight slot, and a U-shaped groove. This configuration enables the establishment of two signal paths with the requisite phase difference to feed the patch. By applying a ±90° phase shift, the antenna achieves dual-band circular polarization operation. The principal innovation of this work is the implementation of a multi-layer feeding network that ensures an axial ratio below 3 dB, achieved through the combined action of the straight slot and U-shaped groove to excite a circular polarization resonance mode. The antenna exhibits right-hand and left-hand circular polarization characteristics in different frequency bands. Simulation and experimental results validate the antenna's performance, demonstrating impedance bandwidths of 3.0–4.2 GHz and 5.5–6.6 GHz, with near-complete circular polarization coverage across the first band. The gain response increases linearly with frequency, achieving an average value of 5 dB.

Keywords: Antenna, Dual-band, Circular polarization, Multi-Input Multi-Output.

Highlights

- Enhanced system efficiency across dual frequency bands.
- Improved axial ratio via novel U-slot/straight-slot hybrid feed.
- Compact MIMO antenna with dual-band circular polarization.

Citation: M.T. Aribi, "Multi-Input Multi-Output Compact Antenna with One-Way Circular Polarization for WiMAX 3.5 and ITU-R Applications," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 15–27, 2025, doi:10.71656/jce.2025.1128536 [in Persian].

1. Introduction

In the era of rapid technological advancement, wireless communication systems have undergone significant transformation, encompassing applications from satellite systems and local wireless networks to the Internet of Things (IoT). These developments have underscored the need for antennas with specialized capabilities. Slot-fed microstrip antennas, renowned for their stable radiation characteristics and wide bandwidth, have emerged as ideal candidates for supporting a diverse range of wireless communication systems.

Such antennas must not only be compact but also deliver optimal performance in terms of bandwidth and gain, complying with IEEE standards. A critical feature in contemporary antenna design is the ability to achieve circular polarization, which offers superior resistance to multipath fading and markedly improves communication quality. Additional benefits of circular polarization include robustness against adverse weather conditions and reduced sensitivity to transmitter-receiver orientation.

A major design challenge lies in integrating these characteristics into compact, planar structures that can be seamlessly combined with active components. Printed antennas employing varied feeding techniques and configurations are widely regarded as the most promising solution for meeting the demands of high-frequency systems.

Designing MIMO antennas capable of covering multiple frequency bands with satisfactory radiation performance presents a considerable challenge in antenna engineering. These antennas must demonstrate adequate impedance bandwidth, effective axial ratio, desirable gain, and optimal radiation patterns across their operational bands.

2. Innovation and contributions

In this paper, a novel MIMO antenna structure is proposed. The design significantly enhances system efficiency by optimizing performance across both operational frequency bands. A hybrid feeding structure combining U-slot and straight-slot elements is introduced to improve the axial ratio, ensuring high-quality circular polarization. The compact MIMO antenna achieves dual-band circular polarization, making it well-suited for modern wireless applications that demand miniaturization and multi-band operation.

3. Materials and Methods

The U-shaped groove serves a dual purpose, functioning both as a coupling structure and as a single-mode resonator, delivering a resonant frequency comparable to that of a circular resonator. For the directly fed patch antenna, the circle radius is set at 12 mm in accordance with cavity antenna theory, ensuring operation at a single resonant frequency. In contrast, the U-slot and circular patch design employs a slot-coupled feed to establish coupling between the ground plane and the radiating patch. This approach not only enhances the radiation characteristics of the antenna but also introduces additional resonances, resulting in improved bandwidth.

Furthermore, duplexing and filtering capabilities are seamlessly incorporated into the dual-band patch antenna. The integration of these functions into a single device holds the potential to reduce the size, complexity, and manufacturing costs of wireless systems, offering a compact and efficient solution for modern communication applications.

4. Results and Discussion

To validate the antenna's performance, the multi-layer structure was fabricated and experimentally evaluated at the Antenna and Microwave Research Center of Islamic Azad University, Urmia Branch. The measured results demonstrate good agreement with simulations, confirming the correct functionality of the proposed design.

Figure I presents a comparison between the simulated and measured return loss (S_{11}) of the antenna. Minor discrepancies observed are primarily attributed to non-ideal connector effects and frequency-dependent substrate dispersion.

Figure II displays the measured axial ratio performance. The results confirm that circular polarization is maintained across the impedance bandwidth of 2.8–4.3 GHz, fully covering the first operational band. This consistent circular polarization across the entire band represents a key achievement of the design.

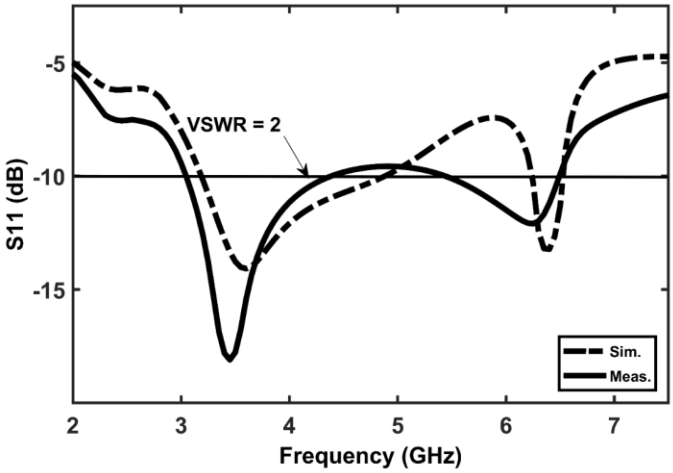


Figure I: Return Loss Curves of the Proposed Antenna in Both Simulated and Measured States.

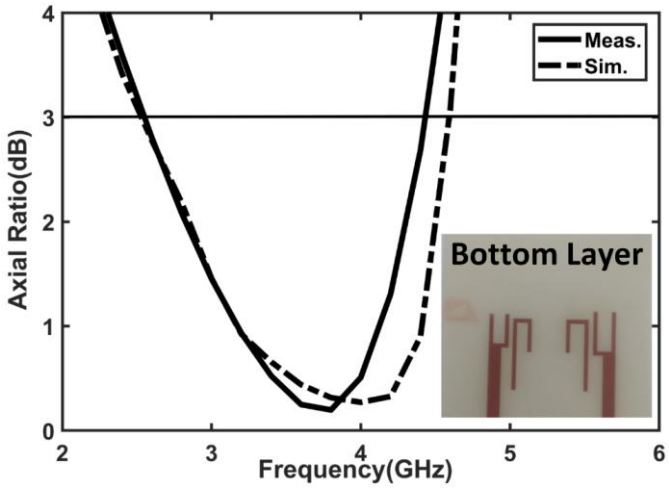


Figure II: Axial Ratio Curve of the Proposed Antenna

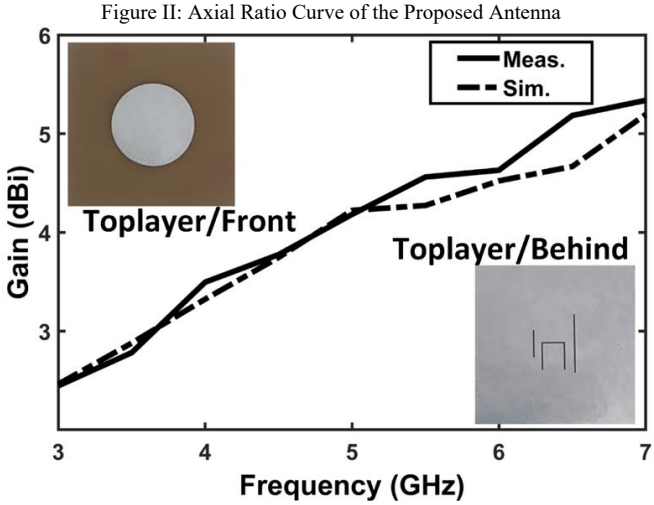


Figure III: Antenna Gain Variation Characteristics under Two Operational Conditions

The second resonator, configured as a hairpin, U-slot, and patch resonator, establishes a mutually coupled network. This configuration creates two distinct paths to deliver the input signal to the patch resonator, exciting two orthogonal modes. A 90-degree phase delay is incorporated to fulfill the theoretical requirements for exciting orthogonal modes, thereby enabling circular polarization.

Figure III illustrates the variation of antenna gain as a function of frequency. The gain demonstrates a quasi-linear increasing trend across the operational band.

5. Conclusion

This paper presents the design, simulation, and fabrication of a compact multi-layer microstrip MIMO antenna with dual-band circular polarization capability. The antenna structure employs separate coupling networks for each frequency band, each comprising a hairpin resonator, a straight slot, and a U-shaped groove. This configuration enables the generation of right-hand and left-hand circular polarization in distinct frequency bands. Simulation and experimental results validate the antenna's performance, demonstrating impedance bandwidths of 3.0–4.2 GHz and 5.5–6.6 GHz. Circular polarization is maintained across nearly the entire first band. The antenna gain exhibits a linearly increasing trend with frequency, achieving an average gain of 5 dB.

6. Acknowledgement

The authors extend their sincere gratitude to the Microwave and Antenna Research Center at Islamic Azad University, Urmia Branch, for their support in the measurement and validation of the device.

References

[1] T. Sedghi, T. Aribi, and A. Kalami, "WiMAX and C bands semi-fractal circularly polarized antenna with satellite bands filtering properties," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 10, no. 8, November 2018, doi: 10.1017/S1759078718000673.

[2] T. Aribi, M. Naser-Moghadasi, and R.A. Sadeghzadeh, "Circularly polarized beam-steering antenna array with enhanced characteristics using UCEBG structure," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 8, no.6, September 2016, doi: 10.1017/S1759078715000318.

[3] MM. Maleki, T. Aribi, and A. Shadmand, "Implementation of a Miniaturized Planar 4-Port Microstrip Butler Matrix for Broadband Applications," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol 9, no.1, Janurary 2020, doi: 10.22070/jce.2020.5295.1154.

[4] T. Sedghi, "Compact fractal antenna for WiMAX 1.4 GHz and IEEE 802.11a using double branch line, " Journal of Instrumentation, vol. 13, no. 9, pp. 1-10, September 2018, doi: 10.1088/1748-0221/13/09/P09021.

[5] T. Sedghi, "Compact Unit-cell based Semi-Fractal Antenna with filtering properties of interference Bands Embedded with CBP Strips," IETE Journal of Research, vol. 65, no. 6, pp. 790-795, November, 2019, doi: 10.1080/03772063.2018.1464973.

[6] T. Sedghichongaralouye-Yekan, M. Naser-Moghadasi, and R. A. Sadeghzadeh, "Broadband Circularly Polarized 2×2 Antenna Array with Sequentially Rotated Feed Network for C-Band Application," *Wireless Personal Communications*, vol. 91, no. 2, pp. 653-660, November 2016, doi: 10.1007/s11277-016-3485-4.

[7] M. Naser-Moghadasi, and T. Sedghichongaraluye-Yekan, "Semifractal antenna with dualbands filtering and circular polarization properties using SCBP and MDGS structures," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 57, no. 11, pp. 2483-2487, November, 2015, doi: 10.1002/mop.29372.

[8] S. Rezaee and Y. Zehforoosh, "Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.11, no. 43, pp. 15-26, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.689028, [in Persian].

[9] ZZ. A. Darabi and S. S. Tehrani, "Design and Simulation a New Dual Band Dipole Antenna for RFID Tags," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.9, no. 35, pp. 69-76, 2021 [in Persian].

[10] FF. Heidari, Z. Adelpoure, and N. Parhizgar, "Simulation of Leaky Wave Antenna with Cosecant Squared Pattern Using Genetic Algorithm," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.11, no. 42, pp. 69-76, 2022 [in Persian].

Declaration of Competing Interest: The Author does not have a conflict of interest. The content of the paper is approved by the author.

Author Contributions: Mir Tohid Aribi: The entire article was done by him.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.71656/jce.2025.1128536

مقاله پژوهشی

آنتن فشرده چند ورودی-چند خروجی با قطبش دایروی یک‌سو برای کاربردهای WiMAX و ITU-R 3.5

میر توحید اریبی [۱]

[۱]گروه مهندسی برق، واحد میاندوآب، دانشگاه آزاد اسلامی، میاندوآب، ایران
tohid.aribi@iau.ac.ir

نویسنده مسئول
*میرتوحیداریبی، استادیار گروه مهندسی برق، واحد میاندوآب، دانشگاه آزاد اسلامی، میاندوآب، ، ایران.
tohid.aribi@iau.ac.ir

موضوع اصلی:
طراحی آنتن

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۸ مرداد ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۲۷ مرداد ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۵ شهریور ۱۴۰۳

چکیده:

در این پژوهش، یک آنتن ریز نوار چندلایه فشرده برای سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی با قابلیت قطبش دایروی دوبانده طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. ساختار این آنتن از شبکه‌های تزویج مجزا برای هر باند فرکانسی بهره می‌برد. هر شبکه از اجزای ظریفی همچون تشدیدکننده سنجاق‌مانند، شکاف مستقیم و شیار U شکل تشکیل شده است. این طراحی امکان ایجاد دو مسیر با اختلاف فاز مناسب را برای اتصال سیگنال ورودی به تشعشع کننده را فراهم می‌آورد. با اعمال تغییر فاز ۹۰ درجه مثبت یا منفی، آنتن قابلیت عملکرد خطی در هر دو باند فرکانسی را به دست می‌آورد. نوآوری اصلی این پژوهش در ایجاد قطبش دایروی با استفاده از الگوی تغذیه چندلایه است که نسبت محوری کمتر از ۳ دسی‌بل را تضمین می‌کند. این مهم از طریق به‌کارگیری ترکیب شکاف مستقیم و شیار U برای تولید حالت تشدید قطبش دایروی محقق شده است. این آنتن قادر به تولید مشخصه‌های قطبش دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد در باندهای مختلف است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های عملی، عملکرد مطلوب این آنتن را تائید می‌کنند. آنتن طراحی شده دارای پهنای باند امپدانسی در محدوده‌های ۳ تا ۴/۲ گیگاهرتز و ۵/۵ تا ۶/۶ گیگاهرتز است، و تقریباً در تمام باند فرکانسی اول، خصوصیت قطبش دایروی را محقق می‌سازد. منحنی بهره آنتن نیز یک روند افزایشی خطی را نشان می‌دهد که میانگین آن ۵ دسی‌بل است.

کلیدواژه‌ها: آنتن، دو بانده، قطبش دایروی، چند ورودی چند خروجی

تازه‌های تحقیق:

- افزایش کارایی سیستم در هر دو باند فرکانسی، همراه با الگوی تشعشعی بهینه‌شده
- بهبود نسبت محوری از طریق ترکیب نوآورانه شکاف مستقیم و شیار U شکل در ساختار تغذیه چندلایه آنتن
- طراحی آنتن چند ورودی چند خروجی فشرده با قابلیت قطبش دایروی در باندهای WiMAX و WLAN

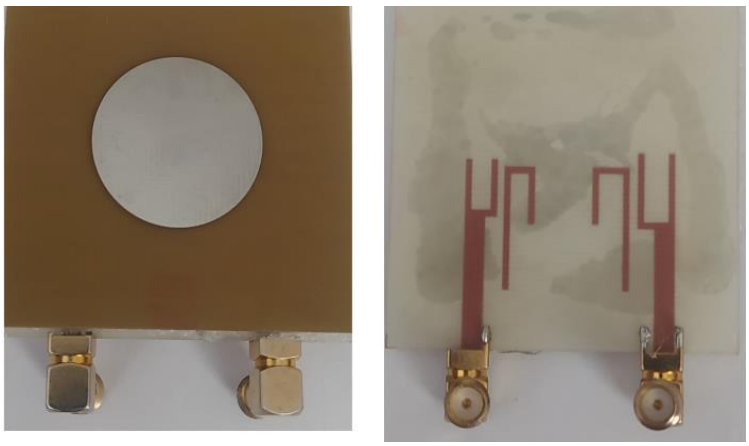
۱-مقدمه

در عصر پیشرفت فناوری‌های ارتباطی، شاهد تحولی شگرف در حوزه ارتباطات بی‌سیم هستیم. از سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای تا شبکه‌های محلی بی‌سیم، فناوری‌های فرا پهن باند و اینترنت اشیا، همگی در حال دگرگون ساختن شیوه‌های ارتباطی ما هستند. این پیشرفت‌ها، ضرورت طراحی و توسعه آنتن‌هایی با قابلیت‌های ویژه را بیش از پیش نمایان ساخته است. در این میان، آنتن‌های ریز نواری شکاف‌دار با خصوصیات تشعشعی پایدار و پهنای باند گسترده، به‌عنوان گزینه‌ای مطلوب برای پوشش سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم چندگانه مطرح شده‌اند. این آنتن‌ها، علاوه بر ابعاد فیزیکی کوچک، باید قادر به عملکرد مناسب در چارچوب استانداردهای IEEE از نظر پهنای باند فرکانسی و بهره باشند. یکی از ویژگی‌های کلیدی در طراحی آنتن‌های نوین، قابلیت ایجاد قطبش دایروی است. این نوع قطبش به دلیل توانایی در کاهش اثرات مخرب محوشدگی چندمسیره و بهبود چشمگیر کیفیت ارتباط، به انتخابی برتر در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم بدل شده است. مزایای دیگر قطبش دایروی شامل مقاومت بالا در شرایط جوی نامساعد و عدم حساسیت به جهت‌گیری سیگنال بین فرستنده و گیرنده است. چالش اصلی پیش روی طراحان، ایجاد آنتن‌هایی با این مشخصات در ابعادی کوچک‌تر و ساختاری مسطح است که قابلیت یکپارچه‌سازی با عناصر فعال را داشته باشند. آنتن‌های چاپی با روش‌های تغذیه متنوع و ساختارهای گوناگون، بهترین گزینه برای پاسخگویی به نیازهای سیستم‌های فرا پهن باند محسوب می‌شوند. طراحی آنتن‌های چند ورودی/چند خروجی که قادر به پوشش چندین باند فرکانسی با تشعشع قابل قبول باشند، به چالشی مهم در حوزه مهندسی آنتن تبدیل شده است. این آنتن‌ها باید علاوه بر پهنای باند امپدانسی مناسب، از نسبت محوری مؤثر، بهره مطلوب و الگوهای تشعشعی مناسب در باندهای فرکانسی کاربردی برخوردار باشند. روش‌های متعددی برای تولید قطبش دایروی در آنتن‌ها وجود دارد، از جمله استفاده از آنتن‌های شیاری مربعی با تغذیه موجبر هم‌صفحه، آنتن‌های اسلات مربعی وسیع با تغذیه موجبر هم‌صفحه نامتقارن، و آنتن‌های قطبش دایروی شکاف‌دار به فرم حلزونی در المان تغذیه[۸-۱]. آنتن‌های چند ورودی-چندخروجی به دلیل قابلیت‌های چند باندی و عملکرد مطلوب در محیط‌های متنوع، توجه ویژه مهندسان طراح آنتن را جلب کرده‌اند. طرح‌های مختلفی برای پیاده‌سازی این آنتن‌ها ارائه شده است، از جمله آنتن‌های کوچک چاپی برای کاربردهای پهن باند، بهبود جداسازی با استفاده از ساختار زمین ناقص، و آنتن‌های چند ورودی-چند خروجی با تنوع در نوع الگوی تشعشعی و قطبش. با توجه به رشد فزاینده فناوری اینترنت اشیا و نیاز به بسته‌های ارتباطی کوچک با تشعشع پایین، طراحی و توسعه آنتن‌هایی که علاوه بر عملکرد مطلوب، جذب کمی در بافت‌های زنده داشته باشند، به اولویتی اساسی برای محققان این حوزه تبدیل شده است. این امر چالش‌های نوینی را در زمینه کوچک‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد آنتن‌ها ایجاد کرده که مستلزم نوآوری و خلاقیت در طراحی است[۱۰و۹]. در این مقاله یک آنتن ریز نوار چندلایه فشرده بر آنتن‌های چند ورودی چند خروجی با قابلیت قطبی شدگی دایروی دو بانده، معرفی شده است. این آنتن شامل شبکه‌های تزویج مجزا برای هر باند فرکانسی است. با استفاده از یک تغییر فاز ۹۰ درجه مثبت یا منفی، قطبش دایروی محقق می‌گردد. این آنتن دارای پهنای باند امپدانسی در بازه‌های ۳-۴/۲ گیگاهرتز و ۵/۵ تا ۶/۶ گیگاهرتز بوده و تقریباً در کل باند اول خصیصه قطبش دایروی محقق می‌گردد. بیشینه بهره آنتن به‌صورت خطی با مقدار میانگین ۵ دسیبل است.

۲- ساختار فیزیکی آنتن

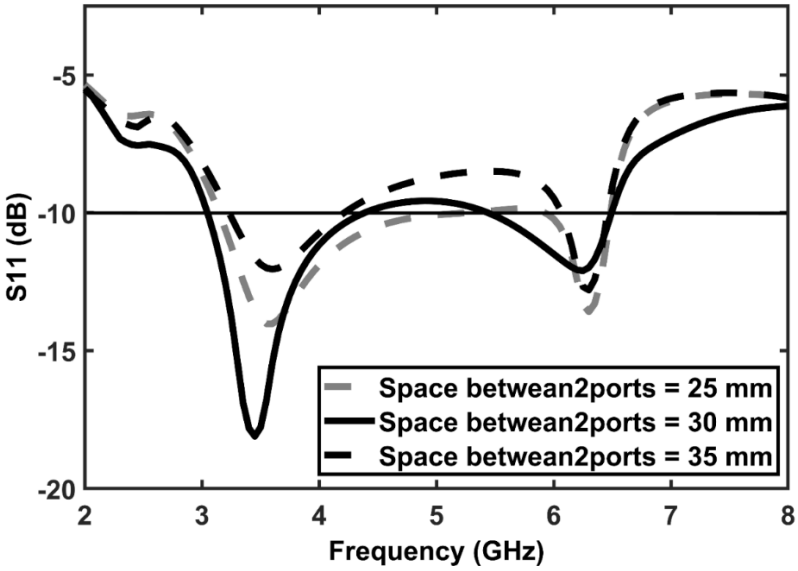
آنتن طراحی و شبیه‌سازی‌شده بروی سه لایه پیاده شده است که از دو زیر لایه و یک فوم به ضخامت ۲ میلی‌مترمربع آنها تشکیل شده است. زیر لایه اول از جنس FR-4 با ضریب گذردهی ۴/۴و تانژانت تلفات ۰/۰۲ بوده و زیر لایه پایین از جنس RO- ۴۰۰۳ با ضریب گذردهی ۳/۵۵ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۷ ساخته شده‌اند. در شکل ۱ساختار آنتن ریز نوار چندلایه با قطبش دایروی نشان داده شده است. برای هر باند، یک شبکه تغذیه تزویجی وجود دارد که شامل یک تشدید کننده سنجاقی، یک شکاف مستقیم و یک شیارU است.

شیار U شکل نه تنها برای ساختار تزویج بلکه به‌عنوان یک تشدید کننده تک حالتِ نیز استفاده می‌شود که فرکانس تشدید مشابه تشدید کننده دایره‌ای را دارد. برای آنتن که مستقیماً تغذیه می‌شود، شعاع دایره ۱۲ میلی‌متر بر اساس تئوری حفره آنتن تعیین می‌شود و تنها یک فرکانس تشدید می‌تواند محقق می‌شود. بااین‌حال، برای طراحی شکاف U و وصله دایره‌ای و تطبیق بین صفحه زمین و پچ تشعشعی، تحریک پچ توسط تغذیه جفت شکاف‌دار استفاده شود. این روش منجر به بهبود ویژگی تشعشعی آنتن پیشنهادی شده و موجب ایجاد تشدید اضافی و نهایتاً بهبود پهنای باند گردد.



شکل ۱: پیکربندی آنتن پیشنهادی دولایه

Figure 1. Proposed dual-layer antenna configuration



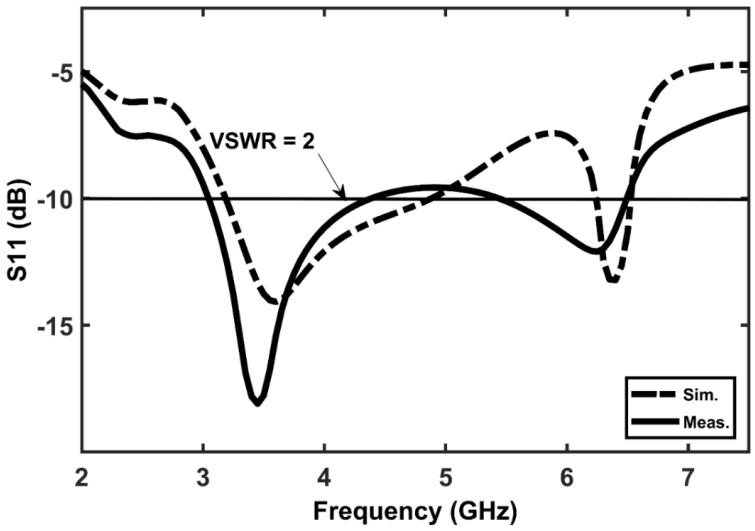
شکل ۲: منحنی افت برگشتی آنتن موردنظر برای فواصل مختلف دهنه‌ها

Figure 2. Return loss curve of the desired antenna for different aperture distances

علاوه بر این، توابع دوپلکس و فیلتر کردن به‌طور یکپارچه در آنتن پچ دو بانده با مشخصات طول ارائه شده و کاربرد چنین دستگاه یکپارچه‌ای در سیستم‌های بی‌سیم به‌طور بالقوه می‌تواند حجم کم، پیچیدگی و هزینه ساخت را کاهش دهد که در قسمت‌های جلویی بر اساس الگوهای مبتنی بر تشدید، اصول دستیابی به قطبش دایروی با ویژگی چپ‌گرد و راست‌گرد، دوپلکس، و توابع فیلتر نشان داده شده است. شکل ۲ منحنی تغییرات افت برگشتی آنتن موردنظر را به ازای تغییر فاصله میان دهنه‌ها نشان می‌دهد، واضح است جواب بهینه بر اساس تطابق امپدانسی در حالت ۳۰ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. پهنای باند عملکرد آنتن در دو بازه ۳ الی ۴/۲ گیگاهرتز و ۵/۵ تا ۶/۶ گیگاهرتز محقق می‌شود که باندهای کاربردی وایمکس و WLAN را به‌طور کامل پوشش می‌دهد.

۳- نتایج و بحث و بررسی

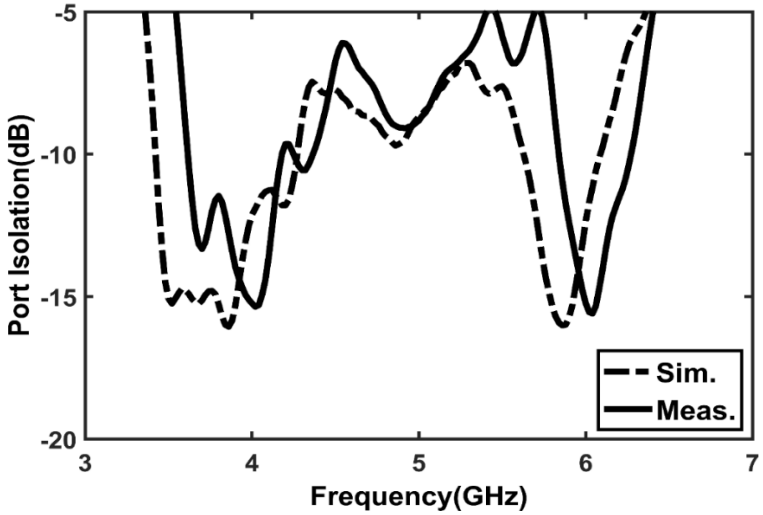
در این مرحله به‌منظور تصدیق عملکرد آنتن، ساختار چندلایه موردنظر ساخته شده و در آزمایشگاه مرکز تحقیقات آنتن و ماکروویو دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه مورد تست قرار گرفت. تطابق خوبی میان‌های نتایج استخراجی حاصل شد که نشان‌دهنده عملکرد صحیح آنتن است. شکل ۳ منحنی شبیه‌سازی و تست ساختار موردنظر را نشان می‌دهد. واضح است از لحاظ عملکرد پهنای باند امپدانسی عملکرد قابل قبولی در جواب‌های تست و شبیه‌سازی رؤیت گردید. اختلاف اندکی در جواب‌ها ناشی از اتصالات غیر ایده ال و خاصیت پراکندگی زیر لایه‌ها در فرکانس‌های مختلف است.



شکل ۳: منحنی‌های افت برگشتی آنتن موردنظر در دو حالت شبیه‌سازی و تست

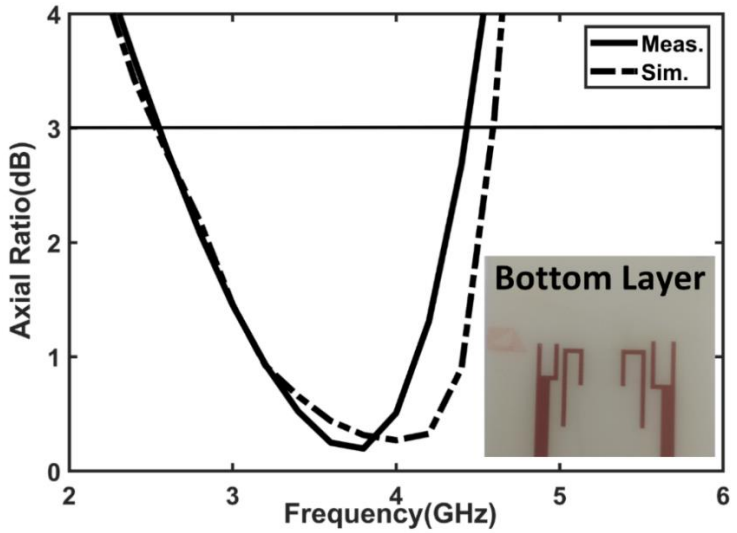
Figure 3. Return loss curves of the desired antenna in two simulation and test modes

شکل ۴ منحنی ایزولاسیون دهنه‌های ورودی را در دو حالت نشان می‌دهد. مشخص است در بازه دو باندی کاربردی موردنظر این نمودار بهترین حالت عملکردی خود را داشته و بهترین حالت در دو فرکانس مرکزی باندهای موردنظر به‌دست‌آمده محقق می‌شود.



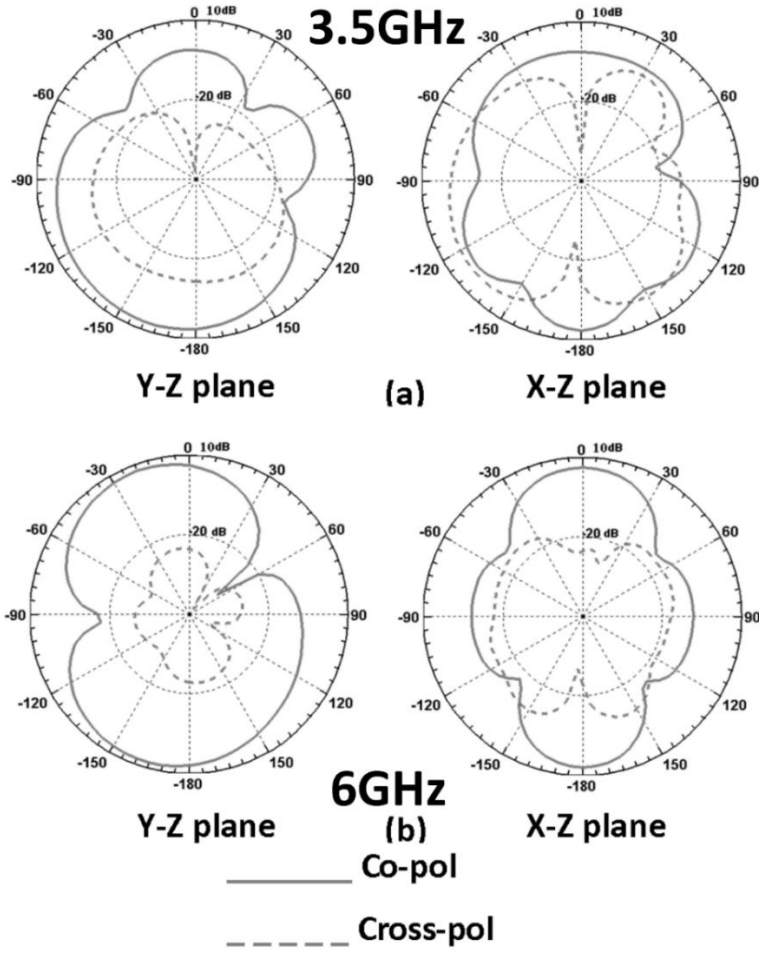
شکل ۴: منحنی ایزولاسیون دهنه‌های تغذیه در دو حالت تست و شبیه‌سازی

Figure 4. Isolation curve of feeding holes in two test and simulation modes



شکل ۵: منحنی نسبت محوری آنتن موردنظر

Figure 5. Axial ratio curve of the desired antenna



شکل ۶: منحنی‌ها الگوهای تشعشعی استخراج‌شده در دو فرکانس کاری ۳.۵ و ۶ گیگاهرتز

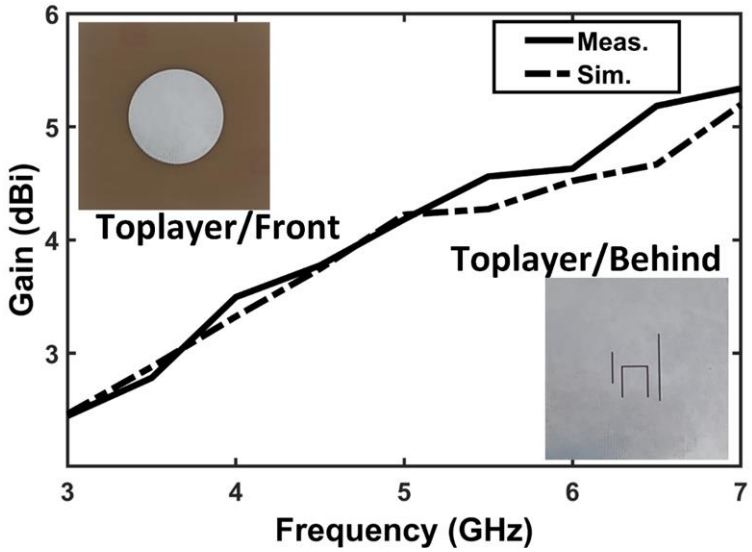
Figure 6. Radiation patterns extracted at two operating frequencies of 3.5 and 6 GHz

رزوناتور دوم به شکل سنجاق سر، شیار U و تشدید کننده پچ یک شبکه جفت متقابل را تشکیل می‌دهند، بنابراین دو مسیر برای اتصال سیگنال ورودی به تشدید کننده پچ (برای تحریک دو حالت مد) وجود دارد. در این حالت تأخیر فاز ۹۰ مدل‌سازی شده و تئوری تحریک دو مد متعامد برای تحقق قطبش دایروی ارضا می‌گردد.

شکل ۵ منحنی نمودار نسبت محوری آنتن موردنظر را نشان می‌دهد، واضح است قطبش دایروی در محدوده امپدانسی ۲/۸ تا ۴/۳ گیگاهرتز محقق می‌گردد که کل پهنای باند امپدانسی محقق شده در باند اول پوشش داده می‌شود که یکی از نکات قوت طراحی است.

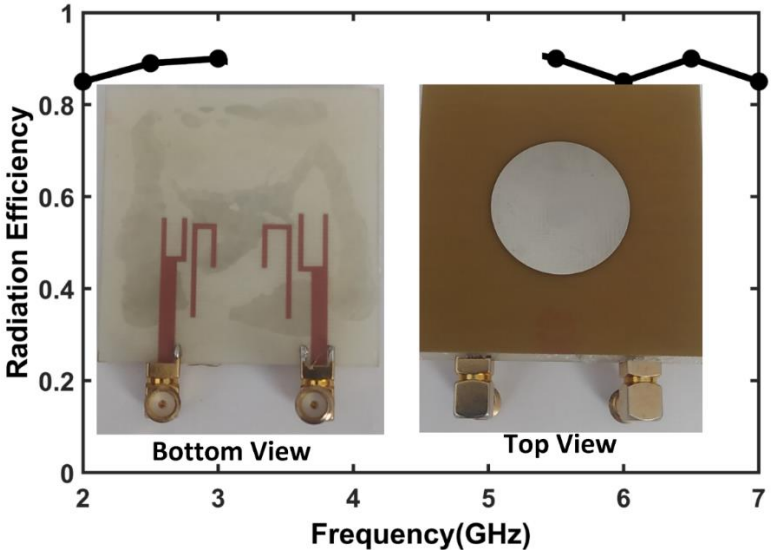
شکل ۶ منحنی تغییرات الگوی تشعشعی آنتن را در دو فرکانس ۳/۵ و ۶ گیگاهرتز نشان داده شده‌اند آنتن نهایی دارای الگوی شبه همه جهت در صفحه H و الگوی پروانه‌ای ناقص در صفحه E است. با توجه به تحقق قطبش دایروی در فرکانس اول بیشینه الگوها در زوایای ۱۸۰ درجه اتفاق می‌افتد.

شکل ۷ منحنی تغییرات بهره آنتن موردنظر را به ازای تغییرات فرکانس نشان می‌دهد. این الگو دارای حالت شبه خطی افزایش است. شکل ۸ منحنی کارایی تشعشعی آنتن موردنظر را نشان می‌دهد، واضح است این مقدار در دو باند کاربردی بالای ۸۰ درصد است که نشان‌دهنده عملکرد خوب تشعشعی و جهت‌دار ساختار ارائه شده است.



شکل ۷: منحنی تغییرات بهره آنتن در دو حالت

Figure 7. Antenna gain versus frequencies in two modes



شکل ۸: منحنی راندمان تشعشعی آنتن

Figure 8. Antenna radiation efficiency

جدول۱: مقایسه کار پیشنهادی با سایر کارهای گزارش‌شده
Table 1. Comparison of the proposed work with other reported works

Reference	Dimensions in mm	Layers	CP property Feature	Gain (dB)
[1]	1×25×25	1	×	3
[2]	0.8×10×15	2	×	2
This Work	1/6×50×50	3	✓	5

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن ریز نوار چند لایه فشرده بر آنتن‌های چند ورودی چند خروجی با قابلیت قطبی شدگی دایروی دو بانده طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. ساختار این آنتن شامل شبکه‌های تزویج مجزا برای هر باند فرکانسی است. هر شبکه از اجزای ظریفی همچون یک تشدیدکننده سنجاق‌مانند، یک شکاف مستقیم و یک شیار U شکل تشکیل شده است. این آنتن قادر به تولید مشخصه‌های قطبش دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد در باندهای مختلف است. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تست حاکی از عملکرد خوب این آنتن است. این آنتن دارای پهنای باند امپدانسی در رنج‌های ۳-۴/۲ گیگاهرتز و ۵/۵ تا ۶/۶ گیگاهرتز بوده و تقریباً در کل باند اول خصیصه قطبش دایروی محقق می‌گردد. منحنی بهره آنتن دارای حالت افزایشی خطی با مقدار میانگین ۵ دسیبل است.

مراجع

[1] T. Sedghi, T. Aribi, and A. Kalami, “WiMAX and C bands semi-fractal circularly polarized antenna with satellite bands filtering properties,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 10, no. 8, November 2018, doi: 10.1017/S1759078718000673.

[2] T. Aribi, M. Naser-Moghadasi, and R.A. Sadeghzadeh, “Circularly polarized beam-steering antenna array with enhanced characteristics using UCEBG structure,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 8, no.6, September 2016, doi: 10.1017/S1759078715000318.

[3] MM. Maleki, T. Aribi, and A. Shadmand, “Implementation of a Miniaturized Planar 4-Port Microstrip Butler Matrix for Broadband Applications,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol 9, no.1, Janurary 2020, doi: 10.22070/jce.2020.5295.1154.

[4] T. Sedghi, “Compact Unit-cell based Semi-Fractal Antenna with filtering properties of interference Bands Embedded with CBP Strips,” *IETE Journal of Research*, vol. 65, no. 6, pp. 790-795, November 2019, doi: 10.1080/03772063.2018.1464973.

[5] T. Sedghichongaralouye-Yekan, M. Naser-Moghadasi, and R. A. Sadeghzadeh, “Broadband Circularly Polarized 2×2 Antenna Array with Sequentially Rotated Feed Network for C-Band Application,” *Wireless Personal Communications*, vol. 91, no. 2, pp. 653-660, November 2016, doi: 10.1007/s11277-016-3485-4.

[6] A. M. Javanshir, T. Aribi, T. Sedghi, and A. Kalami, “High performance and compact antenna with new scheme for broadband circular polarisation applications,” *International Journal of Electronics Letters*, 2024, doi: 10.1080/21681724.2024.2372737.

[7] S. Rezaee and Y. Zehforoosh, “Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.11, no. 43, pp. 15-26, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.689028, [in Persian].

[8] ZZ. A. Darabi and S. S. Tehrani, “Design and Simulation a New Dual Band Dipole Antenna for RFID Tags,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.9, no. 35, pp. 69-76, 2021 [in Persian].

[9] FF. Heidari, Z. Adelpoure, and N. Parhizgar, “Simulation of Leaky Wave Antenna with Cosecant Squared Pattern Using Genetic Algorithm,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.11, no. 42, pp. 69-76, 2022 [in Persian].

[10] M. Jalali and T. Sedghi, “Circularly Polarized MIMO Antenna Array with Enhanced Characteristics using EBG structure,” *ELECTRONIC INDUSTRIES*, vol, 10, no.2, pp. 13-24, August 2019.

JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1340

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

Velocity and Direction-Based Motion Estimation in Video Compression to Reduce Computation and Increase Video Quality

Dadvar Hosseini Avashanagh[1] | Mehdi Nooshyar[2] | Saeed Barghandan[3] | Majid Ghandchi[4]

[1]Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran.
dadvar.hosseini@iau.ir

[2]Department of Electrical and Computer Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
nooshyar@uma.ac.ir

[3]Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran.
Saeed.Barghandan@iau.ac.ir

[4]Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran.
majid.ghandchi@iau.ac.ir

Correspondence
Mehdi Nooshyar, Associate Professor of Electrical and Computer Engineering, University of Mohaghegh, Ardabil, Iran.
Email: nooshyar@uma.ac.ir

Main Subjects:
Video Processing

Paper History:
Received: 29 August 2024
Revised: 11 October 2024
Accepted: 14 October 2024

Abstract

High-Efficiency Video Coding (HEVC) represents the latest advancement in video compression standards, offering significantly improved efficiency by supporting high-definition (HD) videos with double the compression capability of the H.264 standard. However, motion estimation within HEVC remains the most computationally intensive aspect of the encoding process, accounting for the majority of the required processing time. Although various methods have been developed to mitigate this complexity, and many have demonstrated practical effectiveness, the processing demands continue to pose challenges for real-time applications. This research introduces a fast sub-pixel motion estimation algorithm designed to minimize the number of search points during video encoding. The proposed approach leverages a mathematical model grounded in motion physics and image characteristics across consecutive frames, incorporating statistical insights into the movement of elements within the video sequence. By reducing the number of search points, the algorithm lowers computational complexity while maintaining or even enhancing relevant video quality metrics.

Keywords: Pixels, Motion estimation, Compression, Video coding, HEVC.

Highlights

- Reducing the number of search points in video motion estimation.
- Reducing the complexity of motion estimation calculations.
- Increasing the speed of motion estimation calculations.
- Increasing the quality of the final image and video: This increases in quality in terms of PSNR-HVS and PEVQ-MOS made the image better from the point of view of human vision.

Citation: D. Hosseini Avashanagh, M. Nooshyar, S. Barghandan, and M. Ghandchi, "Velocity and Direction-Based Motion Estimation in Video Compression to Reduce Computation and Increase Video Quality," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 28-44 , 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1340 [in Persian].

1. Introduction

High Efficiency Video Coding (HEVC) stands at the forefront of international video compression standards, delivering nearly double the compression efficiency of its predecessor, H.264/AVC, while supporting high-definition video formats. Nevertheless, Motion Estimation (ME) remains the most computationally demanding stage in HEVC encoding, accounting for up to 90% of the total encoding time. Conventional ME algorithms, including the Three-Step Search (TSS) and its derivatives, aim to reduce the search space but often face challenges in preserving accuracy, especially in high-motion environments.

To address these limitations, this study introduces the **Direction and Velocity-Based Fast Motion Estimation (DVBFME)** algorithm, inspired by principles of human visual perception. The proposed approach predicts macroblock displacement by leveraging both motion speed and direction, enabling efficient sub-pixel motion searches with fewer candidate points and lower computational complexity. This method not only accelerates the encoding process but also maintains competitive video quality, offering a practical solution for real-time applications.

2. Innovation and Contributions

The key contributions of this research include:

- Novel ME Algorithm: Development of an innovative ME algorithm that utilizes motion direction and velocity to select predictive search points.
- Efficiency in Search Points: Significant reduction in the number of search points during sub-pixel refinement without sacrificing accuracy.
- Human Visual System Integration: Incorporation of motion prediction techniques inspired by the human visual system to enhance search efficiency.
- Computational Savings: Demonstration of considerable computational savings while either maintaining or improving the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) in reconstructed video.

3. Materials and Methods

The DVBFME algorithm operates through a maximum of four stages, typically converging within three:

- **Stage 1:** The initial frame of each video sequence is encoded as an intra-frame reference.
- **Stage 2:** Motion vectors between the second frame and the reference are estimated using a modified Three-Step Search (TSS) with reduced search points. Stationary macroblocks are identified when the best match is located at the center of the search window. For these blocks, only minimal neighborhood searches are conducted in subsequent frames.
- **Stage 3:** For moving macroblocks, the magnitude (pixels/frame) and direction of displacement are calculated based on previous motion vectors. The search window for the next frame is centered accordingly, followed by sub-pixel refinement to improve accuracy.
- **Stage 4:** If satisfactory matching is not achieved, the algorithm reverts to Stage 2 to ensure robustness.

This approach leverages spatial and temporal motion consistency, particularly in sequences with predictable motion patterns (e.g., videoconferencing), where multiple macroblocks share similar motion characteristics. By transmitting group motion vectors instead of individual ones, the algorithm reduces bitrate while maintaining encoding efficiency.

4. Results and Discussion

The DVBFME algorithm was implemented in MATLAB 2022a and tested on standard 1080p FHD sequences, including Kimono, Trevor, Caltrain, Coastguard, Missa, and Surfside. All experiments were conducted on a workstation equipped with an Intel Core i7-3632QM CPU, 8 GB RAM, and Intel HD Graphics 4000 GPU. Compared to traditional TSS, the proposed method achieved:

PSNR Improvement: An increase in PSNR ranging from 0.2 dB to 1.5 dB across the test sequences.

Bitrate Reduction: More efficient transmission of motion vectors leading to reduced bitrate.

Complexity Reduction: A decrease in computational complexity by up to 35× in certain sequences, nearing real-time processing capabilities.

The performance improvements are attributed to the predictive search initialization, which reduces redundant search points while maintaining matching accuracy. The balance between encoder-side complexity and decoder simplicity makes this method suitable for low-bitrate, bandwidth-constrained applications.

5. Conclusion

This research introduces a motion estimation algorithm inspired by human visual perception that significantly reduces computational load while maintaining video quality in HEVC encoding. By predicting macroblock displacement through motion direction and velocity analysis, the **Direction and Velocity-Based Fast Motion Estimation (DVBFME)** method achieves notable efficiency in sub-pixel refinement. The approach leverages

spatial and temporal consistency in motion patterns to minimize redundant searches, optimizing both encoding speed and resource usage without compromising visual fidelity.

Declaration of Competing Interest: Authors do not have conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Dadvar Hosseini Avashanagh: Simulation and software and writing of the article**, Mehdi Noshyar**: Simulation and software**, Saeed Burghandan**: Manuscript editing**, Majid Ghandchi:** Manuscript editing.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1340

مقاله پژوهشی

تخمین حرکت مبتنی بر سرعت و جهت در فشرده‌سازی ویدیو برای کاهش محاسبات و افزایش کیفیت ویدیو

دادور حسینی اواشانق[۱] | مهدی نوشیار*[۲] | سعید برغندان[۳] | مجید قندچی[۴]

[۱]گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، اهر، ایران.
dadvar.hosseini@iau.ir

[۲]گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
nooshyar@uma.ac.ir

[۳]گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، اهر، ایران.
Saeed.Barghandan@iau.ac.ir

[۴]گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، اهر، ایران.
majid.ghandchi@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:
*مهدی نوشیار، دانشیار گروه مهندسی برق و کامپوتر، دانشگاه محقق اردبیلی.
nooshyar@uma.ac.ir

موضوع اصلی:
پردازش ویدئو

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۸ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۲۰ مهر ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۲۳ مهر ۱۴۰۳

چکیده:

کدگذاری ویدیویی با کارایی بالا (HEVC) آخرین استاندارد کدگذاری ویدیویی است. این استاندارد با ارائه دو برابر راندمان فشرده‌سازی در مقایسه با استاندارد H.264، از فیلم‌های با وضوح بالا (HD) پشتیبانی می‌کند. محاسبات تخمین حرکت در HEVC پیچیده‌ترین قسمت از کدینگ ویدیو است که بیش‌ترین زمان کدینگ ویدیو را به این پردازش اختصاص می‌دهد. روش‌های زیادی برای کاهش زمان تخمین حرکت پیشنهاد شده که بسیاری از آن‌ها به‌صورت عملی مؤثر بوده است. با وجود به‌کارگیری الگوریتم‌های مؤثر در تخمین حرکت باز هم مقدار زمان پردازش نسبت به زمان آنی (real time) بسیار زیاد است. در این تحقیق یک الگوریتم تخمین حرکت زیر پیکسل سریع با تعداد نقاط جستجوی کمتر برای کدینگ ویدیو پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی بر پایه مدلی از فیزیک حرکت و ویژگی‌های تصویر در قاب‌های متوالی است که از اطلاعات آماری حرکت عناصر قاب‌های دنباله‌ی ویدیویی استفاده کرده است. این الگوریتم با کاهش تعداد نقاط جستجو و بهبود نسبی پارامترهای کیفی ویدیو، پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: پیکسل، تخمین حرکت، فشرده‌سازی، کدینگ ویدیو، HEVC.

تازه‌های تحقیق:

- کاهش تعداد نقاط جستجو در تخمین حرکت ویدیو.
- کاهش پیچیدگی محاسبات تخمین حرکت.
- افزایش سرعت محاسبات تخمین حرکت.
- افزایش کیفیت تصویر و ویدیو نهایی، که از نظر PSNR-HVS و PEVQ-MOS باعث بهبود از دیدگاه بینایی انسان گردید.

۱-مقدمه

تخمین و جبران حرکت (ME/MC[1])، قسمت اصلی در فشرده‌سازی ویدیو است که بهترین بلوک تطبیق‌یافته را در قاب‌های مرجع برای کاهش افزونگی زمانی بین قاب‌های متوالی پیدا می‌کند. جابجایی بین بهترین بلوک تطبیق‌یافته و بلوک فعلی، که به‌عنوان بردار حرکت (MV[2]) شناخته می‌شود، توسط تخمین حرکت تولید می‌شود [۱].

تخمین حرکت، پیچیده‌ترین قسمت محاسباتی در سیستم‌های کدگذاری ویدیویی است و ۵۰ تا ۹۰ درصد پیچیدگی محاسباتی را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. برای غلبه بر محاسبات سنگین ناشی از تعداد زیاد نقاط جستجو، الگوریتم‌های جستجوی سریع متعددی ارائه شده‌اند. به‌عنوان مثال، می‌توان به الگوریتم‌های تخمین و جبران حرکت مبتنی بر شبکه‌های عصبی (MEMC[3]-Ne) [۳]، جستجوی سه‌مرحله‌ای (TSS[4]) [۴]، جستجوی سه‌مرحله‌ای جدید (NTSS[5]) [۵]، جستجوی چهارمرحله‌ای (FSS[6]) [۶]، جستجوی الماس (DS[7]) [۷]، جستجوی شش‌ضلعی (HS[8]) [۸]، جستجوی منطقه آزمایشی (TZS[9]) [۹]، جستجوی الماس اصلاح‌شده (MDS[10]) [۱۰]، جستجوی الگوی ریشه تطبیقی (ARPS[11]) [۱۱]، جستجوی منطقه آزمایشی اصلاح‌شده (MTZS[12]) [۱۲] و جستجوی شبکه شش‌ضلعی (HGS[13]) [۱۳] اشاره کرد. تخمین حرکت پویا و تکامل (DMEE[14]) [۱۴] نیز از جمله این الگوریتم‌هاست. بسیاری از این روش‌ها با کاهش تعداد نقاط جستجو، عملکرد بهتری ارائه می‌دهند [۱۵].

کدگذارهای استاندارد ویدیو به‌طور گسترده در برنامه‌های مختلف موبایل و تلویزیون استفاده می‌شوند و اجرای کارآمد آن‌ها مسئله‌ای حیاتی برای موفقیت برنامه‌های کاربردی است. در این کدگذارها، تخمین حرکت، افزونگی‌های زمانی را بین قاب‌های متوالی یک توالی ویدیو حذف می‌کند و این عمل بیش‌ترین مقدار فشردگی را بر سیستم فشرده‌ساز اعمال می‌کند [۱۶]. برای کاهش پیچیدگی محاسبات و افزایش سرعت پردازش به‌منظور نزدیک شدن به زمان آنی، می‌توان از قابلیت‌های سیستم بینایی انسان بهره برد. بررسی‌های متعدد نشان داده‌اند که پردازش در یک "مسیر حرکت" حداقل در دو مرحله رخ می‌دهد. اولین مرحله، قشر بینایی اولیه (ناحیه V1) را تشکیل می‌دهد و اطلاعات از آنجا به ناحیه بصری زمانی میانی (MT یا V5) منتقل می‌شود. این انتقال به ناحیه MT کمک می‌کند تا تعدادی از یافته‌های روانی را برای تجسم مدل قبلی حرکت و توضیح درک سرعت و جهت در الگوهای چهارطرفه استفاده کند. این ناحیه از مدل فعلی برای اهداف آینده در یک سرعت تخمینی (درک شده) استفاده می‌کند و پاسخ‌های نورون‌های ناحیه MT را محاسبه می‌نماید [۱۷].

در دنیای واقعی، حرکت اجسام به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد که حرکت را می‌توان دنبال کرد. هرچه سرعت حرکت نسبت به زمان بیشتر باشد، محاسبات سنگینی برای تخمین درست از جهت و مسیر حرکت لازم است. سیستم بینایی و محاسبات ذهنی انسان حرکت اشیا را به‌گونه‌ای حساب می‌کند که با تخمین سرعت و جهت حرکت، تقریبی از مقصد نهایی آن را به‌دست می‌آورد. از این‌رو، با به‌دست آوردن سرعت و جهت حرکت عناصر در زمان فعلی، می‌توان موقعیت این عناصر را در زمان‌های آینده پیش‌گویی کرد.

سیستم بینایی انسان از تعداد زیادی قاب در مقیاس زمان بهره می‌برد، بنابراین فرایند بینایی انسان تقریباً پیوسته اتفاق می‌افتد. برعکس، دنباله‌های ویدیویی در زمان پیوسته نیستند و از تعداد قاب‌های محدودی در واحد زمان استفاده می‌کنند. همچنین ممکن است زاویه مشاهده موضوع در یک زمان بسیار کوتاه تغییر کند. با چشم‌پوشی از برخی محدودیت‌ها، می‌توان بر اساس سیستم بینایی انسان، الگوریتمی پیشنهاد کرد که با به‌دست آوردن میزان سرعت حرکت بلوک‌ها نسبت به پیکسل بر سطح

[1] motion estimation /motion compensation
[2] motion vector
[3] Motion Estimation and Motion Compensation Driven Neural Network
[4] Three-Step Search
[5] new Three Step Search
[6] four Step Search
[7] Diamond Search
[8] Hexagonal Search
[9] Test Zone Search
[10] Modified Diamond Search
[11] Adaptive Rood Pattern Search
[12] Modified Test Zone Search
[13] Hexagonal Grid Search
[14] Dynamic Motion Estimation and Evolution

(قاب)، تخمینی از موقعیت بلوک در قاب‌های آینده به‌دست آورد و بدین ترتیب تعداد نقاط جستجوی کمتری را برای به‌دست آوردن بهترین تطبیق (کم‌ترین خطا) انجام دهد.
الگوریتم پیشنهادی در چهار مرحله انجام می‌شود و در سه مرحله می‌تواند بهترین تطبیق را انجام دهد که عبارت است از ۱- محاسبه بردار حرکت ۲- ارزیابی صحت تطبیق انجام یافته ۳- تصمیم برای قابهای بعدی. اگر به هر دلیلی بهترین تطبیق صورت نگیرد مرحله چهارم اجرا می‌شود که شامل جستجوی نقاط ارزیابی نشده است. با اجرای این الگوریتم مشخص شد که روش پیشنهادی قادر است نتایج قابل قبولی را در بهبود سرعت تخمین حرکت و کیفیت تصاویر نهایی ارائه کند.
در ادامه این تحقیق به ترتیب به بررسی الگوریتم TSS، معرفی روش پیشنهادی، نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی خواهیم پرداخت و در آخر عملکرد و چشم انداز توسعه آینده این الگوریتم را بیان خواهیم کرد.

۲ - الگوریتم TSS

الگوریتم TSS یکی از روش‌های رایج در تخمین حرکت ویدیو است که برای کاهش زمان محاسباتی و افزایش کارایی در تحلیل ویدیوها طراحی شده است. این الگوریتم به‌ویژه در کدگذاری ویدیوها استفاده می‌شود و می‌تواند به‌طور مؤثری دقت تخمین حرکت را حفظ کند.
الگوریتم TSS شامل سه مرحله اصلی است. در مرحله اول، یک ماکروبلوک (یا بلوک) در قاب مرجع بررسی می‌شود. در این مرحله، الگوریتم یک جستجوی اولیه در یک ناحیه کوچک اطراف موقعیت پیش‌بینی شده بلوک انجام می‌دهد. این ناحیه معمولاً به‌صورت یک مربع یا مستطیل تعریف می‌شود و الگوریتم از یک نقطه مرکزی شروع کرده و نقاط اطراف آن را بررسی می‌کند تا بهترین انطباق را پیدا کند.
در مرحله دوم، پس از پیدا کردن بهترین موقعیت در مرحله اول، الگوریتم به ناحیه برنده شده متمرکز می‌شود و جستجو را با دقت بیشتری انجام می‌دهد. این مرحله شامل بررسی نقاط بیشتری در اطراف نقطه بهینه پیدا شده در مرحله اول است تا دقت تخمین حرکت افزایش یابد.
مرحله سوم به جستجو در ناحیه‌ای کوچک‌تر از ناحیه قبلی اختصاص دارد. در این مرحله، الگوریتم دوباره جستجو را انجام می‌دهد تا بهترین انطباق ممکن را پیدا کند و شامل بررسی نقاط مجاور و نزدیک به موقعیت بهینه است که در مراحل قبلی پیدا شده است.
از مزایای الگوریتم TSS می‌توان به کاهش زمان محاسبات و حفظ دقت تخمین حرکت اشاره کرد. بااین‌حال، این الگوریتم حساسیت به حرکات سریع را دارد و عملکرد آن ممکن است به تنظیمات و پارامترهای خاصی بستگی داشته باشد که باید به‌دقت انتخاب شوند. به‌طورکلی، الگوریتم TSS به‌عنوان یک روش مؤثر برای تخمین حرکت در ویدیوها شناخته می‌شود و به خاطر سادگی و کارایی آن در بسیاری از سیستم‌های کدگذاری ویدیو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- الگوریتم پیشنهادی DVBFME[1]

با توجه به حجم بالای اطلاعات قاب‌های متوالی در یک توالی ویدیویی امکان ارسال آن بدون تخمین حرکت تقریباً امکان‌پذیر نیست. الگوریتمی بر اساس ویژگی‌های سیستم بینایی انسان پیشنهاد می‌شود که جابجایی بلوک‌ها را به‌صورت هوشمند پیشگویی می‌کند و بردار حرکت دقیق‌تری را برای جبران حرکت تولید می‌کند. این روش باعث می‌شود پیچیدگی محاسبات کاهش یابد و سرعت محاسبات به زمان آنی نزدیک شود. در این تکنیک، با استفاده از تعداد نقاط جستجوی کمتر و کاهش نرخ بیت، درعین‌حال که موقعیت بلوک در قاب بعدی به‌درستی تخمین زده می‌شود، سرعت محاسبات تخمین حرکت افزایش یافته و PSNR بهبود می‌یابد. استاندارد فشرده‌سازی ویدیو به‌خاطر استفاده از نرخ بیت پایین، در حرکات سریع نیازمند پردازش زیادی است؛ به همین دلیل، حرکات سریع تأخیر زمانی زیادی را به سامانه اعمال می‌کند. الگوریتم پیشنهادی می‌تواند با کاهش زمان فشرده‌سازی و کاهش اطلاعات اضافی در فرایند تخمین حرکت، کیفیت نهایی ویدیو را بهبود بخشد.

[1] Direction and velocity-based Fractional motion estimation

برای به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی در روند تخمین حرکت پیشرفته، مختصات بلوک‌های تطبیق‌یافته نسبت به مختصات قاب مرجع و مقدار بردار حرکت محاسبه می‌شود. با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از بردارهای حرکت، سرعت و زاویه حرکت تخمین زده می‌شود. با به‌دست‌آوردن سرعت و جهت حرکت هر ماکروبلوک، در قاب بعدی، به میزان حرکت تخمین‌زده‌شده از موقعیت بلوک، موقعیت غیردقیقی از نقاط جستجوی منطقه‌ای بلوک موردنظر پیش‌بینی می‌شود. در ناحیه‌ی به‌دست‌آمده مجموع تفاوت‌های مطلق (SAD[1]) برای تخمین حرکت محک می‌خورد. اگر SAD قابل قبولی به‌دست آید، ادامه جستجو برای کسب حداکثر تطبیق بهتر به‌صورت ½ پیکسل و نهایتاً به‌صورت ¼ پیکسل ادامه پیدا می‌کند تا بهترین تطبیق ممکن حاصل شود.

تخمین حرکت مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی سعی دارد تا ماکرو بلوک (MB) جاری را با جستجوی بهترین ماکرو بلوک کاندید که کم‌ترین مقدار SAD را ارائه می‌دهد، پیش‌بینی کند. مقدار SAD برای بلوک‌های با اندازه M×N در هر موقعیت (m,n) به‌صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$SAD = \sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\left|C(i,j) - R(m+i,n+j)\right| \quad (۱)$$

در اینجا، C(i, j) یک بلوک از قاب جاری است و R(m + i, n + j) بلوک کاندید از پنجره جستجو (SW) قاب قبلاً کدگذاری شده است. مقدار (m, n) که نمایانگر موقعیت نسبی بین MB جاری و بهترین MB کاندید مطابقت یافته در SW است، به‌عنوان بردار حرکت (MV) شناخته می‌شود [۱۸].

روش پیشنهادی در سه مرحله می‌تواند بهترین تطبیق را انجام دهد تا بردار حرکت به‌دست آید که بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ قرار داده شده است.

مرحله ۱- اولین قاب هر دنباله‌ی ویدیویی به‌عنوان قاب مرجع به‌صورت یک تصویر واحد مانند JPEG به‌روش درون‌قابی رمز می‌شود و در بلوک دیاگرام شکل ۱ در قسمت Refrence frame 1 نشان داده شده است.

مرحله ۲– برای محاسبه اختلاف دومین قاب هر دنباله‌ی ویدیویی با قاب مرجع رمز شده و به‌دست آوردن بردار حرکت، بلوک‌های قاب دوم نسبت به قاب مرجع به‌وسیله الگوریتم ¼ پیکسل سه‌مرحله‌ای جستجو می‌شود. در بررسی مرحله دوم دو نتیجه حاصل می‌شود و در بلوک محاسبه بردار حرکت انجام می‌شود .

الف – ماکروبلوک از نظر مکانی نسبت به ماکروبلوک مرجع ثابت است.

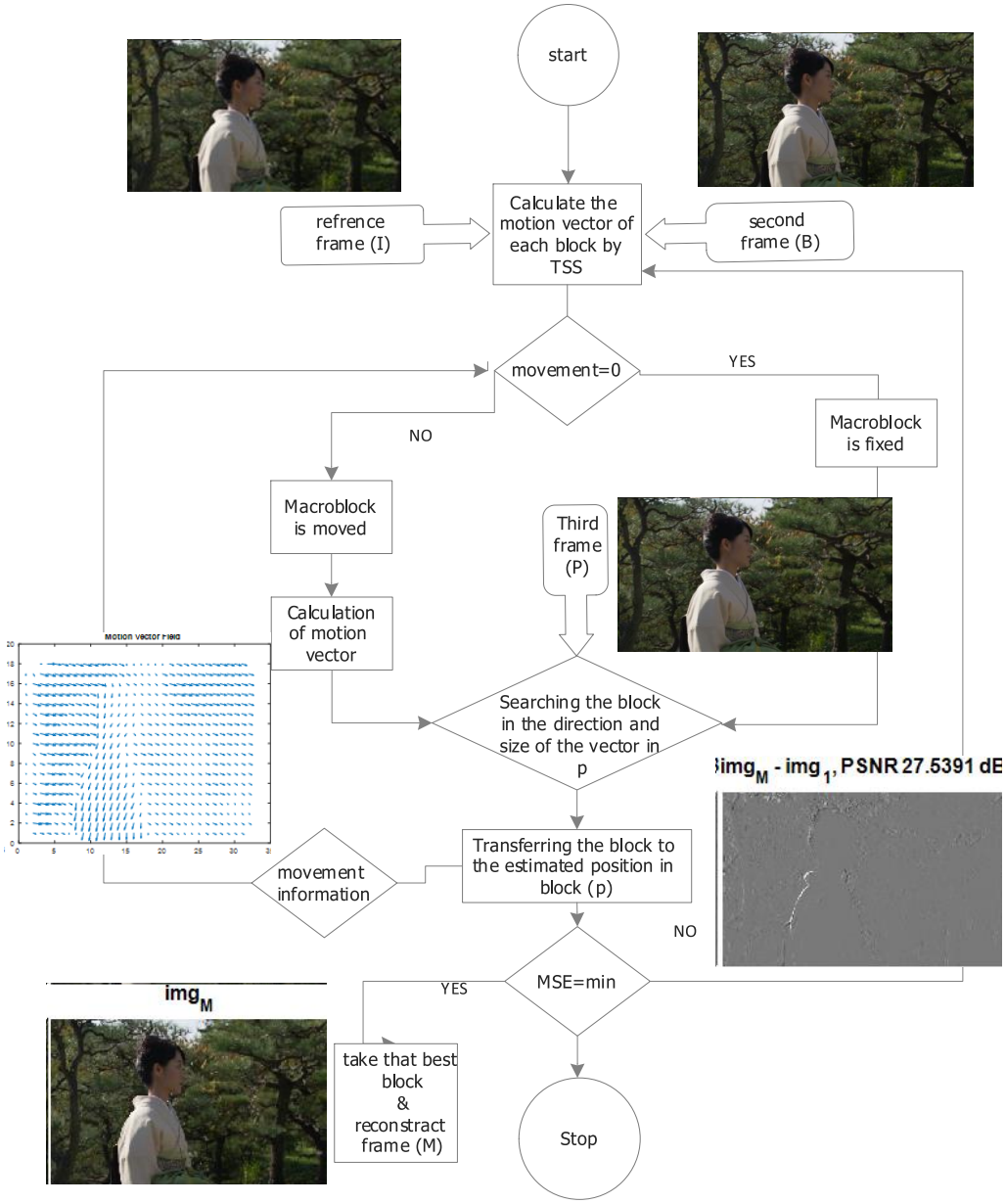
ب - ماکروبلوک از نظر مکانی نسبت به ماکروبلوک مرجع جابه‌جا شده است.

نتایج الف و ب در بلوک جابجایی ارزیابی می‌شود.

اگر در قاب دوم تطبیق بلوک به‌گونه‌ای انجام گیرد که مانند شکل ۲ مهترین تطبیق در مرکز ماکروبلوک اتفاق افتد، در این حالت هیچ اطلاعات حرکتی برای بلوک موردنظر به‌دست نمی‌آید. در این حالت ماکروبلوک از منظر الگوریتم DVBFME، ثابت است و هیچ حرکتی را انجام نداده است در (بلوک ثابت است) تصمیم‌گیری می‌شود. لذا در قاب بعدی برای جستجوی ماکروبلوک موردنظر، اولین نقطه نامزد برای بررسی بهترین تطبیق، نقطه مرکز بلوک است. در این قاب برای تطبیق بهتر ابتدا ماکروبلوک فعلی در موقعیت ماکروبلوک قبلی بررسی می‌شود، اگر نتیجه قابل قبولی حاصل شد برای تطبیق بهتر این ماکروبلوک، به‌اندازه یک پیکسل همسایگی این منطقه را بررسی می‌کند. از بین این دو بررسی نتیجه بهتر را انتخاب می‌کند. ولی برای اطمینان بیشتر و جلوگیری از اعوجاج احتمالی، همسایگی نقطه موردنظر تا دقت ربع پیکسل دوباره جستجو می‌شود.

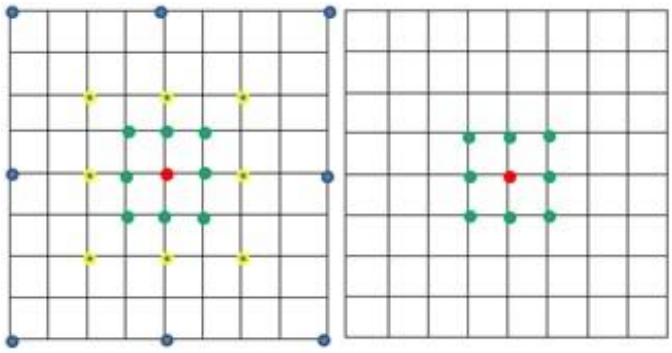
شکل ۲- a اگر با جستجو تا مرحله ربع پیکسل، بهترین تطبیق در مرکز ماکروبلوک باشد، نشان می‌دهد هنوز این ماکروبلوک ثابت است و هیچ تغییر مکانی در این ماکروبلوک رخ نداده است. در قاب بعدی برای همین ماکروبلوک مرحله دوم تکرار می‌شود. در غیر این صورت اگر کوچک‌ترین حرکتی حتی به‌اندازه ربع پیکسل اتفاق افتاده باشد (تطبیق خارج از مرکز ماکروبلوک به‌دست آید) دوباره اختلاف نقطه مرکزی ماکروبلوک با قاب قبلی محاسبه می‌شود در قسمت (بلوک متحرک است) ارزیابی می‌شود . برای تطبیق بهتر مرحله سوم اجرا می‌شود.

[1] Sum of Absolute Differences



شکل ۱: بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی

Figure 1. Block diagram of the proposed algorithm



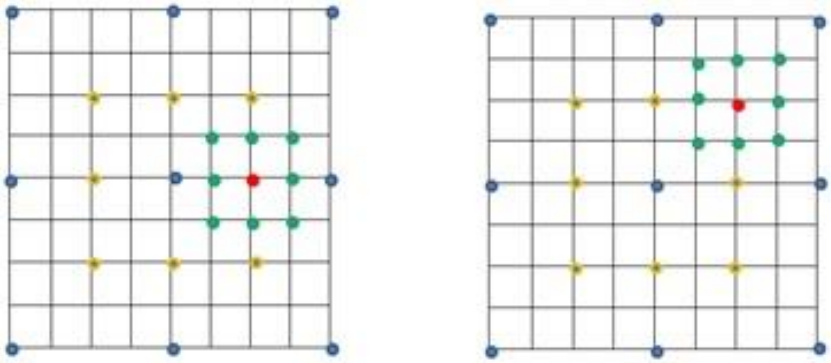
(a) (b)

شکل ۲: (a) جستجوی¼ پیکسل کامل و تطبیق در مرکز ماکروبلوک. (b) جستجوی بهینه

Figure 2. (a) ¼ full pixel search and matching in the center of the macroblock. (b) Optimal search

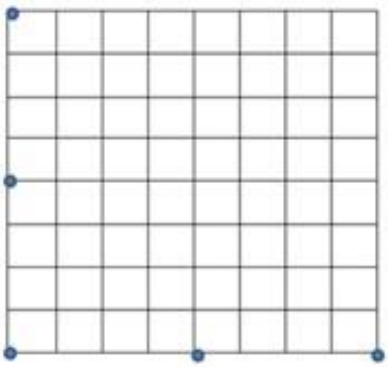
هدف از جستجوی با دقت ¼ در همسایگی نقطه موردنظر این است که اگر حرکت ناچیزی توسط ماکروبلوک مورد بررسی اتفاق افتاده باشد، با بررسی و به‌دست آوردن بردار حرکت (بدون بررسی ¼ پیکسل) نمی‌توان محل واقعی ماکروبلوک را تشخیص داد. لذا با توقف الگوریتم جستجو و اعلام بردار حرکت، احتمال اعوجاج وجود دارد. با به‌دست‌آوردن پارامترهای تطبیق بلوک، نقطه‌ی با مشخصات تطبیق بهتر برای ترسیم بردار حرکت نهایی انتخاب می‌شود.

مرحله ۳- اگر بهترین تطبیق خارج از مرکز بلوک مورد آزمایش اتفاق بیفتد شکل ۳، الگوریتم پیشنهادی، بلوک را متحرک تشخیص می‌دهد، یعنی موقعیت ماکروبلوک نسبت به قاب مرجع تغییر یافته است و این الگوریتم سعی در تعیین موقعیت دقیق این بلوک در قاب آینده را دارد. به همین خاطر این الگوریتم مقدار جابه‌جایی بهترین نقطه تطبیق یافته نسبت به قاب قبلی را بر حسب پیکسل بر قاب به‌دست آورده جهت حرکت نیز محاسبه می‌کند.



شکل ۳: روند جستجوی ¼ پیکسل کامل و تطبیق در خارج از مرکز ماکروبلوک
Figure 3. ¼ full pixel search process and macroblock off-center matching

با به‌دست آوردن مقدار و جهت حرکت ماکروبلوک، برای بررسی قاب بعدی، نقطه برنده شده در قاب قبلی به مرکز پنجره جستجو منتقل می‌شود. برای دستیابی به نقطه‌ی درست، الگوریتم پیشنهادی با استفاده از اطلاعات حرکتی قاب قبلی شیوه جستجو را طوری تغییر می‌دهد تا بلوک پیش‌بینی شده را بدون جستجو در سایر نقاط، در نقطه‌ی موردنظر امتحان کند و بهترین تطبیق را به‌دست آورد. این عمل از طریق احتمال وقوع فعلی بر اساس قاب قبلی و احتمال وقوع بعدی بر اساس قاب فعلی شکل می‌گیرد. با جمع اطلاعات کاملی از حرکت ماکروبلوک، برای جستجو در قاب‌های بعدی تصمیم‌گیری می‌شود.



شکل ۴: جستجوی ¼ پیکسل بدون استفاده از IME
Figure 4. ¼ pixel search without using IME

مرحله ۴- اگر در مرحله سوم با جستجوی ½ پیکسل SAD قابل قبولی حاصل نشود به این معنی است که در قاب مورد بررسی الگوی حرکتی تغییر یافته است و یا الگوریتم در تشخیص تقریبی موقعیت بلوک، محاسبه درستی را انجام نداده است. اگر این عمل با هر عنوان ممکن اتفاق افتد، الگوریتم پیشنهادی برای جلوگیری از محاسبات اضافی، جستجو با دقت ½ را متوقف کرده سپس مرحله دوم تکرار می‌شود (شکل ۴).

سعی بر این است که اطلاعات حرکتی هر بلوک مستقل از بلوک دیگر باشد. ولی در بعضی از دنباله‌های ویدیویی حرکت بلوک‌ها یکنواخت به‌نظر می‌رسند، مانند ویدیو کنفرانس‌ها که بیشتر پشت زمینه ثابت و سر و گردن گوینده متحرک است. چون اجزای سر به هم متصل است، لذا حرکت آن‌ها به‌غیر از چرخش سر، به یک‌سو، با یک سرعت انجام می‌گیرد. از این روش می‌توان در رمزگذاری ویدیو با نرخ‌بیت پایین بهره برد. یعنی اگر تغییرات مجموعه‌ای از ماکروبلوک‌ها نسبت به هم با یک سرعت و در یک جهت باشد می‌توان به‌جای ارسال تک‌تک اطلاعات ماکروبلوک‌ها اطلاعات حرکتی مجموعه ماکروبلوک‌ها را ارسال کرد.

اگرچه ممکن است ظاهراً این روش پیچیدگی محاسبات را بالا ببرد ولی در سیستم‌های پخش عمومی سعی شده است پیچیدگی‌های بالا متوجه رمزکننده‌ها باشد نه رمزگشاها تا با کاهش پیچیدگی در گیرنده‌ها هزینه آن‌ها کاهش یابد. الگوریتم پیشنهادی این خواسته را با اعمال پیچیدگی‌ها در طرف فرستنده ارضا می‌کند. این عمل در مقابل کاهش نرخ‌بیت و افزایش PSNR عمل معقولی است.

تخمین حرکت و به‌دست آوردن بردار حرکت به‌طور قابل‌توجهی به کاهش نرخ‌بیت در فشرده‌سازی ویدئو کمک می‌کند، زیرا این فرآیندها به ما اجازه می‌دهند، به‌جای ذخیره‌سازی کامل هر قاب، تنها تغییرات بین قاب‌های متوالی را ثبت کنیم. با شناسایی جابه‌جایی‌ها در تصویر، می‌توانیم فقط اطلاعات مربوط به حرکت (بردارهای حرکت) را ذخیره کنیم و داده‌های تکراری را حذف نماییم. این رویکرد به ما این امکان را می‌دهد که از تکنیک‌های فشرده‌سازی مؤثرتری استفاده کنیم و حجم داده‌ها را کاهش دهیم، درحالی‌که کیفیت تصویر را در نرخ‌بیت ثابت حفظ می‌کنیم. در نتیجه، تخمین حرکت به ما کمک می‌کند با بهینه‌سازی داده‌ها و حذف اطلاعات غیرضروری، انتقال و ذخیره‌سازی ویدئو را کارآمدتر کنیم. البته مقدار کاهش نرخ‌بیت به مقدار اندازه بلوک‌های انتخابی وابسته است و انتخاب درست آن در کیفیت نهایی تصویر بازسازی شده مشهود است. در این تحقیق با شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی توالی ویدیویی FHD 1080p مشخص شد که نرخ فشرده‌سازی آن بسیار مؤثر بوده است و مقدار کاهش نرخ‌بیت به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

Frame size for img1: 49766400.00 bits
Motion vector size: 18432.00 bits

$$\text{Bit rate reduction percentage} = \left(\frac{Bitrate\ for\ \text{frame}}{Bitrate\ of\ Motion Vector} \right) \times 100 \qquad (۲)$$

مشخص شد در این بررسی میزان ۲۷۰۰۰۰ درصد کاهش نرخ بیت برای هر قاب اتفاق افتاده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادی بر روی یک ایستگاه کاری که سیستم عامل Windows 10 Pro را اجرا می‌کند، پیاده‌سازی شد. این ایستگاه کاری دارای پردازنده Intel(R) Core (TM) i7-3632QM با فرکانس ۲/۲۰ GHz و ۸/۰۰ GB RAM بوده همچنین واحد GPU آن Intel (R) HD Graphics 4000 است و از MATLAB 2022a برای پردازش توالی‌های ویدیویی استاندارد مختلف با حداکثر اندازه بلوک ۱۶×۱۶ و دقت ¼ پیکسل استفاده شد. این شبیه‌سازی روی توالی‌های Kimono, trevor، Caltrain، Coastguard، Missa و Surfside که یک قاب بازسازی شده آن‌ها در شکل a۷ نشان داده شده است. جبران حرکت انجام یافته بر اساس مقدار بردار حرکت به‌دست‌آمده در شکلb۷ و بردار حرکت قاب مربوطه که با الگوریتم پیشنهادی محاسبه و ترسیم شده در شکل c۷ ارائه شده است. از نظر PSNR بین db۰/۲ تا db۱/۵ افزایش کیفیت حاصل شد. ولی نقطه قوت این الگوریتم کاهش محاسبات تخمین حرکت است که به‌طور متوسط در بعضی از توالی‌ها تا ۳۵ برابر محاسبات لازم کاهش یافته است و نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ ارایه شده است. مقدار میانگین (کیفیت و زمان محاسبات) به‌صورت جداگانه برای هر توالی ویدیویی در جدول ۱ قرار داده شده است.

زمان محاسبات این الگوریتم بر حسب زمان برای هر قاب در شکل ۶ نشان می‌دهد. رنگ آبی مربوط به مقدار محاسبات برحسب ثانیه برای الگوریتم پیشنهادی و رنگ قرمز مربوط به الگوریتم جستجوی TSS است.

در پردازش تصویر و ویدیو، PSNR یک معیار رایج برای ارزیابی کیفیت یک تصویر فشرده یا بازسازی شده است. این معیار نسبت بین حداکثر توان ممکن سیگنال و توان نویزی که بر نمایش آن تأثیر می‌گذارد را محاسبه می‌کند. در واقع، PSNR سطح نویز

یا اعوجاج در یک تصویر را پس از فشرده‌سازی با بازسازی نسبت به تصویر اصلی اندازه‌گیری می‌کند. مقدار بالای PSNR نشان‌دهنده کیفیت بالاتر تصویر است. معادله PSNR به‌صورت رابطه ۳ است:

$$PSNR = 10\log_{10}\left(\frac{MAX^2}{MSE}\right) \quad (۳)$$

که در آن MAX نمایانگر حداکثر مقدار پیکسل تصویر و MSE به معنای خطای میانگین مربعات بین تصویر اصلی و تصویر فشرده شده است و به‌صورت رابطه ۴ بیان می‌شود [۱۹].

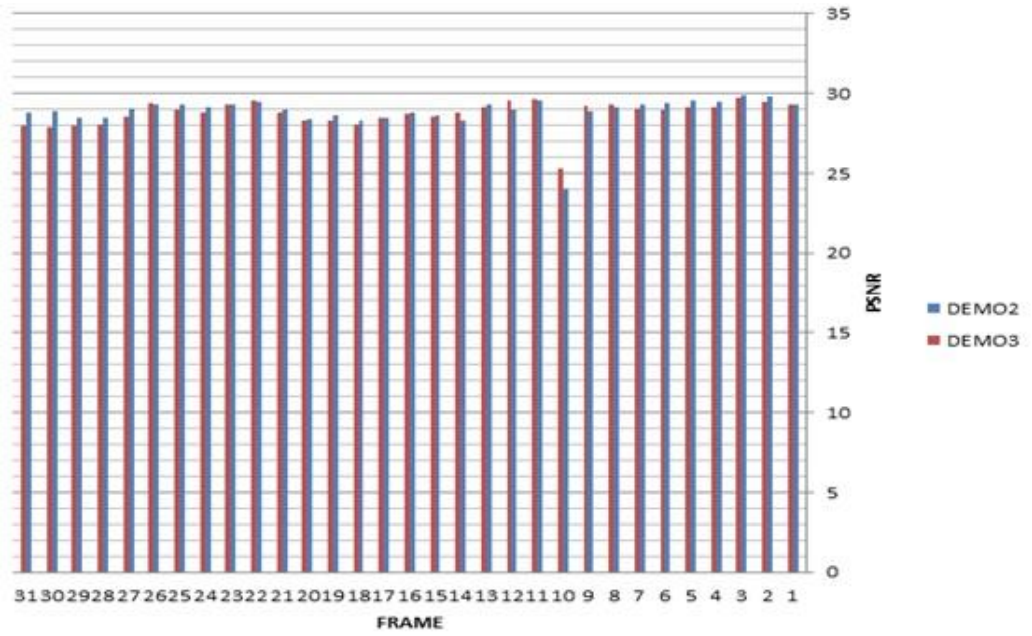
$$MSE = \frac{1}{mn}\sum_{x=0}^{m-1}\sum_{y=0}^{n-1}\left\|R(x,y) - C(x,y)\right\|^2 \quad (۴)$$

در رابطه ۳، m و n به‌عنوان تصاویر (قاب‌های فردی ویدیو) تعریف می‌شوند، که در آن بعد R(x, y) نمایانگر قاب مرجع و (x, C(y نمایانگر قاب جبران حرکت شده است [۱۹].

نتیجه کیفی شبیه‌سازی (PSNR) این الگوریتم با رنگ آبی و الگوریتم tss به رنگ قرمز در شکل ۵ نشان داده شده است. در اولین قاب به خاطر استفاده از یک الگوریتم یکسان مقدار PSNR یکسان است ولی بقیه قاب‌ها به‌جز مقدار کمی از قاب‌ها افزایش کیفیت را نشان می‌دهد.

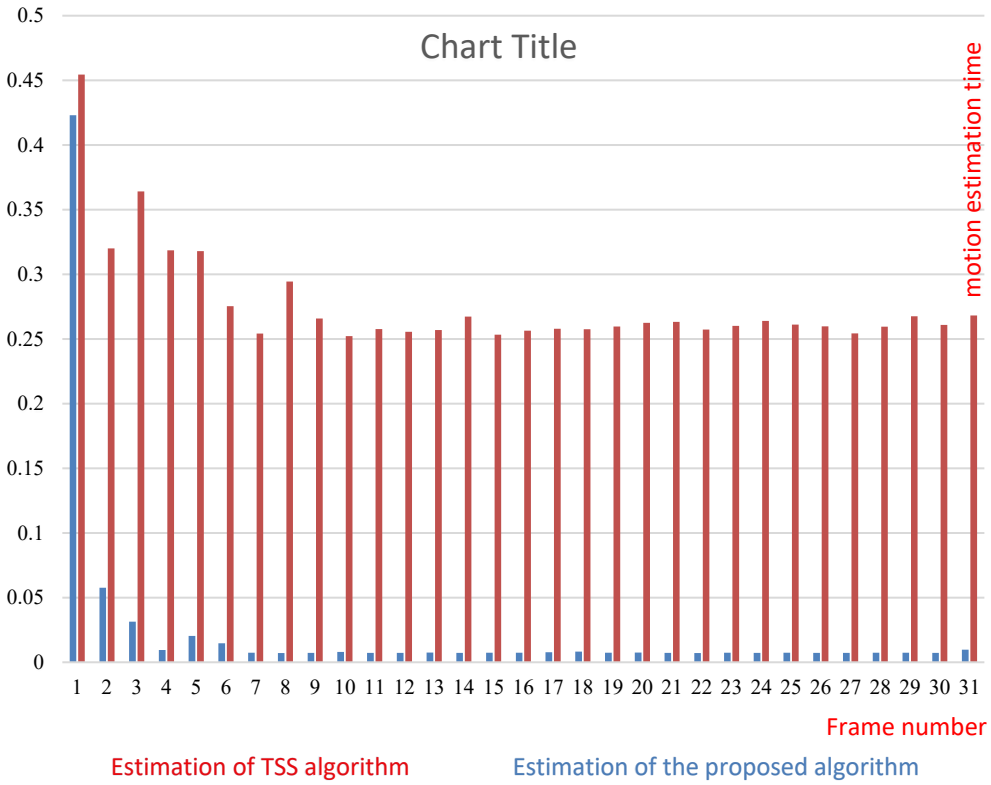
این الگوریتم محاسبات تخمین حرکت مبتنی بر بلوک را کاهش می‌دهد و اگر تطبیق بهتری در یک بلوک انجام نگیرد فقط همان بلوک با الگوریتم جایگزین بهتر، بهترین تطبیق را انجام خواهد داد.

۳۰ قاب از توالی استاندارد Coastguard با الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی و با الگوریتم جستجوی سه‌مرحله‌ای مقایسه شد، و نتیجه کیفی آن در شکل ۵ به‌صورت نمودار نمایش داده شد.



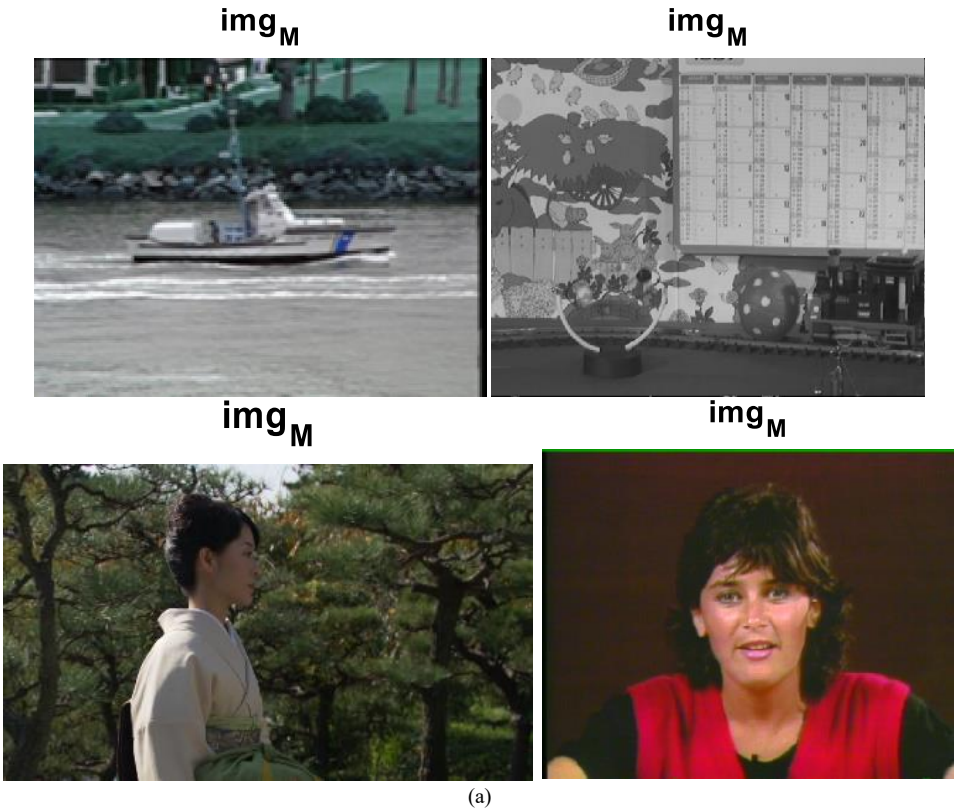
شکل ۵: مقایسه الگوریتم DVBFME و جستجوی TSS از لحاظ PSNR

Figure 5. Comparison of the DVBFME algorithm and the TSS search in terms of PSNR

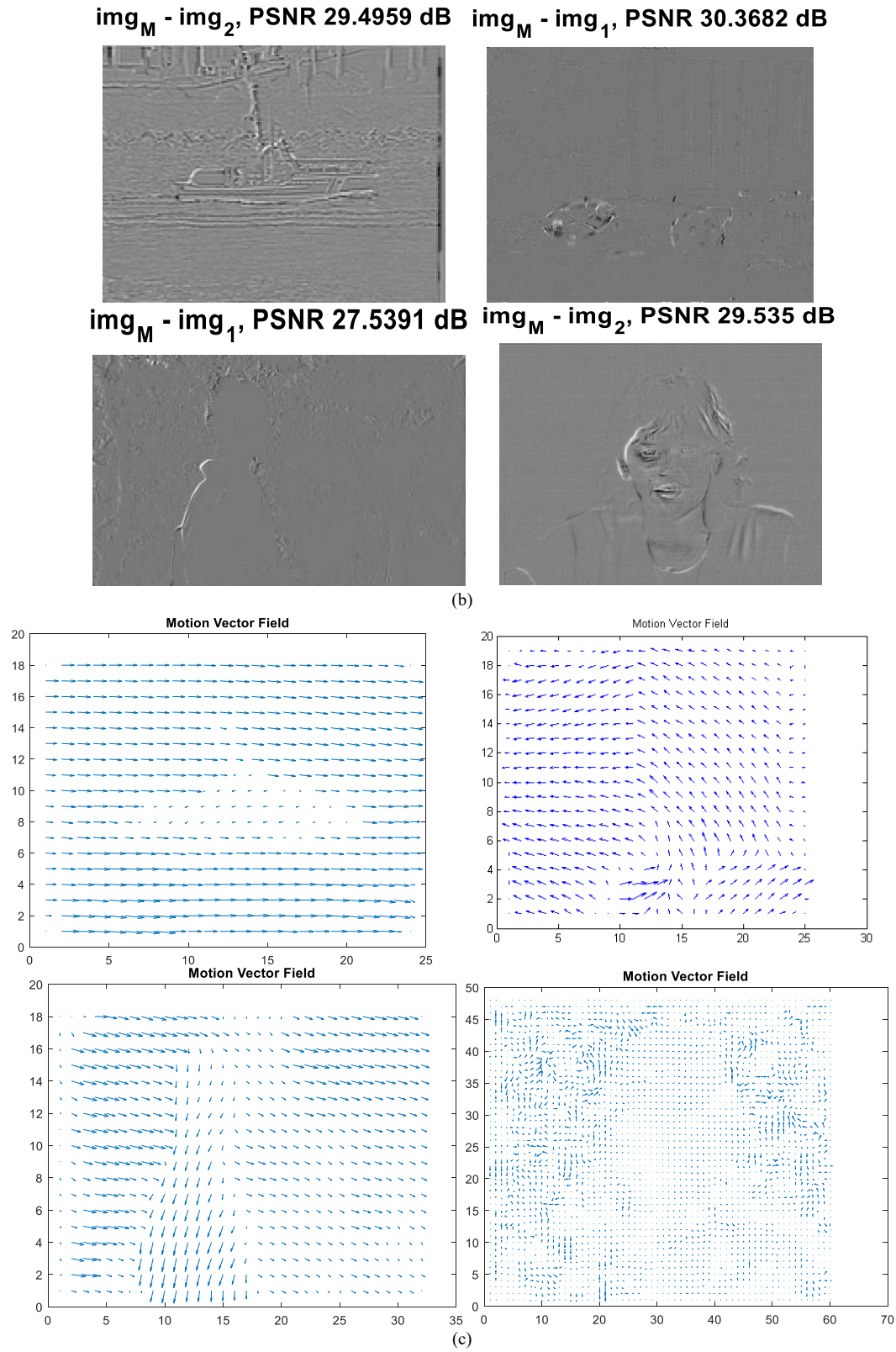


شکل ۶: مقایسه الگوریتم DVBFME و جستجوی TSS از لحاظ زمان پردازش

Figure 6. Comparison of the DVBFME algorithm and the TSS search in terms of processing time



(a)



شکل ۷: (a) قاب بازسازی شده، (b) بردارهای حرکت و (c) تصاویر جبران حرکت شده

Figure 7. (a) Reconstructed frame, (b) motion compensation images, and (c) motion vectors

همچنین برای بررسی دقیق‌تر، الگوریتم پیشنهادی با تعدادی از الگوریتم‌های ارایه شده در جدول ۲ مقایسه شد. با مشاهده نتایج به‌دست‌آمده و ارزیابی آن با سایر روش‌ها اختلاف معناداری را با آنها نشان می‌دهد.

جدول ۱: میانگین زمان تخمین و جبران حرکت هر توالی و پارامترهای کیفی

Table 1. Average estimation time and movement compensation of each sequence and qualitative parameters

Motion estimation time (second)	Motion compensation time (second)	SSIM	MSE	PSNR	Algorithm	Sequence
0.048000	0.0282222	0.977	0.000086	39.720	DVBFME	**Trevor**
0.4011935	0.0251258	0.932	0.00038	33.191	TSS	
0.0370593	0.05862187	0.946	0.00049	28.936	DVBFME	**Caltrain**
1.2880645	0.05770925	0.902	0.0011	29.539	TSS	
0.0167042	0.01873125	0.964	0.000615	31.892	DVBFME	**Coastguard**
0.2711806	0.02314193	0.920	0.00163	26.980	TSS	
0.0376906	0.05690312	0.994	0.000893	39.674	DVBFME	**Missa**
0.4939402	0.05845161	0.942	0.000828	32.765	TSS	
0.3695011	0.50926801	0.992	0.00000797	48.869	DVBFME	**Surfside**
3.150000	0.54545025	0.882	0.000786	30.700	TSS	

جدول۲: متوسط SSIM و PSNR قاب‌های بازسازی شده

Table 2. Average SSIM and PSNR of reconstructed frames

Algorithms		Sequences			
		BlowingBuBbles	BasketballDrill	Racehorses	kimono
PSNR (dB)	DVBFME	36.82	38.5	34.94	40.1
	TSS	19.9	25.5	18.6	37.1
	VTM[20]	34.03	35.4	34.7	35.8
	HM[21]	31.05	33.6	33.5	35.3
	RLVC[22]	30.69	30.8	31.2	34.2
	M-LVC[23]	30.81	30.7	30.8	34.6
	DVC-PRO[24]	30.89	31.1	31.01	34.9
	DCVC[25]	31.7	31.3	31.7	34.4
	CANF-VC[26]	33.1	32.7	32.8	35.01
	TCMVC[27]	33.6	32.9	33.5	35.2
	HEM[28]	34.25	33.55	34.3	35.82
	[29]	34.65	34.2	35.1	35.9
SSIM	DVBFME	0.994	0.989	0.993	0.998
	TSS	0.718	0.749	0.95	0.861
	VTM	0.990	0.986	0.988	0.986
	HM	0.989	0.983	0.985	0.983
	RLVC	0.991	0.982	0.987	0.982
	M-LVC	0.987	0.977	0.98	0.977
	DVC-PRO	0.989	0.982	0.986	0.982
	DCVC	0.991	0.986	0.988	0.986
	CANF-VC	0.988	0.984	0.985	0.984
	TCMVC	0.992	0.987	0.989	0.987
	HEM	0.992	0.988	0.991	0.988
	[29]	0.993	0.989	0.991	0.989

الگوریتم پیشنهادی با تخمین دقیق مقدار جابجایی بلوکی انجام شده در قاب‌های متوالی، زمان تخمین حرکت را به مقدار قابل مقایسه‌ای کاهش می‌دهد. برای اثبات ادعای مطرح شده، الگوریتم پیشنهادی به یک توالی Full HD 1080p اعمال شده است و نتایج متوسط زمان تخمین حرکت انجام یافته را برای هر قاب از این توالی را در جدول ۳ ارایه کرده است

جدول۳: متوسط زمان تخمین حرکت برای هرقاب 1080p

Table 3. Average motion estimation time for each 1080p frame

Algorithms	Motion Estimation
DVBFME	0.216 s
TSS	8.42 s
TCMVC[27]	0.81 s
HEM[28]	0.75 s
[29]	0.94 s

۵- نتیجه‌گیری

ویدیوهای با رزولیشن بالا و تعداد قاب‌های بیشتر در ارتباطات ویدیویی نیاز به محاسبات بیشتری دارد این امر تأخیر قابل‌توجهی را بر سیستم کد کننده اعمال می‌کند، همچنین در بحث ویدیو کنفرانس‌ها که ارتباط به‌صورت زمان آنی از اهمیت بالایی برخوردار است ارزش تخمین حرکت سریع را دو چندان می‌کند . برای حل این مورد الگوریتم پیشنهادی مطرح شد و برای ارزیابی آن روی توالی ویدیویی استاندارد مختلف امتحان شد. نتایج نشان داد الگوریتم پیشنهادی زمان محاسبات را به‌طور چشمگیر کاهش داد و درعین‌حال باعث بهبود نسبی کیفیت ویدیو شد. لذا می‌توان با رعایت شرایط الگوریتم در کد کننده‌های ویدیویی در قسمت تخمین حرکت از آن بهره برد و با کاهش پیچیدگی محاسبات به تخمین حرکت آنی نزدیک شد. البته می‌توان از الگوی شتاب حرکتی بلوک‌ها در مقیاس پنجره جستجو برای تسریع این الگوریتم استفاده کرد ولی به خاطر لزوم تحقیقات زیاد برای به‌کارگیری موفق آن نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش مورد استفاده قرار نگرفته است.

مراجع

[1] Y. Zhang, Ch. Zhang, R. Fan, S. Ma, Zh. Chen, and C. C. J. Kuo, “Recent advances on HEVC inter-frame coding: From optimization to implementation and beyond,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 30, no. 11, pp. 4321-4339, November 2020, doi: 10.1109/TCSVT.2019.2954474.

[2] S. Gogoi and R. Peesapati, “Design and implementation of an efficient multi-pattern motion estimation search algorithm for HEVC/H.265,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 319-328, November 2021, doi: 10.1109/TCE.2021.3126670.

[3] W. Bao, W. Sh. Lai, X. Zhang, and Zh. Gao, “MEMC-Net: Motion estimation and motion compensation driven neural network for video interpolation and enhancement,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 43, pp. 1-16, March 2021, doi: 10.48550/arXiv.1810.08768.

[4] T. Koga, K. Iinuma, A. Hirano, Y. Iijima, and T. Ishiguro, “Motion compensated interframe coding for video conferencing,” *National Telecommunication Conference*, New Orleans, LA, 1981, pp. 531-535.

[5] R. Li, B. Zeng and M. L. Liou, “A new three-step search algorithm for block motion estimation,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 438-442, August 1994, doi: 10.1109/76.313138.

[6] L. M. Po and W. C. Ma, “A novel four-step search algorithm for fast block motion estimation,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 313-317, June 1996, doi: 10.1109/76.499840.

[7] J. Y. Tham, S. Ranganath, M. Ranganath, and A. A. Kassim, “A novel unrestricted center-biased diamond search algorithm for block motion estimation,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 369-377, August 1998, doi: 10.1109/76.709403.

[8] C. Zhu, X. Lin, and L.-P. Chau, “Hexagon-based search pattern for fast block motion estimation,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 349-355, May 2002, doi : 10.1109/TCSVT.2002.1003474.

[9] K. C. R. C. Varma and S. Mahapatra, “Complexity reduction of test zonal search for fast motion estimation in uni-prediction of high efficiency video coding,” *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 18, no. 3, pp. 511-524, June 2021, doi: 10.1007/s11554-020-00983-y.

[10] O. Ndili and T. Ogunfunmi, “Fast algorithm and efficient architecture for integer and fractional motion estimation,” *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 75, no. 1, pp. 55-64, June 2014, doi: 10.1007/s11265-013-0793-8.

[11] Y. Nie and K. K. Ma, “Adaptive rood pattern search for fast blockmatching motion estimation,” *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 11, no. 12, pp. 1442-1449, December 2002, doi: 10.1109/TIP.2002.806251.

[12] N. Purnachand, L. N. Alves, and A. Navarro, "Fast Motion Estimation Algorithm for HEVC," *IEEE Second International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, Berlin, Germany, 2012, pp. 34-37, doi: 10.1109/ICCE-Berlin.2012.6336494.

[13] K. Singh and S. R. Ahamed, “Computationally efficient motion estimation algorithm for HEVC,” *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 90, no. 12, pp. 1713-1727, December 2018, doi: 10.1007/s11265-017-1321-z.

[14] N. Kim and J. W. Kang, “Dynamic motion estimation and evolution video prediction network,” *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 23, PP. 3986-3998, November 2020, doi: 10.1109/TMM.2020.3035281.

[15] S. Gogoi and R. Peesapati, “A hybrid motion estimation search algorithm for HEVC/H.265,” *IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES) (Formerly iNiS)*, India, Rourkela, 2019, pp. 129-132, doi: 10.1109/iSES47678.2019.00037.

[16] Y. S. Ho, “Advanced video coding for next-generation multimedia services,” Published by InTech Janeza Trdine 9, Croatia. 2012, pp. 1-214.

[17] E. P. Simoncelli and D. J. Heeger, “A model of neuronal responses in visual area MT,” *Vision Research*, vol. 38, no. 5, pp. 743-761, March 1998, doi: 10.1016/S0042-6989(97)00183-1.

[18] S. K. Chatterjee, S. K. Vittapu, and S. Kundu, “Prediction-biased diamond search algorithm: a new approach to reduce motion estimation complexity,” *Microsystem Technologies*, vol. 27, pp. 2027-2032, January 2021, doi: 10.1007/s00542-020-05167-z.

[19] Sh. Agha, M. Khan, and F. Jan, “Efficient fast motion estimation algorithm for real-time applications,” *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 19, pp. 403-413, January 2022, doi: 10.1007/s11554-021-01188-7.

[20] B. Bross, J. Chen, J. -R. Ohm, G. J. Sullivan, and Y. -K. Wang, "Developments in International Video Coding Standardization After AVC, With an Overview of Versatile Video Coding (VVC)," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 9, pp. 1463-1493, Sept. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3043399.

[21] G. J. Sullivan, J. -R. Ohm, W. -J. Han, and T. Wiegand, "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 22, no. 12, pp. 1649-1668, Dec. 2012, doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221191.

[22] R. Yang, F. Mentzer, L. Van Gool, and R. Timofte, "Learning for Video Compression With Recurrent Auto-Encoder and Recurrent Probability Model," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 15, no. 2, pp. 388-401, Feb. 2021, doi: 10.1109/JSTSP.2020.3043590.

[23] J. Lin, D. Liu, H. Li, and F. Wu, "M-LVC: Multiple Frames Prediction for Learned Video Compression," *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 3543-3551, doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00360.

[24] G. Lu, X. Zhang, W. Ouyang, L. Chen, Z. Gao, and D. Xu, "An End-to-End Learning Framework for Video Compression," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 43, no. 10, pp. 3292-3308, 1 Oct. 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2020.2988453.

[25] J. Li, B. Li, and Y. Lu, “Deep contextual video compression,” in *Proc. Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS)*, vol. 34, 2021, pp. 18114–18125.

[26] Y.-H. Ho, C.-P. Chang, P.-Y. Chen, A. Gnutti, and W.-H. Peng, “CANFVC: Conditional augmented normalizing flows for video compression,” in *Proc. 17th Eur. Conf. Comput. Vis. Tel Aviv*, Israel: Springer, 2022, pp. 207–223.

[27] X. Sheng, J. Li, B. Li, L. Li, D. Liu, and Y. Lu, "Temporal Context Mining for Learned Video Compression," in *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 25, pp. 7311-7322, 2023, doi: 10.1109/TMM.2022.3220421.

[28] J. Li, B. Li and Y. Lu, “Hybrid spatial–temporal entropy modelling for neural video compression,” in *Proc. 30th ACM Int. Conf. Multimedia*, pp. 1503–1511, 2022, doi: 10.1145/3503161.3547845.

[29] X. Sheng, L. Li, D. Liu, and H. Li, "Spatial Decomposition and Temporal Fusion Based Inter Prediction for Learned Video Compression," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 34, no. 7, pp. 6460-6473, July 2024, doi: 10.1109/TCSVT.2024.3360248.

JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.71656/jce.2025.1127837

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

Design of Broadband Miniaturized Microstrip Array Antenna with Circular Polarization for Use in Anti-GPS Systems

Morteza MohammadiShirkolaei[1] | Mehdi Aslinezhad[2]

[1]Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering,
m.mohammadi@ssau.ac.ir

[2] Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering,
m.aslinezhad@ssau.ac.ir

Correspondence
Morteza MohammadiShirkolaei, Assistant Professor, ShahidSattari University of Aeronautical Engineering
Email: m.mohammadi@ssau.ac.ir

Main Subjects:
Antenna Design

Paper History:
Received: 1 July 2024
Revised: 25 August 2024
Accepted: 29 August 2024

Abstract

This paper presents the design of a broadband miniaturized microstrip array antenna with circular polarization for anti-GPS applications, featuring a single-port configuration. The design process begins with the development of a broadband antenna element optimized for increased bandwidth, suitable gain, and circular polarization. A 1-to-4 power divider with 90-degree phase progression at its outputs is then integrated, feeding four antenna elements rotated 90 degrees relative to each other, forming a 2×2 array. The inter-element spacing is specifically designed to produce radiation pattern nulls at ±90°, enhancing resilience against GPS jammers. Full-wave simulation results for the complete antenna system are presented and analyzed. This antenna is particularly suitable for integration in drones that rely on GPS for positioning, offering improved anti-jamming capability while maintaining compact form and circular polarization characteristics.

Keywords: Microstrip antenna, circular polarization, wide band, GPS.

Highlights

- Miniaturized microstrip array antenna.
- Circularly polarized microstrip array antenna**.**
- The designed antenna is used in anti-GPS systems and has a single port.

Citation: M. MohammadiShirkolaei, and M. Aslinezhad, "Design of Broadband Miniaturized Microstrip Array Antenna with Circular Polarization for Use in Anti-GPS Systems," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 45–55, 2025, doi:10.71656/jce.2025.1127837 [in Persian].

1. Introduction

Microstrip array antennas offer significant advantages for airborne transmitters and receivers due to their lightweight construction, manufacturing simplicity, and cost-effectiveness. Single-feed circularly polarized patch arrays are particularly advantageous as they connect to a single feed network, eliminating the need for additional circuitry that increases overall dimensions in dual-feed configurations—a factor that can compromise frequency performance through elevated sidelobe levels. Conventional implementations typically suffer from narrow bandwidth (≤1%).

Among prevalent single-feed circular polarization techniques—including slotted patches, truncated-corner patches, and diagonally-fed square patches—this work employs a square patch with two truncated corners fed directly via an SMA connector. To enhance bandwidth, the patch height is increased, and electromagnetic coupling is utilized for SMA feeding. Cost optimization is achieved through FR-4 substrate selection for the radiating structure.

A custom 1-to-4 feed network, detailed in the design section, interconnects four antenna elements. This network is fabricated on Rogers 4003 substrate to minimize feed losses. Full-wave simulation via Ansoft HFSS demonstrates satisfactory antenna performance across an 8–11% bandwidth, meeting typical wireless communication requirements while maintaining radiation pattern integrity and polarization characteristics.

2. Array design (2*2)

In this section, a circularly polarized single-element antenna is initially designed. Subsequently, a feed network with appropriate impedance matching and 90-degree phase progression is developed to enable sequential rotation, achieving an axial ratio below 3 dB. Finally, the integrated system performance is evaluated by connecting four antenna elements to the output ports of the power divider, with comprehensive results presented and analyzed.

2-1. Circularly polarized antenna

In this section, the design of a single-element circularly polarized antenna is presented. As illustrated in Figure I, the antenna is fed directly by an SMA connector. Circular polarization is achieved by truncating two opposite corners of the patch. To obtain sufficient impedance bandwidth, a substrate height of 42.9 mm is selected. For cost efficiency, FR-4 material is chosen as the substrate dielectric. Since a 42.9 mm thick substrate is not commercially available as a standard product, this thickness is realized by stacking six individual FR-4 layers, each with a thickness of 1.575 mm.

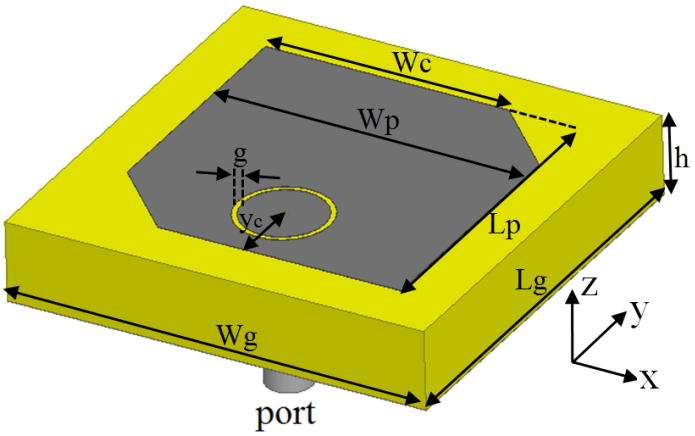


Figure I. Single patch antenna with circular polarization

Due to the feeding configuration and the strategic placement of corner truncations, this antenna exhibits Right-Hand Circular Polarization (RHCP). Consequently, the RHCP radiation pattern represents the co-polarization component, while the Left-Hand Circular Polarization (LHCP) pattern corresponds to cross-polarization. The gain of the single antenna element measures 2.5 dB, a result of employing a substrate with a relatively high dielectric constant ($\varepsilon_r = 4.4$) and the resulting compact patch dimensions compared to conventional designs. The cross-polarization level remains below -20 dB, indicating excellent polarization purity suitable for circularly polarized antenna applications.

2-2. Feed network 1 to 4

To form an array using the antenna element described in Section 2-1 and enhance overall gain, a 1-to-4 feed network is implemented, as illustrated in Figure II. To improve the axial ratio (AR) bandwidth, the four antenna

elements are rotated 90 degrees relative to each other and fed with sequential 90-degree phase shifts—a technique known as the sequential rotation method.

Given the relatively long feed network path, a low-loss Rogers 4003 substrate (thickness: 1.575 mm) is used to minimize losses. The input impedance of each single element is 50 ohms. By connecting two elements in parallel, the resulting impedance becomes 25 ohms. A quarter-wavelength impedance transformer (length L_5) is then used to match this 25-ohm impedance to 100 ohms. Finally, two parallel 100-ohm branches are combined into the main 50-ohm feed line.

The length variations within the feed network produce the required 90-degree phase progression for sequential rotation, thereby enhancing the AR bandwidth of the array.

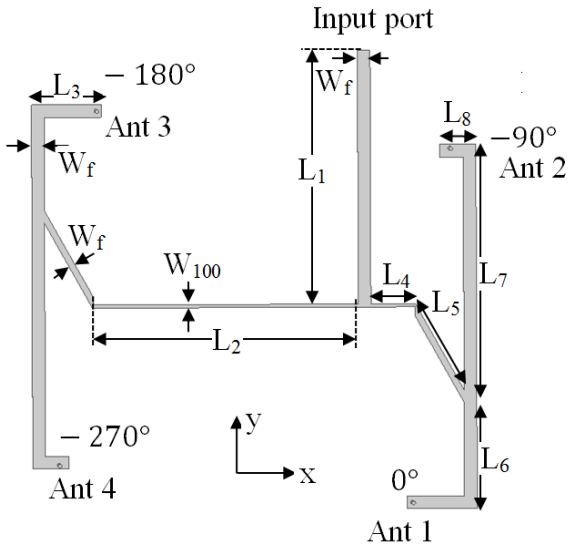


Figure II. 1 to 4 feed network for use in circularly polarized antenna arrays

2-3. 2*2 Array Antenna

Figure III illustrates the 2×2 array antenna configuration, demonstrating the 90-degree rotational arrangement between adjacent elements. A significant advantage of this design is its integrated feed network excitation.

The antenna exhibits a critical performance characteristic: it maintains a sidelobe level below -25 dB against jamming signals and noise sources originating at the horizon level. This radiation pattern property makes the proposed design particularly suitable for anti-GPS applications where interference suppression is essential. The combination of sequential rotation feeding and optimized array spacing creates this desirable pattern nullification in the horizontal plane.

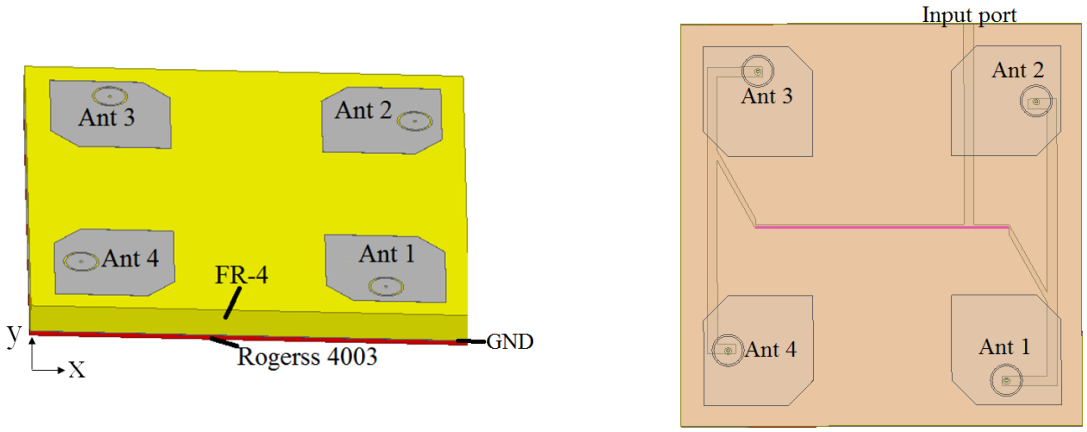


Figure III. 2*2 array antenna with sequential rotation

3. Conclusions

A circularly polarized patch array antenna has been proposed, exhibiting an axial ratio below 3 dB and a VSWR under 2 across a 12% bandwidth. A key advantage of this design is its radiation pattern, which achieves a received power level of less than -25 dB relative to the main lobe at angles beyond ±80°. This characteristic makes the antenna particularly suitable for anti-GPS applications, as it effectively suppresses interference arriving from near-horizon directions. The antenna performance has been thoroughly validated through full-wave electromagnetic analysis.

Declaration of Competing Interest: Authors do not have a conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Morteza Mohammadi Shirkolaei: Software, methodology, writing original draft preparation, resources, methodology, manuscript editing; **Mehdi Aslinezhad**: Writing original draft preparation, resources, manuscript editing.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.71656/jce.2025.1127837

مقاله پژوهشی

طراحی آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپی کوچک شده پهن باند با پلاریزاسیون دایروی برای استفاده در سامانه‌های ضد GPS

مرتضی محمدی شیرکلایی*[1] | مهدی اصلی نژاد[2]

[1]دانشکده مهندسی برق دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری،
m.mohammadi@ssau.ac.ir

[2]دانشکده مهندسی برق دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری،
m.aslinezhad@ssau.ac.ir

نویسنده مسئول:
*مرتضی محمدی شیرکلائی، استادیار، دانشکده مهندسی برق دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری،
m.mohammadi@ssau.ac.ir

موضوع اصلی:
طراحی آنتن

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۱ تیر ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۴ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۸ شهریور ۱۴۰۳

چکیده:

در این مقاله یک آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپی کوچک‌شده پهن باند با پلاریزاسیون دایروی برای استفاده در سامانه‌های ضد GPS که دارای یک پورت تکی است، پیشنهاد و طراحی شده است. روند کار به این صورت است که در ابتدا یک آنتن پهن باند جهت افزایش پهنای باند و گین مناسب با پلاریزاسیون دایروی طراحی می‌شود. سپس با طراحی یک تقسیم‌کننده یک‌به‌چهار که خروجی آن نسبت به هم دارای اختلاف‌فاز ۹۰ درجه می‌باشند و اتصال آن به چهار آنتن که به‌صورت ۹۰ درجه نسبت به هم چرخش دارند یک آنتن آرایه‌ای ۲ در ۲ به دست می‌آید. فاصله این آنتن‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده است که صفر الگوی تشعشعی در زوایای ۹۰+ درجه و ۹۰- درجه واقع شود تا نسبت به اخلالگرهای GPS مقاوم باشد. نتایج آنتن طراحی شده به‌صورت تمام موج در این مقاله موردبحث و ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از کاربردهای این آنتن استفاده از آن روی پهپادهای است که از طریق GPS موقعیت خود را پیدا می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: آنتن مایکرواستریپی، پلاریزاسیون دایروی، پهن باند، GPS.

تازه‌های تحقیق:

- آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپی کوچک‌شده است.
- آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپی با پلاریزاسیون دایروی است.
- آنتن طراحی شده در سامانه‌های ضد GPS استفاده می‌شود که دارای یک پورت تکی است.

۱-مقدمه

آنتن‌های آرایه‌ای ریزنواری[1] به دلیل وزن کم، راحتی ساخت و هزینه پایین می‌توانند در فرستنده‌ها و گیرنده‌های هواپایه بسیار مناسب باشند[۱-۹]. آنتن‌های پچ آرایه‌ای با پلاریزاسیون دایروی با یک تغذیه واحد به دلیل اتصال به یک شبکه تغذیه دارای جذابیت زیادی می‌باشند. آنتن‌های پچ با پلاریزاسیون دایروی تغذیه دوگانه به یک مدار اضافی نیاز دارند، که اندازه کلی عنصر تابشی را بسیار بزرگ می‌کند، بنابراین عملکرد فرکانسی آرایه را از دیدگاه لوب‌های فرعی محدود می‌کند. پچ‌های تک تغذیه‌شده با پلاریزاسیون دایروی به‌طور گسترده در مقالات [۱۰-۱۴] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این‌گونه آنتن‌ها دارای باند بسیار باریک (۱٪ یا کمتر) هستند. پرکاربردترین آنتن‌های پچ با پلاریزاسیون دایره‌ای تک تغذیه‌ای عبارت‌اند از: پچ‌های شکاف دار[2]، پچ‌ها بریده‌شده و پچ‌های مربعی که روی قطر تغذیه می‌شوند. در این مقاله ابتدا یک آنتن تکی مربعی که دو گوشه آن بریده‌شده است و به‌وسیله یک کانکتور SMA به‌راحتی می‌تواند تغذیه شود، طراحی می‌شود. برای به دست آوردن پهنای باند مطلوب هم‌ارتفاع پچ بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است و هم تغذیه SMA از طریق تزویج روی پچ اعمال می‌شود. برای ارزان شدن ساختار پیشنهادی پچ روی زیر لایه FR-4 طراحی شده است. در ادامه با استفاده از یک شبکه تغذیه ۱ به ۴ مناسب که در بخش طراحی به‌خوبی شرح داده شده است چهار آنتن طراحی شده را به آن وصل کرده و نتایج آن توسط یک نرم‌افزار تمام موج (Ansoft HFSS) مورد بحث و بررسی قرار داده شده است. برای کاهش تلفات شبکه تغذیه، تقسیم‌کننده ۱ به ۴ روی زیر لایه Rogerss 4003 طراحی شده است. آنتن پیشنهادی در این مقاله در محدوده فرکانسی بسیار وسیع‌تری عملکرد رضایت‌بخشی دارد و به نظر می‌رسد برای استفاده در برنامه‌های ارتباط بی‌سیم که در آن نیاز به پهنای باند معمولی بین ۸ تا ۱۱ درصد است، مناسب باشد.

۲-طراحی آرایه ۲*۲

در این بخش ابتدا آنتن تک المان با پلاریزاسیون دایروی [3]طراحی شده، سپس یک خط تغذیه مناسب که دارای تطبیق امپدانس مناسب و اختلاف‌فاز ۹۰درجه‌ای جهت رسیدن به چرخش متناوب برای رسیدن به نسبت محوری کمتر از ۳dB طراحی می‌شود. در نهایت با اتصال ۴ آنتن به خروجی‌های تقسیم‌کننده نتایج مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۱- آنتن با پلاریزاسیون دایروی

در این بخش به طراحی آنتن تک المان با پلاریزاسیون دایروی پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، آنتن توسط یک کابل SMA تغذیه شده است. برای رسیدن به پلاریزاسیون دایروی دو گوشه آنتن برداشته شده است. برای رسیدن به پهنای باند امپدانسی مناسب ارتفاع زیر لایه مورد استفاده به‌اندازه ۹/۴۲ میلی‌متر انتخاب شده است. برای کاهش هزینه آنتن طراحی شده زیر لایه انتخاب شده از جنس FR-4 است. با توجه به اینکه زیر لایه با ضخامت ۹/۴۲ میلی‌متر به‌صورت استاندارد موجود نیست، می‌توان ۶ تا زیر لایه به ضخامت ۱/۵۷۵ میلی‌متر را روی‌هم قرار داد تا به ضخامت موردنظر رسید.

جدول ۱: ابعاد آنتن پیشنهادی در شکل ۱

Table 1. Dimensions of the proposed antenna in figure 1

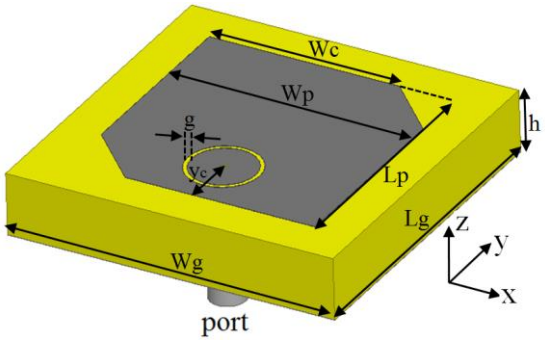
Parameter	Amount	Parameter	Amount
Wg	50mm	Wc	29mm
Lg	50mm	yc	4.8mm
Wp	39mm	g	0.61mm
Lp	39mm	h	9.42mm

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است وجود شکاف روی پچ به دلیل این است که تغذیه SMA از طریق تزویج به پچ اعمال شود، که این روند سبب افزایش پهنای باند امپدانسی آنتن پیشنهادی خواهد شد. شکل ۲ تلفات برگشتی آنتن را نشان

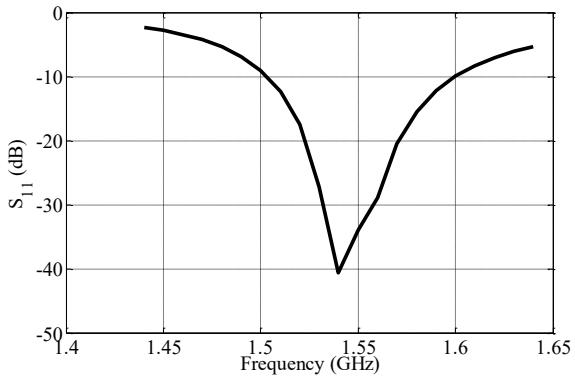
[1] Microstrip array
[2] Slot patch
[3] Circular polarization

داده است که در محدوده فرکانسی ۱/۵ تا ۱/۶ گیگاهرتز داری تلفات برگشتی کمتر از ۱۰dB- است. ابعاد پچ پیشنهادی با توجه به شکل ۱ در جدول ۱ است.

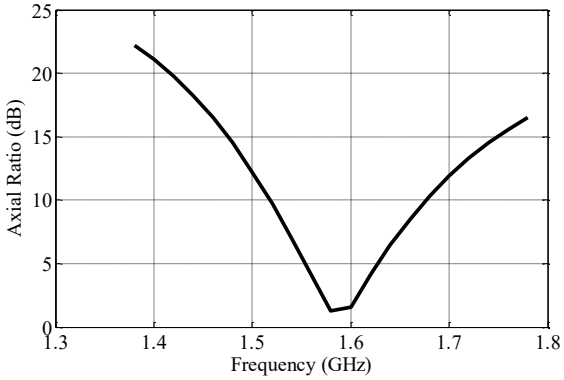
شکل ۳ نمودار نسبت محوری (Axial Ratio) را نشان می‌دهد که در محدوده فرکانسی ۱/۵۷ تا ۱/۶۲ گیگاهرتز داری تلفات AR کمتر از ۳dB است. شکل ۴ الگوهای تشعشعی پلاریزاسیون دایروی راستگرد (RHCP) و چپگرد (LHCP) را در صفحات E-plane و H-plane نشان می‌دهد. با توجه به نحوه تغذیه و قرار گرفتن برش‌ها در دو گوشه، این آنتن دارای پلاریزاسیون RHCP است. پس پترن RHCP به‌عنوان co-polarization و پترن LHCP به‌عنوان پلاریزاسیون متقاطع (cross-polarization) است. گین تک المان به دلیل استفاده از زیرلایه با ثابت دی‌الکتریک نسبتاً بالا (۴/۴) و کوچک شدن پچ نسبت به پچ‌های معمولی برابر ۲/۵dB است. پلاریزاسیون متقاطع آنتن تکی کمتر از ۲۰dB- است که برای آنتن‌ها با پلاریزاسیون دایروی مقدار مطلوبی است.



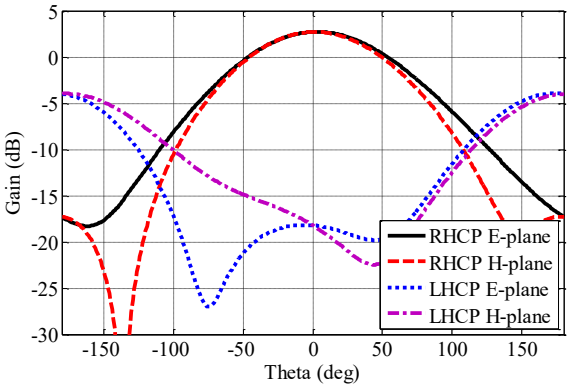
شکل ۱: آنتن پچ تکی با پلاریزاسیون دایروی
Figure 1. Single patch antenna with circular polarization



شکل ۲: تلفات برگشتی آنتن تکی
Figure 2. Return loss of the single antenna



شکل ۳: نسبت محوری آنتن تکی پیشنهادی
Figure 3. Axial ratio of the proposed single antenna



شکل ۴: پترن تشعشعی RHCP و LHCP آنتن تکی در صفحات E و H در فرکانس f=1.575GHz

Figure 4. RHCP and LHCP radiation patterns of a single antenna in the E and H planes at frequency f=1.575GHz

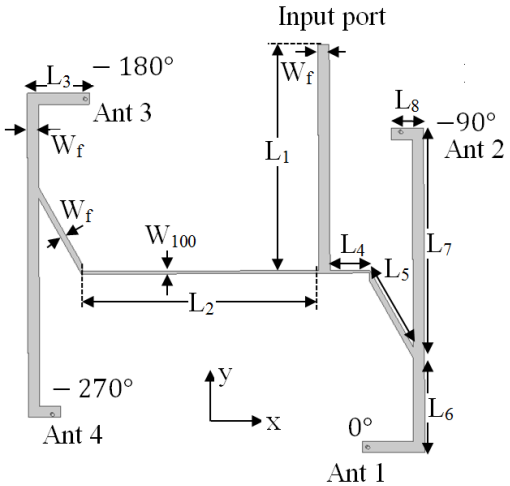
۲-۲-شبکه تغذیه ۱ به ۴

برای آرایه کردن آنتن ارائه‌شده در بخش ۲-۱ و افزایش گین نیاز به آرایه کردن المان‌ها است. شکل ۵ شبکه تغذیه ۱ به ۴ مورد استفاده برای این آنتن را نشان می‌دهد. برای افزایش پهنای باند AR نیاز است که آنتن‌ها نسبت به هم به‌صورت ۹۰ درجه چرخیده و فازهای ورودی به المان‌ها نسبت به هم اختلاف‌فاز ۹۰درجه‌ای داشته باشند (روش چرخش متناوب[1]). از آنجائی که طول شبکه تغذیه نسبتاً طولانی است برای کاهش تلفات، شبکه تغذیه روی زیرلایه Rogerss 4003 با ضخامت ۱/۵۷۵mm که تلفات کمتری نسبت به FR-4 دارد، طراحی می‌شود.

جدول۲: ابعاد خط تغذیه پیشنهادی در شکل ۵

Table 2. Dimensions of the proposed feed line in figure 5

Parameter	Amount	Parameter	Amount
W_f	۳/۴mm	L_3	18.9mm
W_{100}	۰/۸۶mm	L	4mm
L_1	۶۸/۴mm	L_4	12mm
L_2	۷۱/۵mm	L_5	26.7mm
L_6	۲۸/۵mm	L_8	9.8mm
L_7	۶۶/۱mm		



شکل ۵: شبکه تغذیه ۱ به ۴ برای استفاده در آرایه کردن آنتن با پلاریزاسیون دایروی

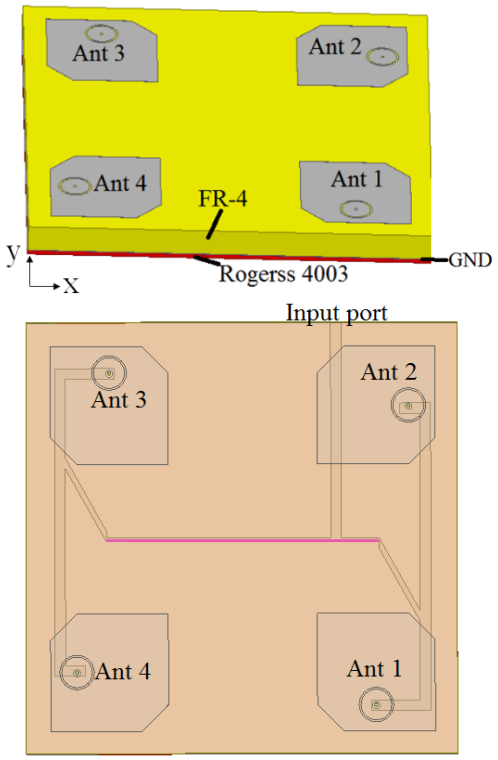
Figure 5. 1 to 4 feed network for use in circularly polarized antenna arrays

[1] Sequational rotation

با توجه به اینکه ورودی تک المان ۵۰ اهم است دو تا مقاومت موازی ۵۰اهمی تبدیل به مقاومت ۲۵اهمی می‌شود. حال برای اینکه مقاومت ۲۵اهمی به مقاومت ۱۰۰اهمی تطبیق شود از مبدل امپدانس به طول ربع طول‌موج با طول L_5 استفاده می‌شود. در نهایت دو تا مقاومت موازی۱۰۰اهمی به خط تغذیه ۵۰اهمی که ورودی اصلی است وصل می‌شود. اختلاف طول‌ها در این شبکه تغذیه سبب ایجاد اختلاف‌فاز لازم برای روش چرخش متناوب و افزایش پهنای باند AR می‌شود. با توجه به شکل ۵ ابعاد شبکه تغذیه مطابق با جدول ۲ است.

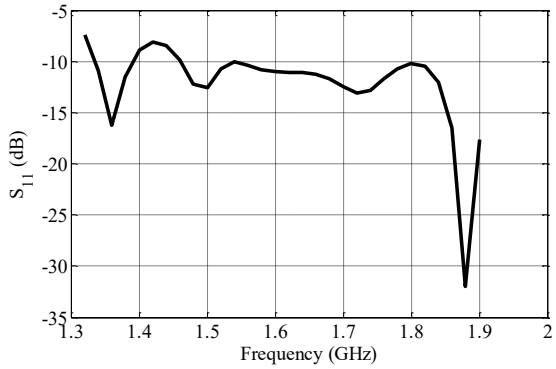
۲-۳- آنتن آرایه ۲*۲

شکل ۶ آنتن آرایه‌ای ۲*۲ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود المان‌های به‌صورت ۹۰ درجه نسبت به هم چرخش دارند. یکی از مزایای آنتن ارائه‌شده این است که توسط یک خط تغذیه تحریک می‌شود.



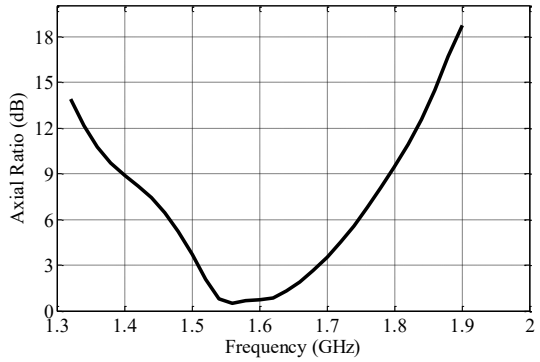
شکل ۶: آنتن آرایه‌ای ۲*۲ با چرخش متوالی
Figure 6. 2*2 array antenna with sequential rotation

شکل ۷ تلفات برگشتی آنتن آرایه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود پهنای باند امپدانسی آنتن تقریباً ۲۷٪ است(۱/۹- GHz۱/۴۵). شکل ۸ نسبت محوری آنتن آرایه پیشنهادی را نسبت به فرکانس نشان می‌دهد که پهنای باند AR<3dB آنتن پیشنهادی تقریباً ۱۲٪ است که نسبتاً پهنای باند زیادی برای آنتن‌های مایکرواستریپی است. شکل ۹ الگوی تشعشعی آنتن آرایه‌ای را در فرکانس‌های ۱/۵۷۵GHz نشان می‌دهد که دارای گین ۹dB است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود پلاریزاسیون متقاطع این آنتن تقریباً کمتر از ۲۹dB- در جهت بیم اصلی است که این مقدار در آنتن‌ها با پلاریزاسیون دایروی بسیار مطلوب است. یکی از مزایای مهم این آنتن پیشنهادی این است که آنتن نسبت به سامانه‌های اخلالگر و جمرهای نویز که در سطح افق به آنتن تابیده می‌شوند دارای سطح لوب کمتر از ۲۵dB- می‌باشند. به این دلیل آنتن پیشنهادی برای آنتن‌های ضد GPS بسیار مناسب است.



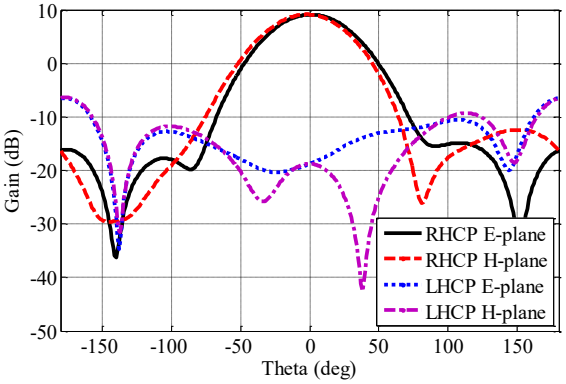
شکل۷: تلفات برگشتی آنتن آرایه‌ای ۲*۲ با چرخش متوالی

Figure 7. Return loss of a 2*2 array antenna with sequential rotation



شکل۸: نسبت محوری آنتن آرایه‌ای ۲*۲ با چرخش متوالی

Figure 8. Axial ratio of 2*2 array antenna with sequential rotation



شکل ۹: پترن تشعشعی RHCP و LHCP آنتن آرایه‌ای ۲*۲ در صفحات E و H در فرکانس f=1.575GHz

Figure 9. RHCP and LHCP radiation patterns of 2x2 array antenna in E and H planes at frequency f=1.575GHz

۳-نتیجه‌گیری

یک آنتن آرایه‌ای پچ با پلاریزاسیون دایروی پیشنهاد شد. این آنتن دارای نسبت محوری کمتر از ۹dB و VSWR کمتر از ۲ در پهنای باند ۱۲ درصد است. از مزایای مهم آنتن پیشنهادی این است که در زوایای بزرگ‌تر از ۸۰ درجه و کوچک‌تر از ۸۰- درجه مقدار توان دریافتی نسبت به لوب اصلی کمتر از ۲۵dB- است. بنابراین این آنتن می‌تواند در برای سامانه‌های ضد GPS بسیار مفید باشد. نتایج آنتن پیشنهادی به‌صورت تمام موج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

مراجع

[1] M. Mohammadi Shirkolaei, “Wideband Linear Microstrip Array Antenna with High Efficiency and Low Side Lobe Level,” *International journal of rf and microwave computer-aided engineering*, vol. 30, p. e22412, 2020, doi: 10.1002/mmce.22412.

[2] M. Mohammadi Shirkolaei, “High Efficiency X-Band Series-Fed Microstrip Array Antenna,” *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 105, pp. 33-45, 2020, doi: 10.2528/PIERC20061003.

[3] A. Maleki, H. Dalili Oskouei, and M. Mohammadi Shirkolaei, “Miniaturized microstrip patch antenna with high inter-port isolation for full duplex communication system,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, p. e22760, 2021, doi: 10.1002/mmce.22760.

[4] M. Mohammadi Shirkolaei, H. R. Dalili Oskouei, and M. Abbasi, “Design of a 1*4 Microstrip Antenna Array on the Human Thigh with Gain Enhancement,” *IETE Journal of Research*, vol. 69, no. 9, pp. 5944-5950, 2021, doi: 10.1080/03772063.2021.2004459.

[5] F. Moayyed, H. R. Dalili Oskouei, and M. Mohammadi Shirkolaei , “High Gain and Wideband Multi-Stack Multilayer Anisotropic Dielectric Antenna,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 99, pp- 103-109, 2021, doi: 10.2528/PIERL21062307.

[6] H. R. Dalili Oskouei, H. Dehjouriyan, and M. Mohammadi Shirkolaei, “A novel wideband dielectric resonator antenna with compact size,” *Electromagnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 285-290, 2023, doi: 10.1080/02726343.2023.2230065.

[7] H. Zamini, M. Afsahi, H. R. Dalili Oskouei, and M. Mohammadi Shirkolaei, “A Wide Angle Beam Scanning CRLH Leaky-Wave Antenna with Non-Identical Elements per Unit-Cells,” *Physica Scripta*, vol. 99, no. 10, p. 105535, 2024, doi: 10.1088/1402-4896/ad693c.

[8] V. Hosseini, Y. Farhang, K. Majidzadeh, and Ch. Ghobadi, “Multi-Objective Optimization Algorithm Development using Chaotic Maps to Design of a Planar Microstrip Monopole Antenna,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 121–142, 2025, doi: 10.30495/jce.2023.1985366.1202 [in Persian].

[9] S. Rezaee and Y. Zehforoosh, “Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 43, pp. 15–26, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.689028 [in Persian].

[10] S. A. Banihashem, P. Mohammadi, and Y. Zehforoosh, “Magnetic-electric dipole antenna with circular polarization feature and directional pattern with improved bandwidth,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 46, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.1962047.1164 [in Persian].

[11] J. R. James, P. S. Hall, and C. Wood, Microstrip Antenna: Peter Pere- grinus, 1981, ch. 7.

[12] K. Carver and J. Mink, "Microstrip antenna technology," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 29, no. 1, pp. 2-24, January 1981, doi: 10.1109/TAP.1981.1142523.

[13] M. Haneishi and S. Yoshida, “A design method of circularly polarized rectangular microstrip antenna by one-feed point,” *Electron. Commun. Jpn*., vol. 54, pp. 46–54, 1981, doi: 10.1002/ecja.4410640407.

[14] P. Sharma and K. Gupta, "Analysis and optimized design of single feed circularly polarized microstrip antennas," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 6, pp. 949-955, November 1983, doi: 10.1109/TAP.1983.1143162.

JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.30495/jce.2023.1987707.1205

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

Ranking Z-numbers Using the Optimal Clustering Method (CZ-number)

Saeed Jafari[1,2] | Mojtaba Najafi[3*] | Naghi Moadabi Pirkolachahi[4] | Najmeh Cheraghi Shirazi[5]

[1] Deputy of Planning and Engineering, Renewable Energy Office, Bushehr Power Distribution Company, Bushehr, Iran
Saeed.Jafari@iau.ac.ir

[2]Department of Electrical Engineering, Bu. C, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.

[3]Department of Electrical Engineering, Bu. C, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.
mojtaba.najafi@iau.ac.ir

[4]Department of Electrical Engineering, Bu. C, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.
n.moaddabi@rayavin.com

[5]Department of Electrical Engineering, Bu. C, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.
na.cheraghi@iau.ac.ir

Correspondence
Mojtaba Najafi, Associate Professor of Electrical Engineering, Bu. C, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.
mojtaba.najafi@iau.ac.ir

Main Subjects:
Number clustering

Paper History:
Received: 6 June 2023
Revised: 19 August 2023
Accepted: 9 September 2023

Abstract

In recent years, modeling uncertainties through natural language has attracted growing attention, with Z-numbers, introduced by Zadeh in 2011, being a key concept. A Z-number consists of two fuzzy components: the first represents the possibility of an event's occurrence, while the second expresses the probability of that occurrence. A major challenge in applying Z-numbers lies in properly structuring these two components; inappropriate strategies can lead to inaccurate results, especially in group decision-making contexts with large data volumes. To address this, the paper proposes an optimal clustering approach for structuring the components of Z-numbers more systematically and purposefully. This method enhances the accuracy of Z-number modeling by reducing errors in component formation. The effectiveness of the proposed approach is validated through a comparison with conventional fuzzy methods, demonstrating improved performance in handling uncertainty.

Keywords: Probability-possibility, Unsupervised clustering, Z-number, CZ number, Fuzzy.

Highlights

- Using the unsupervised learning method in the optimal selection of expert opinions.
- Effectiveness of the proposed method in choosing the optimal opinions of experts in the conditions of large and complex data sets of expert opinions.
- Determining the optimal points to determine the points that make up the intervals of the Z-number.
- The use of any method or algorithm for unsupervised clustering of points forming the Z-number.

Citation: S. Jafari, M. Najafi, N. Moadabi Pirkolachahi, and N. Cheraghi Shirazi, "Ranking Z-numbers Using the Optimal Clustering Method," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 56–75, 2025, doi:10.30495/jce.2023.1987707.1205 [in Persian].

1. Introduction

In the face of complex uncertainties, selecting an appropriate solution requires access to valid and reliable information. Real-world data is often associated with uncertainty, and each type of data demands a specific approach for analysis. For this purpose, various methods have been developed, including fuzzy set theory, evidence theory, distance measurement, and Z-numbers, all of which are widely applied in decision-making problems.

Among these methods, fuzzy modeling has gained popularity due to its ability to employ natural language. However, its reliance on expert judgment reduces the confidence level in the results. In 2011, Professor Lotfi Zadeh introduced the Z-number concept, which, by combining probability and possibility of occurrence, offers higher accuracy in modeling uncertainties. Nevertheless, the main challenge in this method lies in optimally forming its first and second components.

Previous studies have proposed different solutions to this problem, such as weighting methods, applying evidential reasoning theory, neural networks, defining discrete fuzzy numbers, and ranking expert opinions. However, these approaches are mostly applicable to small datasets and have limited efficiency for large-scale data.

In this research, a novel approach based on unsupervised clustering (K-means algorithm) is proposed to optimally select expert opinions for constructing the initial structure of Z-number components. This approach not only reduces dependency on a specific algorithm but also enables processing of large-scale datasets with linear complexity, while maintaining high interpretability. As a result, the proposed method can serve as an effective solution for improving the modeling of complex uncertainties across various domains.

- **Main Problem**: Analyzing data with complex uncertainties and the need for accurate and reliable methods.
- **Existing Methods**: Fuzzy theory, evidence theory, distance measurement, Z-numbers.
- **Advantage of Z-number**: Simultaneous integration of probability and possibility, higher accuracy than probabilistic methods.
- **Current Challenge**: Optimal determination of the first and second components of the Z-number.
- **Limitations of Previous Studies**: Mostly suitable for small datasets and dependent on specific methods.
- **Proposed Solution**: Using unsupervised clustering (K-means) for optimal selection of expert opinions.
- **Advantages**:
  - Reduced dependency on a specific algorithm
  - Capability to process large datasets
  - Interpretability and visualization of results
- **Application**: Improving uncertainty modeling in decision-making and complex data analysis.

2. Innovations and Contributions

- Using the unsupervised learning method in the optimal selection of expert opinions.
- Effectiveness of the proposed method in choosing the optimal opinions of experts in the conditions of large and complex data sets of expert opinions.
- Determining the optimal points to determine the points that make up the intervals of the Z-number.
- The use of any method or algorithm for unsupervised clustering of points forming the Z-number.

3. Materials and Methods

In many real-world decision-making scenarios, data often exhibit complex uncertainties that challenge the reliability of analytical outcomes. To address such challenges, researchers have developed various theoretical frameworks, among which Z-numbers—introduced by Professor Lotfi Zadeh in 2011—stand out as an effective method for modeling imprecise information. A Z-number consists of two components: (1) the *possibility* of an event, and (2) the *probability* of its occurrence. This dual-component representation enables more precise and realistic modeling compared to conventional probabilistic approaches.

Despite their advantages, Z-numbers face a critical limitation: the accurate construction of their initial possibility and probability components becomes increasingly challenging when working with large-scale and scattered expert datasets. Existing approaches, such as weighted scoring methods, evidential reasoning, and neural network-based weight estimation, often perform well only on small datasets or require strong assumptions about data relationships, which limits their applicability in complex real-world situations.

To overcome these challenges, this study introduces the **CZ-number method**, an enhanced modeling approach that integrates unsupervised clustering with the Z-number framework. Specifically, the K-means clustering algorithm is applied to expert opinions to generate well-defined clusters, from which optimal representative points are selected for both the possibility and probability components. This process ensures higher accuracy in capturing expert knowledge, even in the presence of highly dispersed or large-scale datasets.

The proposed method offers several key advantages:

- **Scalability** – capable of efficiently handling large datasets with linear time complexity.
- **Algorithmic flexibility** – can be implemented using any clustering algorithm that meets the required properties, making it non-dependent on a single technique.
- **Unsupervised learning** – eliminates the need for predefined input-output relationships, enhancing adaptability.
- **Interpretability** – provides clear data visualization and transparent component formation for better decision support.

The remainder of this paper is organized as follows:

- **Section 2** provides a brief review of the K-means clustering algorithm and the fundamentals of Z-numbers.
- **Section 3** presents the proposed CZ-number methodology in detail.
- **Section 4** demonstrates the method's effectiveness through a numerical example.
- **Section 5** concludes the study with final remarks and potential directions for future research.

Through this integration of clustering and Z-number modeling, the proposed approach contributes a robust, scalable, and interpretable solution for addressing complex uncertainty in practical decision-making environments.

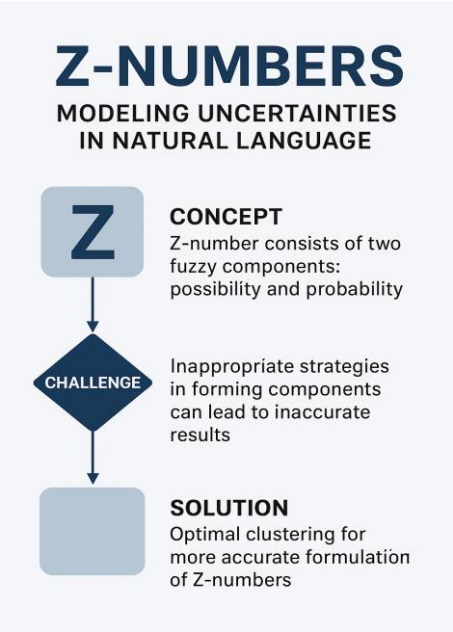


Figure I. The solution process of the proposed model

4. Results and Discussion

The main motivation for selecting PJM market price forecasts is the availability of free, real, and widely used data in the international electricity market. The PJM website provides real-time (hourly) electricity prices, which many market participants utilize to set prices and participate in the day-ahead market. In this study, it is assumed that no local data are available, and the next-hour PJM market prices are predicted using both the conventional Z-number method and the proposed approach.

Figure I shows the problem-solving process of the proposed method. In order to evaluate the obtained results, the results were compared with the results obtained by the Z-score method at 100 points [1]. Additionally, the execution time for each record was measured in MATLAB, considering 4,000 data points for each method on a Windows 7 system with a 5-core processor and 4 GB of RAM. The results indicate that the proposed method provides predictions closer to the actual values for each record. Moreover, the standard deviation of expert opinions in the proposed method is lower than that of the conventional Z-number method, reflecting a more effective utilization of expert knowledge. Although the proposed method requires slightly more computation time due to additional steps, the execution time difference is negligible. Therefore, based on the results, the proposed method produces forecasts that are more accurate and optimized compared to the conventional Z-number approach.

5. Conclusion

In this paper, a novel approach to Z-numbers is proposed, incorporating unsupervised clustering of expert data. In previous studies, a Z-number associated with a variable X is typically represented as a pair of fuzzy numbers

(A, B), where *A*—the first component—is interpreted as a fuzzy restriction, and *B*—the second component—is considered a measure of certainty regarding the first component. From a probabilistic perspective, in our approach, both the first component *A* and the second component *B* are modeled as discrete fuzzy numbers.
The main motivation of this research is to enable straightforward modeling of any type of arithmetic operation using discrete fuzzy numbers, while providing an optimal method for determining fuzzy intervals that best capture both event characteristics and probabilities. The term *optimal* here refers to the preservation of data properties when clustering probability data, ensuring that fuzzy interval formation benefits from an efficient algorithm. In other words, these intervals can be easily managed without requiring any probability distribution to be predefined. The algorithm's outcomes can support experts in final decision-making processes involving discrete fuzzy number variables. As the Z-number framework in this study is augmented with a clustering algorithm, the computational load of the proposed method is compared against the conventional Z-number approach. This comparison was conducted using MATLAB software on a Windows 7 operating system equipped with a 5-core processor and 4 GB of RAM. The results demonstrate that while the proposed method involves additional computational steps and consequently requires marginally more processing time than the standard Z-number method, the difference in execution time remains negligible.

6. Acknowledgement
We would like to thank the esteemed reviewers of the article who guided us in increasing the quality of the article. We also express our appreciation and gratitude to the esteemed editor and the executive staff of the journal.

References

[1] S. Jafari, M. Najafi, N. M. Pirkolachahi, and N. C. Shirazi, "Enhancing energy hub efficiency through advanced modelling and optimization techniques: A case study on micro-refinery output products and parking lot integration," *Heliyon*, vol. 10, no. 18, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36233 .

Declaration of Competing Interest: The Authors do not have a conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Saeed Jafari: Software, methodology, writing original draft preparation; **Mojtaba Najafi, Najmeh Cheraghi Shirazi**: Resources, methodology, manuscript editing; **Naghi Moadabi Pirkolachahi**: Resources, manuscript editing.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.30495/jce.2023.1987707.1205

مقاله پژوهشی

رتبه‌بندی عدد زد با استفاده از روش خوشه‌بندی بهینه (CZ-number)

سعید جعفری[1,2] | مجتبی نجفی*[3] | نقی مؤدبی پیرکلاچاهی[4] | نجمه چراغی شیرازی[5]

[1] معاونت برنامه‌ریزی و مهندسی، دفتر انرژی‌های تجدیدپذیر، شرکت توزیع نیروی برق استان بوشهر، بوشهر، ایران

[2] گروه مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، ایران.
Saeed.Jafari@iau.ac.ir

[3] گروه مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، ایران.
mojtaba.najafi@iau.ac.ir

[4] گروه مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، ایران.
n.moaddabi@rayavin.com

[5] گروه مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، ایران.
na.cheraghi@iau.ac.ir

نویسنده مسئول
*مجتبی نجفی، دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، ایران.
mojtaba.najafi@iau.ac.ir

موضوع اصلی:
خوشه بندی اعداد

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۶ خرداد ۱۴۰۲
تاریخ بازنگری: ۲۸ مرداد ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۴۰۲

چکیده:

استفاده از مفاهیم جدید در مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها توسط کلمات زبان طبیعی، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. مفهوم عدد زد یکی از این مفاهیم است که توسط دکتر زاده در سال ۲۰۱۱ مطرح گردید. هدف از عدد زد مدل‌سازی جملات غیردقیق زبان طبیعی توسط یک جفت اعداد فازی (A,B) است که اولین مؤلفه این عدد نشان‌دهنده امکان رخداد و مؤلفه دوم نشان‌دهنده احتمال رخداد عدد اول است. امروزه یکی از چالش‌های مهم عدد زد در بین محققان، نحوه تشکیل اولیه ساختار مؤلفه اول و مؤلفه دوم است، درصورتی‌که محققان راه‌کارهای نامناسبی در تشکیل این مؤلفه‌ها مورد استفاده قرار دهند، این عامل باعث می‌گردد که نتایج نهایی به‌درستی محاسبه نگردد. این ضعف در تصمیم‌گیری‌های گروهی با حجم اطلاعات بالا بیشتر نمایان می‌گردد. به‌منظور رفع این مشکل، نویسندگان این مقاله، خوشه‌بندی بهینه دیتاهای جمع‌آوری شده را پیشنهاد می‌نمایند. راهکار پیشنهادی باعث می‌گردد که مؤلفه‌های اول و دوم عدد زد به شکل هدفمند تشکیل گردد. به‌منظور صحت سنجی روش پیشنهادی، نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با روش فازی مقایسه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: امکانی-احتمالاتی، خوشه‌بندی بدون نظارت، عدد زد، عددCZ، فازی.

تازه‌های تحقیق:

- استفاده از روش یادگیری بدون نظارت در انتخاب بهینه از نظرات متخصص.
- اثربخشی روش پیشنهادی در انتخاب نظرات بهینه متخصصان در شرایط مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده نظرات متخصص.
- تعیین نقاط بهینه به‌منظور تعیین نقاطی که فواصل Z را تشکیل می‌دهد.
- استفاده از هر روش یا الگوریتم برای خوشه‌بندی بدون نظارت از نقاط تشکیل‌دهنده عدد زد.

۱- مقدمه

در شرایط عدم قطعیت‌های پیچیده، محققین نیازمند اطلاعات کافی و انتخاب راه‌حلی مناسب هستند. اطلاعات اولیه باید به نحوی در نظر گرفته شود که دارای اعتبار و قابل اعتماد برای محققین باشد. در دنیای واقعی، بسیاری از داده‌ها، دارای عدم قطعیت‌های پیچیده هستند که هر کدام با توجه به نوع دیتاهای در دسترس، دارای راه‌حل‌های منحصر به فرد هستند. به‌منظور بررسی اطلاعات نامطمئن، محققان نظریه‌ها و روش‌های مختلفی مانند نظریه مجموعه‌های فازی [۱]، نظریه شواهد [۲،۳]، اندازه‌گیری فواصل [۴] و عدد زد [۵] ارائه نموده‌اند. روش‌های ذکر شده یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مسائل تصمیم‌گیری عملی هستند [۶-۱۳]. امروزه در بین محققان یکی از راه‌حل‌های پر کاربرد در حل عدم قطعیت‌های پیچیده، مدل‌سازی توسط زبان طبیعی (روش فازی) است. اما نکته بسیار مهم در نظریه فازی، محاسبه پارامترهای فازی توسط دانش خبرگان است و این مهم باعث می‌گردد میزان اطمینان به نظر کارشناسان کاهش یابد. در سال ۲۰۱۱، پروفسور لطفی‌زاده مفهوم جدیدی به نام عدد زد جهت مدل‌سازی متغیرهای نامشخص معرفی نمود [۱۴]. این مفهوم نسبت به روش‌های احتمالاتی دارای دقت بهتری است. در این روش (عدد زد) با در نظر گرفتن امکان رخداد و احتمال رخداد به‌صورت هم‌زمان، راه‌حلی بسیار مؤثر به‌منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در شرایط اطلاعات نامطمئن است. از زمان معرفی، این مفهوم به‌طور گسترده در بین محققان جهت محاسبات عدم قطعیت‌های پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵]. اما امروزه یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در عدد زد، نحوه تشکیل ساختار اولیه مؤلفه اول و مؤلفه دوم است. در مطالعات گذشته راه‌حل‌های مختلفی به‌منظور حل این چالش ارائه گردیده است به‌عنوان مثال، روش‌های امتیازدهی وزنی اطلاعات با در نظر گرفتن بهترین و بدترین حالت و وزن‌دهی به آن‌ها [۱۶]، تعیین درجه مؤلفه‌های اول و دوم بر اساس نظریه استدلال اثباتی [۱۷]، استفاده از روش وزن دهی با استفاده از تعیین ضرایب معادلات بازه فازی کلاسیک توسط شبکه عصبی [۱۸]، تعریف متغیر مختلف با هدف تعیین اعداد فازی گسسته در تشکیل بازه‌های عدد زد [۱۹]، ارزش‌گذاری و رتبه‌بندی نظرات کارشناسان [۲۰] ، استفاده از مدل فازی[1] [۲۱] به‌منظور تقسیم‌بندی ناحیه عدد زد و استفاده از روش چگالی هسته اقدام به‌منظور تشکیل فواصل مؤلفه‌های اول و دوم پیشنهاد گردیده است [۲۲]. تاکنون راه‌حل‌های ارائه شده در انتخاب نقاط تشکیل‌دهنده مؤلفه‌ها فقط در حالت دیتاهای کوچک عملی بوده است [۱۹]، در [۲۰] با نظرسنجی از کارشناسان اقدام به رتبه‌بندی بازه‌های عدد زد نموده است، در [۲۱] با در نظرگیری چندین کنترل‌کننده داخلی که هریک از آن‌ها در یک ناحیه خاص از فضای ورودی کنترل‌کننده معتبر است، مقادیر عددی از درون‌یابی کنترل‌کننده‌های خطی به دست می‌آید که این مورد عاملی می‌گردد که نقاط به‌دست‌آمده به‌صورت کاملاً بهینه انتخاب نگردند. در این مقاله، یک نظریه جدید برای بهبود حل این مشکلات ارائه گردیده است. در تئوری پیشنهادی، مجموعه‌ای از نظرات کارشناسان برای تشکیل مؤلفه‌های اول و دوم عدد زد جمع‌آوری شده و سپس با انتخاب بهینه نظرات، مؤلفه‌های اول و دوم عدد زد شکل می‌گیرند. محققان با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر تکرار بدون نظارت تلاش می‌نمایند مجموعه داده‌های به‌دست‌آمده (نظرات کارشناسان) را بدون همپوشانی به زیرگروه‌های مجزا تقسیم نموده، سپس یک نقطه از هر گروه را به‌عنوان نقطه بهینه (مشابه‌ترین ویژگی در مقایسه با تمام نقاط همان گروه) تعیین می‌نمایند. مزیت دیگر نظریه ارائه شده، یادگیری بدون نظارت در انتخاب بهینه نظرات خبرگان است و در فرآیند حل تابع هدف به‌منظور خوشه‌بندی، برخلاف نظریه شبکه عصبی و سایر نظریه‌های مشابه، نیازی به وجود رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی نیست. مزیت دیگر نظریه ارائه شده نسبت به تحقیقات قبلی این است که اگر مجموع نظرات کارشناسان از نوع داده‌های بزرگ با پیچیدگی زمانی خطی باشد، انتخاب بهینه نقاط تشکیل‌دهنده مؤلفه اول و مؤلفه دوم به‌راحتی در این نوع مجموعه‌ها قابل حل است. ویژگی‌های نهایی نظریه پیشنهادی می‌تواند کمی‌سازی انتخابی تعداد خوشه‌ها برای تشکیل فواصل مؤلفه‌های اول و دوم مطابق با اهداف تحقیق و تفسیرپذیری و تصویرسازی داده‌های انتخاب‌شده به‌منظور تشکیل مؤلفه‌های اول و دوم باشد. ویژگی روش پیشنهادی این است که از هر الگوریتمی که دارای این ویژگی باشد می‌توان مورد استفاده قرار گیرد، این مزیت مهمی است که محققین به الگوریتم خاصی وابسته نیستند. محققین این مقاله به‌منظور بررسی اثربخشی این راه‌کار یکی از الگوریتم‌های خوشه‌بندی بدون نظارت که دارای کاربرد زیادی در بین محققان است (K-means) انتخاب نموده‌اند.

[1] تاکاگی-سوگنو

در ادامه ساختار مقاله بدین شرح است : در بخش ۲، مروری بر عملکرد الگوریتم خوشه‌بندی بدون نظارت (K-means) عدد زد، در بخش ۳، روش عددCZ[1]، در بخش ۴، مثال عددی و در پایان در بخش ۵، نتیجه‌گیری ارائه گردیده است.

۲- مروری بر عملکرد الگوریتم خوشه‌بندی بدون نظارت و عدد زد

۲-۱- الگوریتم خوشه‌بندی K-means

الگوریتم خوشه‌بندی K-means یکی از روش‌های پرکاربرد خوشه‌بندی اطلاعات است، که توسط مک کوئین در سال ۱۹۶۷ پیشنهاد گردید [۲۳]. امروزه از این روش به‌عنوان یک الگوریتم خوشه‌بندی کلاسیک در پژوهش‌های علمی و کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این الگوریتم یافتن و گروه‌بندی نقاط داده در کلاس‌های مشابه است. این شباهت به‌عنوان نقطه مقابل فاصله بین داده‌ها شناخته می‌شود در واقع هر چه نقاط داده نزدیک‌تر هستند، احتمال تعلق آن‌ها به یک خوشه بیشتر است. ایده اصلی این الگوریتم، n داده را به تعداد خوشه‌های تعریف شده تقسیم‌بندی می‌نماید، به‌نحوی‌که مجموع مربعات نقاط داده در هر خوشه، به مرکز خوشه کمترین است [۲۴]. الگوریتم خوشه‌بندی K-means، مرکز k را محاسبه نموده و هر نقطه داده را دقیقاً به یک خوشه با هدف به حداقل رساندن واریانس درون خوشه اختصاص می‌دهد. هدف اصلی این الگوریتم که به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی بیان می‌شود در معادله ۱ بیان گردیده است [۲۵]، مراحل پروسه حل الگوریتم خوشه‌بندی K-means به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۵].

$$P_{KM}^{*} = \arg\min V(P), V(P) = \sum_{l=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_{pl}} d_{P_l, X_i}^{2} \quad (۱)$$

که در آن n_{Pl} تعداد کل داده‌های اختصاص داده شده به خوشه P_l است. با توجه به معادله ۱ مراحل الگوریتم خوشه‌بندی K-means از مرحله ۱ تا ۶ تعریف می‌گردد ،

مرحله اول: شاخص تکرار $\eta = 1$ و تعداد k خوشه‌ها را مقداردهی اولیه گردد [۲۵]

مرحله دوم: مقداردهی اولیه مرکز$P^{(1)}$ انجام گردد [۲۵]:

$$P^{(1)} = [P_1^{T(1)} P_2^{T(1)} P_3^{T(1)} P_K^{T(1)}]^T \in \Re^{dk} \quad (۲)$$

که در این معادله $P^{(1)}$ مقدار اولیه مرکز خوشه و T مخفف ماتریسی است که تمام رکوردهای مجموعه داده در آن وجود دارد و d بعد بردار و k خوشه تعریف می‌گردد.

مرحله سوم: فواصل d_{pl,x_i} برای هریک از ترکیب‌های $x_{i,i}=1....n$ (رکوردهای ورودی) و $P_{l,l=1,...,k}$ (مرکز خوشه) مطابق معادله ۳ محاسبه گردد [۲۵].

$$d_{P_l, x_i} = \| x_i - p_1 \| = \sqrt{(x_{1_i} - p_{1_l})^2 + (x_{2_i} - p_{2_l})^2 + ... + (x_{d_i} - p_{d_l})^2} \quad (۳)$$

مرحله چهارم: اختصاص یک رکورد بر اساس فاصله محاسبه شده در معادله سوم به یک خوشه k [۲۵]:

$$P_1^{(\eta)} = \left\{ x_m^{(\eta)} \mid d_{x_m, P_1} \le d_{x_m, Pi}, \forall i = 1...k \right\} \quad (۴)$$

مرحله پنجم: مرکزهای جدید به‌دست‌آمده در تکرارهای بعدی بر حسب معادله ۵ محاسبه می‌گردد [۲۵].

$$P_1^{(\eta+1)} = \frac{1}{n_{c_j}^{(\eta 0}} \sum_{x_i \in C_j^{(\eta)}} X_i, j = 1...k \quad (۵)$$

هنگامی‌که رکوردهای مجموعه داده به همه k خوشه اختصاص داده شد، تعداد کل$n_{pl}^{(\eta)}$ رکوردهای اختصاص داده شده به خوشه‌های $P_l^{(\eta)}$ به‌عنوان اصلی مجموعه‌های $P_l^{(\eta)}$ محاسبه می‌شود [۲۵].

$$n_{P_l}^{(\eta)} = | P_l^{(\eta)} |, l = 1...k \quad (۶)$$

[1] Clustering Z-Number

مرحله ششم: بررسی شود که آیا الگوریتم خوشه‌بندی K-means راه‌حل بهینه را پیدا کرده است. در اولین معیار توقف بررسی گردد که همه بردارهای مرکز در یک آستانه پس از دو تکرار کمتر از ε تعریف شده است. این اولین معیار توقف به‌عنوان نابرابری مرکزها بیان می‌شود، معادله ۷، [۲۵].

$$| P_1^{(\eta+1)} - P_1^{(\eta)} | < \varepsilon \qquad (۷)$$

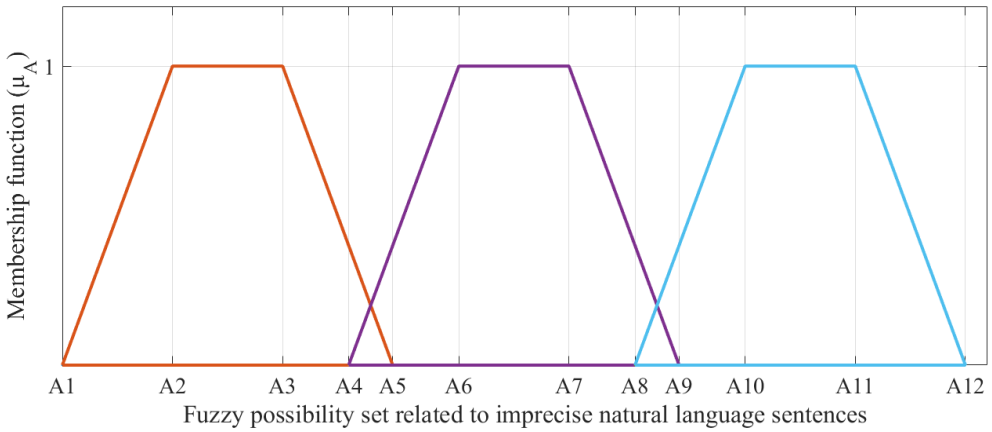
اگر شرط ۷ برآورده شود، به این معنی است که الگوریتم کامل است و معادله ۱ آخرین $P^{(\eta+1)}$ است که تاکنون به‌دست‌آمده است و اگر شرط ۷ برآورده نشود، می‌بایست معیار دوم توقف بررسی گردد، که از معادله ۸ استفاده می‌گردد ، این معادله نشان می‌دهد که الگوریتم به حداکثر تعداد تکرار خود رسیده است [۲۵].

$$\eta = \eta_{\max} \qquad (۸)$$

۲-۲-عدد زد

تعریف ۱. تولید مجموعه‌های عدد زد

امروزه عدد زد یک از روش‌های مؤثر در مدل‌سازی عدم قطعیت جملات نادقیق زبان طبیعی است، در اولین مرحله، مجموعه‌های مؤلفه اول، توسط خبرگان تعیین می‌گردد. خبرگان، متغیر مؤلفه اول (امکان رخداد) را در سه مجموعه تحت عناوین کم، متوسط و زیاد تعریف می‌نمایند. شکل ۱ تابع عضویت این مجموعه‌ها را نمایش داده شده است. معادله ۹ محدوده این مجموعه‌ها را تعیین می‌نماید. [۱۴]:



شکل ۱: مجموعه امکان اعداد Z

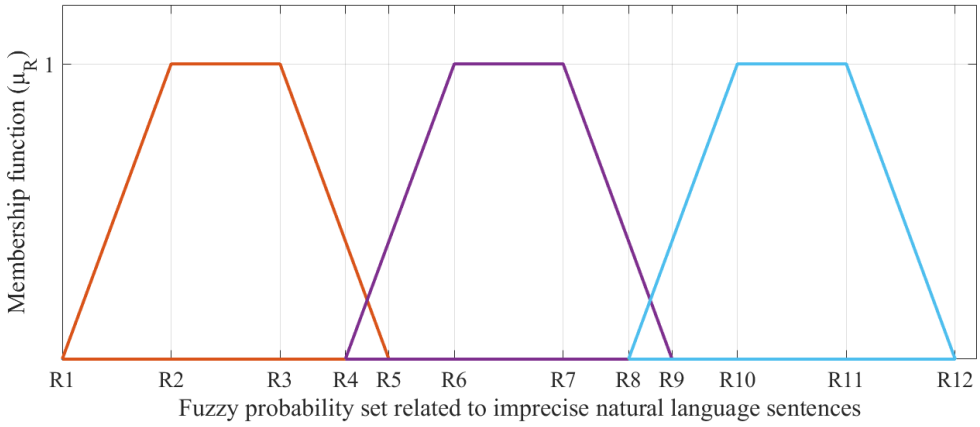
Figure 1. Possible set of Z-Numbered

$$\tilde{A}_{Poss} = \begin{cases} \tilde{A}_{Poss\_1} = A_1, A_2, A_3, A_5 & Low \quad A_1 \le A_2 \le A_3 \le A_5 \\ \tilde{A}_{Poss\_2} = A_4, A_6, A_7, A_9 & Medium \quad A_4 \le A_6 \le A_7 \le A_9 \\ \tilde{A}_{Poss\_3} = A_8, A_{10}, A_{11}, A_{12} & High \quad A_8 \le A_{10} \le A_{11} \le A_{12} \end{cases} \qquad (۹)$$

مجموعه‌های مربوط به مؤلفه دوم (احتمال رخداد) روش عدد زد، به‌صورت تجربی توسط معادله ۱۰ تعریف می‌گردند. شکل ۲ تابع عضویت این مجموعه با در نظرگیری سه مجموعه کاملاً قطعی، تقریباً ممکن و نامشخص را نمایش می‌دهد [۱۴].

(۱۰)

$$\tilde{R}_{Prob}=\begin{cases}\tilde{A}_{Prob\_1}= R_1,R_2,R_3,R_5 & Notsure \quad R_1\le R_2\le R_3\le R_5\\ \tilde{A}_{Prob\_2}= R_4,R_6,R_7,R_9 & Almostcertainly \quad R_4\le R_6\le R_7\le R_9\\ \tilde{A}_{Prob\_3}= R_8,R_{10},R_{11},R_{12} & Quitesure \quad R_8\le R_{10}\le R_{11}\le R_{12}\end{cases}$$



شکل ۲: مجموعه رخداد عدد زد

Figure 2. Z-Numbered event set

پس از تعیین مجموعه‌های مؤلفه‌های اول و مؤلفه‌های دوم، معادلات احتمال وقوع حالت مجموعه‌ها، توسط معادله ۱۱ و جدول ۱ محاسبه می‌گردد [۱۴].

$$\tilde{p}^{Z}_{N_i}=(\tilde{A}_{Poss_i},\tilde{R}_{Prob_i}) \qquad (۱۱)$$

جدول ۱: محدوده در نظر گرفته شده عدد زد

Table 1. Range of the considered Z-number

status	Event status	The occurrence modes of the number Z	
Low	Unknown	(Unknown, low)	$\tilde{P}^{Z}_{N_1}=(\tilde{A}_{Poss_1},\tilde{R}_{Prob_1})$
	Almost certain	(Almost certain, low)	$\tilde{P}^{Z}_{N_2}=(\tilde{A}_{Poss_1},\tilde{R}_{Prob_2})$
	Absolutely certain	(Absolutely certain, low)	$\tilde{P}^{Z}_{N_3}=(\tilde{A}_{Poss_1},\tilde{R}_{Prob_3})$
Medium	Unknown	(Unknown, average)	$\tilde{P}^{Z}_{N_4}=(\tilde{A}_{Poss_2},\tilde{R}_{Prob_1})$
	Almost certain	(Almost certain, average)	$\tilde{P}^{Z}_{N_5}=(\tilde{A}_{Poss_2},\tilde{R}_{Prob_2})$
	Absolutely certain	(Absolutely certain, moderate)	$\tilde{P}^{Z}_{N_6}=(\tilde{A}_{Poss_3},\tilde{R}_{Prob_3})$
High	Unknown	(Unknown, High)	$\tilde{P}^{Z}_{N_7}=(\tilde{A}_{Poss_3},\tilde{R}_{Prob_1})$
	Almost certain	(Almost certain, High)	$\tilde{P}^{Z}_{N_8}=(\tilde{A}_{Poss_3},\tilde{R}_{Prob_2})$
	Absolutely certain	(Absolutely certain, High)	$\tilde{P}^{Z}_{N_9}=(\tilde{A}_{Poss_3},\tilde{R}_{Prob_3})$

تعریف ۲.تبدیل نتایج خروجی مجموعه عدد زد به مجموعه فازی نامنظم با استفاده از روش برش آلفا

پس از تعیین مجموعه‌های عدد زد ، نتایج خروجی این مجموعه توسط رابطه ۱۲ محاسبه می‌گردد، با توجه به این‌که $(\tilde{A}_i,\tilde{B}_i)$ خروجی عدد زد است، می‌بایست به مجموعه فازی نامنظم تبدیل گردد که در این مطالعه روش برش آلفا مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]،

$$(\tilde{A}_i,\tilde{B}_i) \qquad (۱۲\text{-الف})$$

$$\tilde{P}^{Z}_{N_i}=(\tilde{A}_{Poss_1},\tilde{R}_{Prob_1})=(\tilde{P}^{Z}_{N_1}+\tilde{P}^{Z}_{N_2}+\tilde{P}^{Z}_{N_3}+\tilde{P}^{Z}_{N_4}+\tilde{P}^{Z}_{N_5}+\tilde{P}^{Z}_{N_6}+\tilde{P}^{Z}_{N_7}+\tilde{P}^{Z}_{N_8}+\tilde{P}^{Z}_{N_9}) \qquad (۱۲\text{-ب})$$
$$-(\cap(R_4,R_5),\cap(A_4,A_5))-(\cap(R_8,R_9),\cap(A_8,A_9))$$

$$\tilde{A}_i=A_i^{\alpha} \qquad (۱۳)$$

در روش برش آلفا، متغیر فازی رابطه ۱۴-الف به‌عنوان یک تابع فازی چند متغیره با ورودی رابطه ۱۴-ب به‌صورت تابع رابطه ۱۴-ج بیان می‌شود. برش آلفا برای متغیر فازی ۱۴-د با تابع عضویت μ_{Ai} (مؤلفه اولA_i) به‌صورت ۱۴-ه تعریف می‌گردد [۱۴]،

$$\tilde{Y} \qquad (۱۴\text{-الف})$$

$$[\tilde{X}_1,...,\tilde{X}_n] \qquad (۱۴\text{-ب})$$

$$Y=F(\tilde{X}_1,...,\tilde{X}_n) \qquad (۱۴\text{-ج})$$

$$\tilde{X}_i \qquad (۱۴\text{-د})$$

$$A_i^{\alpha}=\left\{x \,\middle|\, \mu_{A_i}\geq\alpha \quad 0\leq\alpha\leq 1\right\} \qquad (۱۴\text{-ه})$$

برش‌های آلفا متغیر ورودی (مؤلفه اول) مطابق معادله ۱۵ به دست می‌آیند [۱۴]:

$$q^{\alpha}=\left[\underline{q}^{\alpha}\triangleq Min(f(A_i^{\alpha})),\bar{q}^{\alpha}\triangleq Max(f(A_i^{\alpha}))\right] \qquad (۱۵)$$

در نهایت با استفاده از معادله ۱۶، با جمع برش‌های آلفای تابع عضویت، متغیر خروجی محاسبه می‌شود [۱۴].

$$A_i^{\alpha}=\bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1}q^{\alpha},\alpha=\{0,\Delta\alpha,2\Delta\alpha,...,1\} \qquad (۱۶)$$

پس از تبدیل مجموعه عدد زد به مجموعه فازی نامنظم توسط روش برش آلفا، می‌بایست مجموعه فازی به‌دست‌آمده فازی زدایی[1] گردند، متداول‌ترین روش دیفازی سازی (فازی زدایی) مورد استفاده، روش مرکز ثقل[2] است که یک مقدار قطعی را بر اساس مرکز ثقل مجموعه فازی ارائه می‌نماید. این یک روش میانگین وزنی است که در آن از تابع عضویت برای وزن‌دهی استفاده می‌گردد. بر اساس این روش، رابطه ۱۷-الف برای تبدیل یک عدد فازی به عدد قطعی فرموله شده است [۱۴]:

$$\lambda=\frac{\int_{-\infty}^{+\infty}(\tilde{R}_{Prob},\mu_{\tilde{R}^t}(\tilde{R}_{Prob}))d\,\tilde{R}_{Prob}}{\int_{-\infty}^{+\infty}(\mu_{\tilde{R}^t}(\tilde{R}_{Prob}))d\,\tilde{R}_{Prob}} \qquad (۱۷)$$

مقادیر محاسبه شده در رابطه ۱۷ که ضرایب وزن نامیده می‌شوند و با نماد λ نشان داده می‌شوند.این نماد در رابطه ۱۸ در تابع عضویت مؤلفه اول μ_{Ai} ضرب می‌گردد. در نتیجه، نتایج خروجی به‌صورت یک متغیر فازی نامنظم تبدیل می‌گردند. تصویر ۳ نتایج خروجی متغیر فازی نامنظم به‌دست‌آمده را نمایش می‌دهد [۱۴]:

---

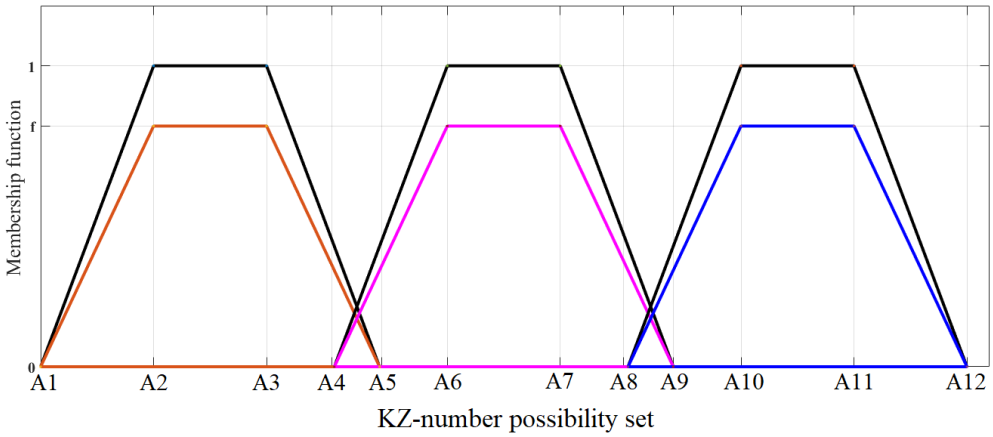
[1] De-fuzzification

[2] Centroid-of-Gravity

$$f=(\lambda,\mu_{Ai}) \tag{۱۸}$$

تعریف ۳. تنظیم تابع عضویت

نتایج به‌دست‌آمده در رابطه ۱۸ دارای متغیر فازی نامنظم می‌باشد که می‌بایست به متغیر فازی منظم تبدیل گردند، به‌منظور این تبدیل رابطه ۱۹ استفاده گردیده است [۱۴]:



شکل ۳: مجموعه فازی نامنظم

Figure 3. Irregular fuzzy set

$$\mu_{p_{N_i}}(p)=f\left(\frac{\tilde{P}_N^{\,Z}}{\sqrt{\lambda}}\right) \tag{۱۹}$$

در پایان مجموعه منظم به‌دست‌آمده مؤلفه اول که به رابطه ۱۲ منتقل می‌گردد، که رابطه جدید آن در ۲۱ ارائه گردیده است در شکل ۴ مؤلفه‌های منظم شده فازی را نمایش می‌دهد [۱۴]:

$$A_i^{+}=\sqrt{\lambda}.A_i \tag{۲۰}$$

$$\tilde{P}_{N_i}^{\,Z}=(\tilde{A}_{Poss_1}^{\,+},\tilde{R}_{Prob_1})=(\tilde{P}_{N_1}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_2}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_3}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_4}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_5}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_6}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_7}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_8}^{\,Z}+\tilde{P}_{N_9}^{\,Z}) \tag{۲۱}$$
$$-(\cap(R_4,R_5),\cap(A_4,A_5))-(\cap(R_8,R_9),\cap(A_8,A_9))$$

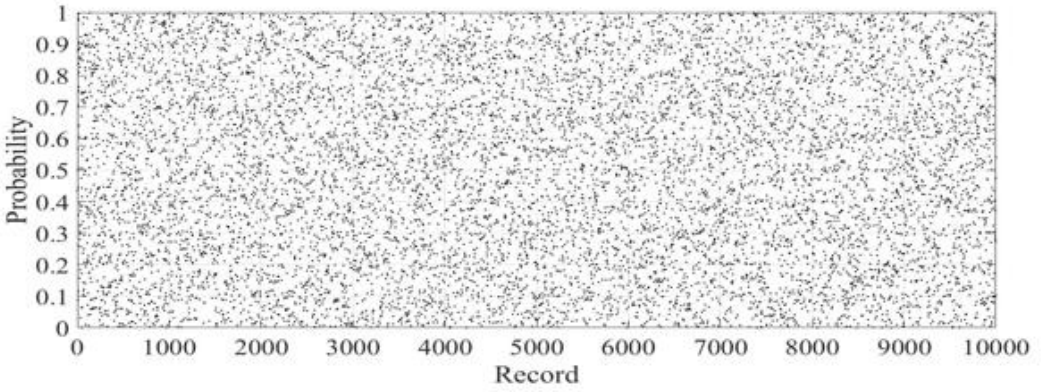
پس از محاسبه نتایج پایانی مجموعه جملات نادقیق زبان طبیعی از مجموعه عدد زد ، می‌بایست نتایج خروجی در احتمال رخ داد که از دیتاهای منطقه مشابه مورد مطالعه استخراج گردیده ضرب گردد.

۳- روش عدد CZ

در این مطالعه یک روش جدید به‌منظور بهبود تشکیل ساختار اولیه عدد زد ارائه گردیده است. در این روش با استفاده از خوشه‌بندی بدون نظارت نظر خبرگان (در این مقاله روش K-means در نظر گرفته شده است)، در تشکیل ساختار اولیه مؤلفه اول و مؤلفه دوم عدد زد لحاظ می‌گردد. روش پیشنهادی باعث می‌گردد، درصورتی‌که خبرگان فازی با پراکندگی دیتاهای بی‌شمار روبرو شوند، ساختار ابتدایی مؤلفه اول و مؤلفه دوم روش عدد زد با دقت مناسبی تشکیل گردد .

۳-۱- معادله CZ-number

در این روش ابتدا نظرات کارشناسان جمع‌آوری می‌گردد. تصویر ۴ نمونه‌ای از این دیتاهای جمع‌آوری شده از نظرات کارشناسان نمایش داده شده است.



شکل ۴: مجموعه نظرات خبرگان در خصوص احتمال رخداد یک مسئله دارای عدم قطعیت

Figure 4. The set of expert opinions regarding the probability of an uncertain issue

در روش پیشنهادی می‌بایست دیتاهای جمع‌آوری شده نظرات کارشناسان خوشه‌بندی گردد. در این مقاله به‌منظور برای محاسبه این خوشه‌بندی، مراحل اول تا ششم پیشنهاد گردیده است.

$$P_{CZ}^{i} = PZ^{i} = \text{argmin}V(P), V(P) = \sum_{l=1}^{K} \sum_{\substack{i=1 \\ x_i \in p_l}}^{n_{pl}} d_{P_l, X_i}^{2} \qquad (۲۲)$$

در این معادله x_i مجموعه داده تعریف شده در یک خوشه با هدف اختصاص دادن هر نقطه فقط به یک خوشه، n_{Pl} تعداد کل رکوردهای اختصاص داده شده به خوشه P_l و K تعداد کل خوشه‌ها است که می‌بایست مقداردهی اولیه گردد.

مرحله دوم: مقداردهی اولیه مرکز $P_{CZ}^{(1)}$ انجام گردد.

$$P_{CZ}^{(1)} = \left[P_{CZ\_1}^{T(1)} * P_{CZ\_2}^{T(1)} * P_{CZ\_3}^{T(1)} * P_{CZ\_n}^{T(1)} \right]^{T} \in R^{dk} \qquad (۲۳)$$

که در این معادله $P_{CZ\_1}^{(l)}$ مقدار اولیه مرکز خوشه دیتاهای ورودی عدد زد و T مخفف ماتریسی است که تمام رکوردهای مجموعه داده در آن وجود دارد و d بعد بردار و n خوشه تعریف می‌گردد.

مرحله سوم: فواصل $d_{pl}.x_i$ برای هریک از ترکیب‌های $X_i,i=1,\ldots,j$ (رکوردهای ورودی) و $P_{CZ\_l}=l\ldots n$(مرکز خوشه) مطابق معادله ۲ محاسبه گردد.

$$d_{p_{CZ\_1}, x_i} = \left\| x_i - P_{CZ\_1} \right\| = \sqrt{(x_{l_i} - P_{l_{CZ\_1}})^2 + (x_{2_i} - P_{2_{CZ\_1}})^2 + \ldots + (x_{d_i} - P_{d_{CZ\_1}})^2} \qquad (۲۴)$$

مرحله چهارم: اختصاص یک رکورد بر اساس فاصله محاسبه شده در معادله سوم به یک خوشه k .

$$P_{CZ\_1}^{(\eta)} = \left\{ x_m^{(\eta)} \middle| d_{x_m, p_{CZ\_1}} \le d_{x_m, p_{CZ\_i}}, \forall i = 1 \ldots k \right\} \qquad (۲۵)$$

مرحله پنجم: مرکزهای جدید به‌دست‌آمده در تکرارهای بعدی بر حسب معادله ۵ محاسب می‌گردد.

$$P_{CZ\_1}^{(\eta+1)} = \frac{1}{n_{p_l}^{(\eta)}} \sum_{x_i \in p_l^{(\eta)}} X_i, l = 1 \ldots k \qquad (۲۶)$$

هنگامی تمامی رکوردهای مجموعه داده به همه k خوشه اختصاص گردید، تعداد کل $nP_{cz\_1}^{(\eta)}$ رکوردهای اختصاص داده شده به خوشه‌های $P_{cz\_1}^{(\eta)}$ به‌عنوان اصلی مجموعه‌های $P_{cz\_1}^{(\eta)}$ محاسبه می‌گردد.

$$n_{P_{CZ\_1}^{(\eta)}} = \left| P_{CZ\_1}^{(\eta)} \right|, l = 1 \ldots k \qquad (۲۷)$$

مرحله ششم:

بررسی شود که آیا الگوریتم K-means راه‌حل بهینه را پیدا کرده است. در اولین معیار توقف بررسی گردد که همه بردارهای مرکز در یک آستانه پس از دو تکرار کمتر از ε تعریف شده است. این اولین معیار توقف به‌عنوان نابرابری مرکزها بیان می‌گردد، معادله ۷.

$$\left|p_{CZ\_1}^{(\eta+1)} - p_{CZ\_1}^{(\eta)}\right| < \varepsilon \qquad (۲۸)$$

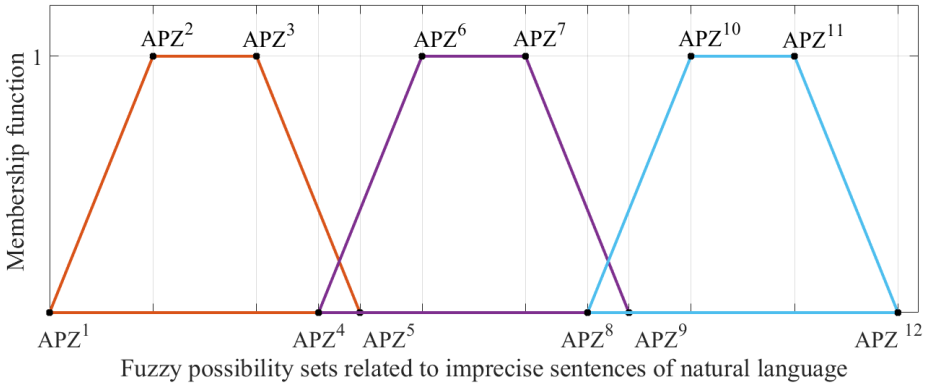
اگر شرط ۷ برآورده شود، به این معنی است که الگوریتم کامل است و معادله ۱ آخری $P_{cz\_1}^{(\eta+1)}$ است که تاکنون به‌دست‌آمده است و اگر شرط ۷ برآورده نشود، می‌بایست معیار دوم توقف بررسی گردد، که از معادله ۸ استفاده می‌گردد که این معادله نشان می‌دهد که الگوریتم به حداکثر تعداد تکرار خود رسیده است .

$$\eta = \eta_{max} \qquad (۲۹)$$

مرحله هفتم تشکیل مجموعه عدد CZ:

رابطه ۳۰ مجموعه امکانی عدد CZ را تشکیل می‌دهد .

$$\tilde{A}_{Pass} = \begin{cases} \tilde{A}_{Pass\_1} = & APZ^1, APZ^2, APZ^3, APZ^5 \quad Low \quad APZ^1 \le APZ^2 \le APZ^3 \le APZ^5 \\ \tilde{A}_{Pass\_2} = & APZ^4, APZ^6, APZ^7, APZ^9 \quad Medium \quad APZ^4 \le APZ^6 \le APZ^7 \le APZ^9 \\ \tilde{A}_{Pass\_3} = & APZ^8, APZ^{10}, APZ^{11}, APZ^{12} \quad High \quad APZ^8 \le APZ^{10} \le APZ^{11} \le APZ^{12} \end{cases} \qquad (۳۰)$$

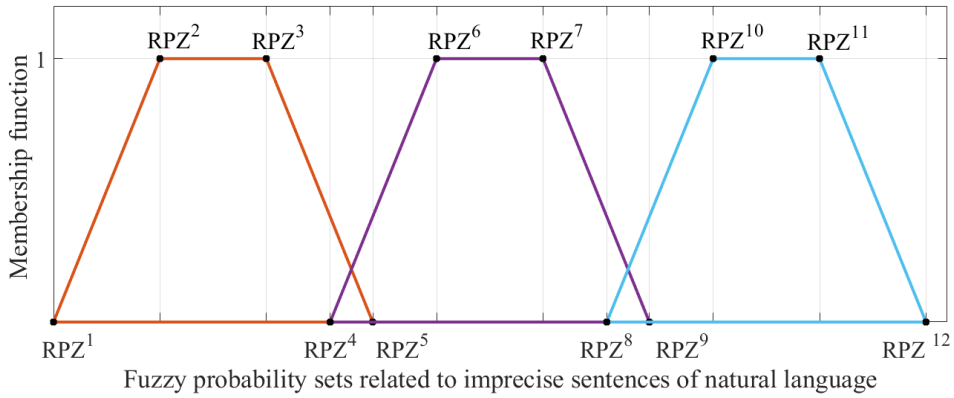


شکل ۵: مجموعه نهایی مؤلفه‌ی اول عدد CZ

Figure 5. The final set of the first component of the CZ-number

رابطه ۳۱ مجموعه احتمالی عدد CZ را تشکیل می‌دهد:

$$\tilde{R}_{Prob} = \begin{cases} \tilde{R}_{Prob\_1} = & RPZ^1, RPZ^2, RPZ^3, RPZ^5 \quad Low \quad RPZ^1 \le RPZ^2 \le RPZ^3 \le RPZ^5 \\ \tilde{R}_{Prob\_2} = & RPZ^4, RPZ^6, RPZ^7, RPZ^9 \quad Medium \quad RPZ^4 \le RPZ^6 \le RPZ^7 \le RPZ^9 \\ \tilde{R}_{Prob\_3} = & RPZ^8, RPZ^{10}, RPZ^{11}, RPZ^{12} \quad High \quad RPZ^8 \le RPZ^{10} \le RPZ^{11} \le RPZ^{12} \end{cases} \qquad (۳۱)$$



شکل ۶: مجموعه نهایی مؤلفه‌ی دوم عدد CZ

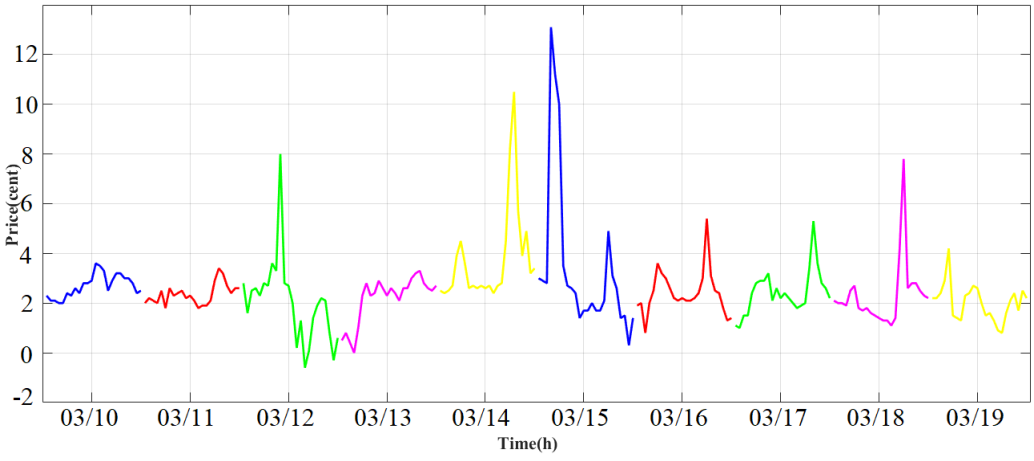
Figure 6. The final set of the second component of the CZ-number

۴- مثال عددی

در این بخش، یک مثال عددی برای نشان دادن اثربخشی عدد CZ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بازار PJM [۲۶] در ساعت پیش رو توسط عدد CZ و عدد زد محاسبه می‌گردد و سپس نتایج به‌دست‌آمده با قیمت واقعی رخ داده مقایسه می‌گردد و در پایان نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردد. تصویر ۷ قیمت ساعتی انرژی الکتریکی به‌دست‌آمده [۲۶] با در نظر گرفتن دوره ۱۰ روز نشان داده شده است.

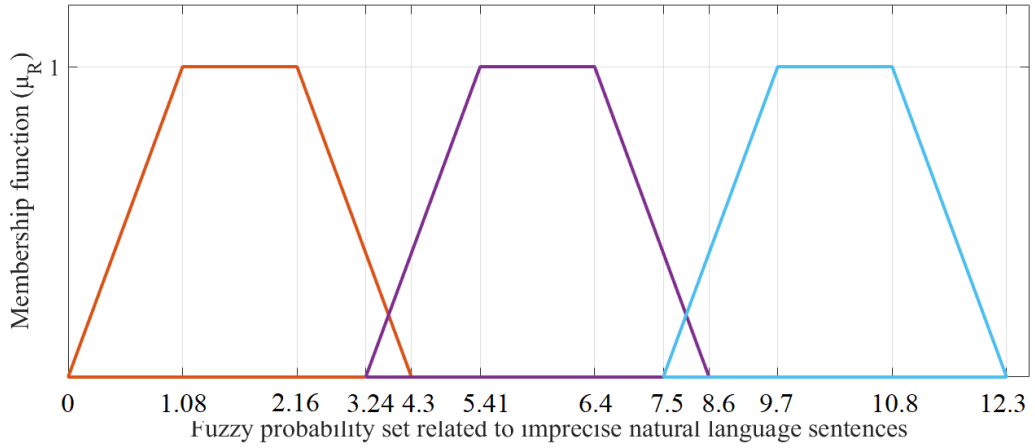
۴-۱-محاسبه عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی در ساعت پیش رو توسط عدد زد

با توجه به اینکه در زمان محاسبه عدم قطعیت توسط عدد زد، خبرگان هیچ گونه اطلاعات محلی در دسترس ندارند، لذا می‌بایست از اطلاعات محلی مناطق مشابه استفاده نمایند، بدین منظور در ابتدا با استفاده از اطلاعات در دسترس قیمت بازار PJM در [۲۶] اقدام به تشکیل بازه‌های مؤلفه‌های اول و مؤلفه‌های دوم می‌نمایند. تصاویر ۱۱ و۱۲ بازه‌های در نظر گرفته شده مؤلفه‌ی اول و مؤلفه‌ی دوم عدد زد نمایش داده شده است. به‌منظور تشکیل این بازه‌ها خبرگان کمترین و بیشترین مقدار قیمت رخ داده از بازار PJM را استخراج کرده و سپس در این بازه اقدام به تشکیل بازه‌های مربوط به مؤلفه‌ها می‌نمایند.



شکل ۷: قیمت ساعتی انرژی الکتریکی بازار PJM

Figure 7. Hourly price of electric energy in PJM market



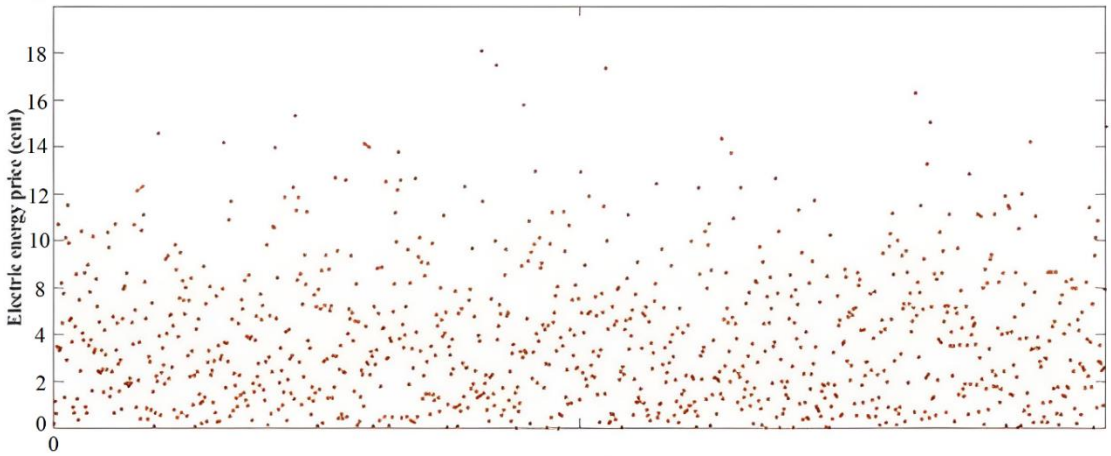
شکل ۸: مؤلفه اول عدد Z قیمت برق

Figure 8. The first component of the elrctricity price

پس از مشخص نمودن مجموعه‌های مؤلفه‌ی اول و دوم عدد زد، سناریوهای احتمالی مجموعه عدد زد مطابق جدول ۱ تعیین می‌گردند، در ادامه با توجه به اینکه نتایج به‌دست‌آمده از مجموعه‌های عدد زد به‌صورت اعداد زوج مرتب هستند، می‌بایست نتایج به‌دست‌آمده از سناریوها به اعداد فازی کلاسیک تبدیل گردند [۱۴] و سپس در ادامه مجموعه‌های به‌دست‌آمده با استفاده از معادلات ۱۷ و ۱۸ به اعداد واضح فازی تبدیل گردند. پس از تبدیل مجموعه عدد زد به مجموعه فازی نامنظم توسط روش برش آلفا [۱۴]، مجموعه فازی به‌دست‌آمده، فازی زدایی می‌گردند در این مطالعه از روش مرکز ثقل (معادله ۱۹) به‌منظور فازی زدایی استفاده گردیده است. در پایان توسط معادله ۲۱ قیمت انرژی الکتریکی ساعت پیش رو به دست می‌آید.

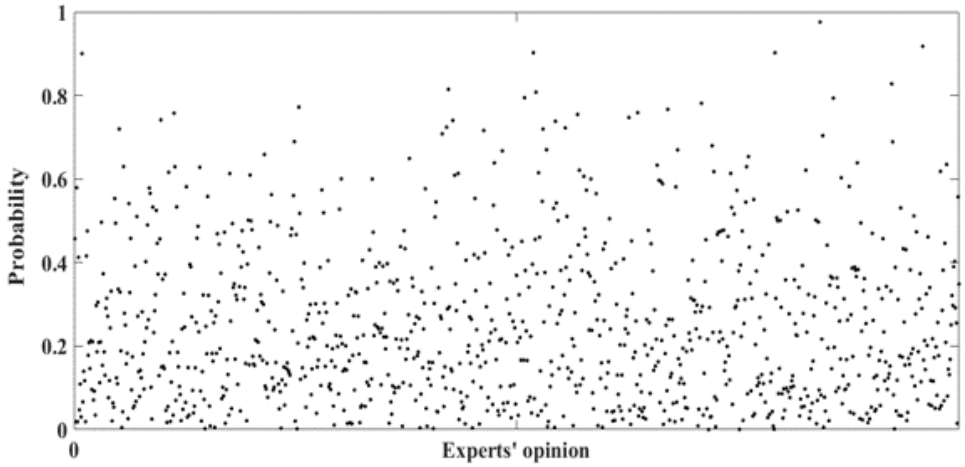
۴-۲-روش عدد CZ

همانطور که در بخش‌های قبل این مطالعه ارائه گردید، تفاوت عدد CZ با عدد زد، نحوه تشکیل مجموعه‌های احتمالاتی و امکانی اولیه توسط خبرگان است. در روش پیشنهادی، نظرات خبرگان در خصوص مجموعه امکانی قیمت انرژی الکتریکی (مؤلفه‌ی اول) و مجموعه احتمالاتی انرژی الکتریکی (مؤلفه‌ی دوم)، به‌صورت جداگانه جمع‌آوری می‌گردد، تصاویر ۹-۱۰ مجموع نظرات خبرگان، در خصوص رخداد مؤلفه‌ی اول و مؤلفه‌ی دوم نمایش داده شده است.



شکل ۹: مجموعه نظرات خبرگان (مؤلفه اول)

Figure 9. Collection of the expert opinion(first component)



شکل ۱۰: مجموعه نظرات خبرگان (مؤلفه دوم)

Figure 10. Collection of the expert opinion(second component)

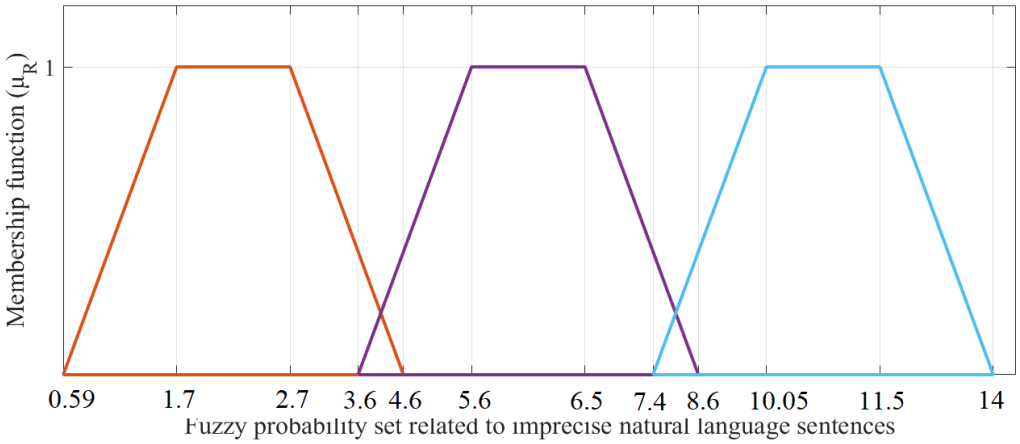
پس از جمع‌آوری نظرات خبرگان، مطابق با معادلات ۲۳-۳۱ اقدام به تشکیل بازه‌های زوج مرتب عدد CZ می‌گردد. در جدول ۲ نقاط به‌دست‌آمده توسط روش پیشنهادی در این مطالعه به‌منظور تشکیل مؤلفه‌ی اول و مؤلفه‌ی دوم عدد CZ ارائه گردیده است. تصاویر ۱۱ و ۱۲ بازه‌های تشکیل شده جزء اول و جزء دوم روش پیشنهادی را مطابق با جدول ۲ نمایش می‌دهند.

جدول۲: نتایج عددی گروه‌بندی هدفمند بازه‌های عدد CZ

Table 2. Numerical results of targeted grouping of CZ-number intervals

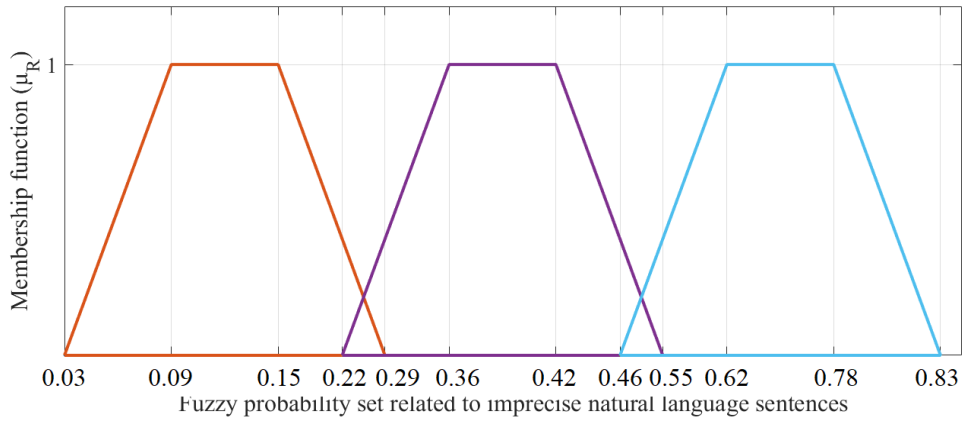
	First component				second component			
Low mode	0.5974	1.7408	2.7223	4.6724	0.033	0.0934	0.1548	0.2945
Medium mode	3.6019	5.669	6.5973	8.6256	0.2264	0.3648	0.4346	0.5580
High mode	7.4462	10.0757	11.5223	14.0204	0.4966	0.6238	0.07152	0.8388

تصاویر ۱۱ و ۱۲ فواصل به‌دست‌آمده توسط مؤلفه اول و مؤلفه دوم عدد CZ ، مطابق جدول ۲ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: مؤلفه اول عدد CZ قیمت برق

Figure 11. The first component of the CZ number of the electricity price



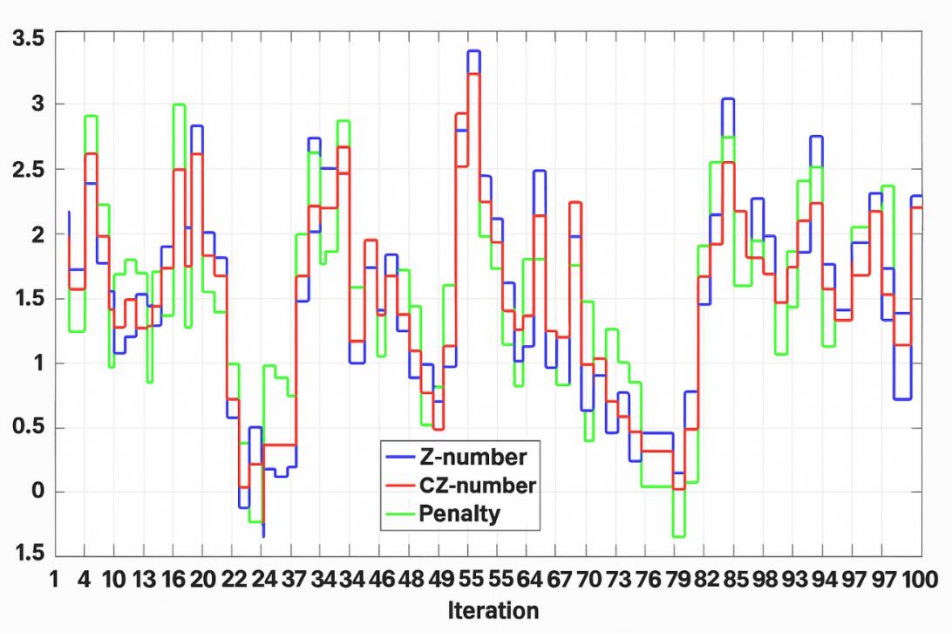
شکل ۱۲: مؤلفه دوم عدد CZ قیمت برق

Figure 12. The second component of CZ number of electricity price

۴-۳-بررسی نتایج پایانی

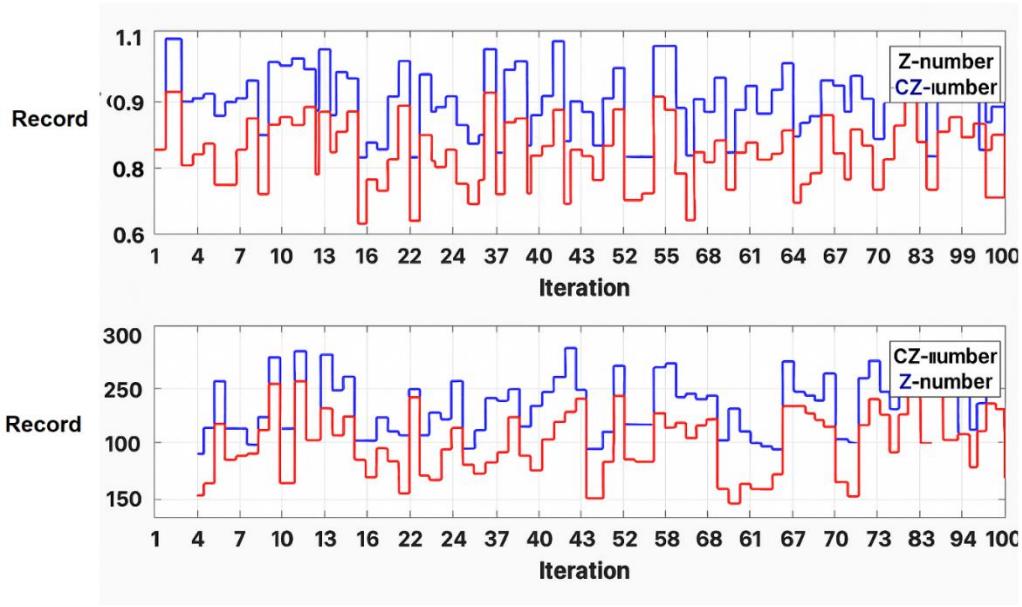
هدف از انتخاب پیش‌بینی قیمت توسط بازار PJM، در دسترس بودن یک دیتا رایگان و واقعی و پرکاربرد در بازار برق بین‌الملل بوده است. سایت اینترنتی PJM قیمت‌های لحظه‌ای (ساعت به ساعت) بازار برق خود را ارائه می‌دهد که بسیاری از شرکت‌های شرکت‌کننده در این بازار از این دیتاها به‌منظور تعین قیمت و شرکت در بازار لحظه آتی استفاده می‌نمایند در این مقاله فرض گردیده است که هیچ گونه دیتا محلی در دسترس نیست و ما توسط روش عدد زد و روش پیشنهادی اقدام به پیش‌بینی بازار PJM در ساعت آتی می‌نماییم. تصاویر ۱۳ و ۱۴ مقایسه نتایج به‌دست‌آمده توسط روش عدد زد و روش پیشنهادی اعداد واقعی رخ داده شده در [۲۶] در ۱۰۰ رکورد آتی را نمایش می‌دهد.

در شکل ۱۴ انحراف معیار دیتاهای در نظر گرفته شده توسط کارشناس عدد زد و انحراف معیار دیتاهای جمع‌آوری شده نظرات کارشناسان در خصوص هر یک از رکوردهای شکل ۱۳ نمایش داده شده است، همچنین زمان اجرا هر یک از رکوردها برحسب ثانیه توسط نرم‌افزار متلب با در نظرگیری ۴۰۰۰ دیتا برای هر یک از روش‌ها در یک سیستم عامل با ویندوز ۷، پردازنده ۵ هسته‌ای و حافظه ۴ گیگابایت محاسبه و نتایج در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: نتایج به‌دست‌آمده پیش‌بینی قیمت و مقایسه با عدد واقعی

Figure 13. The obtain result of price prediction and comparison with real number



شکل ۱۴: مقایسه انحراف معیار دیتاها و زمان اجرا روش پیشنهادی با روش عدد زد

Figure 14. Comparison of standard deviation of data and execution time

نتایج تصاویر ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که پیش‌بینی قیمت توسط روش پیشنهادی به عدد واقعی در هر رکورد نزدیک‌تر می‌باشد، همچنین مقدار انحراف معیار نظر کارشناسان در روش پیشنهادی نسبت به عدد زد کمتر می‌باشد و دلیل این امر استفاده بهتر از نظر کارشناسان و خبرگان است. اما با توجه به این موضوع که مراحل بیشتری در روش پیشنهادی باید زمان بیشتری سپری گردد لذا زمان اجرا تا نتیجه‌گیری هر یک از رکوردها نسبت به روش پیشنهادی مقدار بیشتری را سپری می‌نماید، اما با توجه به این که زمان اختلاف زمان اجرا ناچیز است، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده توسط روش پیشنهادی نسبت به روش عدد زد به نتایج واقعی نزدیک‌تر است لذا محاسبات پایانی توسط روش پیشنهادی بهینه‌تر هستند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رویکرد جدیدی از عدد زد بر اساس خوشه‌بندی بدون نظارت داده های خبرگان ارائه شده است. در مطالعات گذشته، یک عدد زد مرتبط با یک متغیر، X، معمولاً به‌عنوان یک جفت اعداد فازی (A, B) در نظر گرفته می‌شود که در آن A به‌عنوان اولین جزء اعداد فازی تفسیر می‌شود که یک محدودیت فازی است، و همچنین B به‌عنوان معیار قطعیت که به جزء دوم اعداد فازی معروف است به قطعیت جزء اول تعبیر می‌شود. از دیدگاه احتمالی در رویکرد ما، جزء اول A و جزء دوم B به‌عنوان یک عدد مدل‌سازی می‌شوند. انگیزه‌های اصلی این تحقیق این است که به‌راحتی بتوانیم هر نوع عملیات حسابی را با استفاده از اعداد فازی گسسته مدل‌سازی نماییم و بهترین مدل‌سازی را برای تعیین فواصل فازی که دارای خواص رویدادها و احتمالات در بهینه‌ترین حالت هستند ارائه نماییم. منظور از بهینه‌ترین حالت در این تحقیق این است که با در نظر گرفتن خوشه‌های داده احتمال، خاصیت داده‌ها از بین نمی‌رود و تشکیل فواصل فازی از الگوریتم کارآمدی برخوردار است. به‌عبارت‌دیگر به‌راحتی می‌توان آن‌ها را مدیریت کرد و لازم به ذکر است که برای ایجاد فاصله نیازی به توزیع احتمال نیست. علاوه بر این، نتایج این الگوریتم به متخصصان کمک می‌کند تا در مورد مسئله متغیرهای اعداد گسسته به تصمیم نهایی برسند. با توجه به اینکه به روش عدد زد، الگوریتم خوشه‌بندی اضافه گردیده است، به‌منظور بررسی بار محاسباتی روش پیشنهادی نسبت به عدد زد، در این مقاله از نرم‌افزار متلب با سیستم عامل ویندوز ۷ و سخت افزار سیستم با مشخصات پردازش گر ۵ هسته‌ای و حافظه ۴ گیگابایت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که نتایج نشان می‌دهد با توجه به این که در روش پیشنهادی مراحل بیشتری به‌منظور حل محاسبات انجام می‌گردد، مدت زمان بیشتری به‌منظور حل محاسبات سپری می‌شود اما اختلاف زمان سپری شده نسبت به روش عدد زد ناچیز است. در پایان محققان در نظر دارند در مقالات آتی از روش پیشنهادی به‌منظور محاسبات عدم قطعیت‌های پیش آمده در سیستم قدرت استفاده نمایند

مراجع

[1] A. L. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

[2] A. P. Dempster, "A generalization of Bayesian inference," *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)* , vol. 30, no. 2, pp. 205-232, 2018, doi: 10.1111/j.2517-6161.1968.tb00722.x.

[3] G. Shafer, "A mathematical theory of evidence turns 40," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 79, pp. 7-25, 2016, doi: 10.1016/j.ijar.2016.07.009.

[4] M. J. Mendel and J.R. Bob, "Type-2 fuzzy sets made simple," *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol. 10, no. 2, pp. 117-127, 2002, doi: 10.1109/91.995115.

[5] G. Ulutagay and V. Kreinovich, "Density-Based Fuzzy Clustering as a First Step to Learning Rules: Challenges and Solutions," in *Advance Trends in Soft Computing: Proceedings of WCSC* , 2013, San Antonio, Texas, USA , pp. 357-372, doi: 10.1007/978-3-319-03674-8.

[6] Y. Wang *et al.,* "Pairwise constraints-based semi-supervised fuzzy clustering with multi-manifold regularization," *Information Sciences*, vol. 638, p. 118994, 2023, doi: 10.1016/j.ins.2023.118994.

[7] L. Guo *et al.,* "Pixel and region level information fusion in membership regularized fuzzy clustering for image segmentation," *Information Fusion* , vol. 92, pp. 479-497, 2023, doi: 10.1016/j.inffus.2022.12.008.

[8] F. Xiao, "A multiple-criteria decision-making method based on D numbers and belief entropy," *International Journal of Fuzzy Systems* , vol. 21, no. 4, pp. 1144-1153, 2019, doi: 10.1007/s40815-019-00620-2.

[9] J. Pérez-Ortega *et al.,* "POFCM: A Parallel Fuzzy Clustering Algorithm for Large Datasets," *Mathematics* , vol. 11, no. 8, p. 1920, 2023, doi: 10.3390/math11081920.

[10] S. Jafari, M. Najafi, N. M. Pirkolachahi, and N. C. Shirazi, "Enhancing energy hub efficiency through advanced modelling and optimization techniques: A case study on micro-refinery output products and parking lot integration," *Heliyon*, vol. 10, no. 18, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36233 .

[11] S. Jafari, M. Najafi, N. M. Pirkolachahi, and N. C. Shirazi, "Modelling multi-stage energy optimization in the smart hub energy system with hybrid demand management and local supply by Electric Vehicles," *Research square*, 2024, doi: 10.21203/rs.3.rs-3834421/v1.

[12] R. Cerqueti and R. Mattera, "Fuzzy clustering of time series with time-varying memory," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 153, pp. 193-218, 2023, doi: 10.1016/j.ijar.2022.11.021.

[13] A. R. Rajeswari *et al.,* "A trust-based secure neuro fuzzy clustering technique for mobile ad hoc networks," *Electronics* , vol. 12, no. 2, p. 274, 2023, doi: 10.3390/electronics12020274.

[14] R. Cheng, B. Kang and J. Zhang, "An Improved Method of Converting Z-number into Classical Fuzzy Number," *33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Kunming, China, 2021, pp. 3823-3828, doi: 10.1109/CCDC52312.2021.9601658.

[15] A. R. Aliev, A. V. Alizadeh and O. H. Huseynov, "The arithmetic of discrete Z-numbers," *Information Sciences*, vol. 290 , pp. 134-155, 2015, doi: 10.1016/j.ins.2014.08.024.

[16] F. Liu *et al.,* "Evaluating Internet hospitals by a linguistic Z-number-based gained and lost dominance score method considering different risk preferences of experts," *Information Sciences*, vol. 630, pp. 647-668, 2023, doi: 10.1016/j.ins.2023.02.061.

[17] F. Teng *et al.,* "Probabilistic linguistic Z number decision-making method for multiple attribute group decision-making problems with heterogeneous relationships and incomplete probability information," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 1-22, 2022, doi: 10.1007/s40815-021-01161-3.

[18] R. Jafari, W. Yu, and X. Li, "Numerical solution of fuzzy equations with Z-numbers using neural networks," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 24, no. 1, pp. 1-7, 2017, doi: 10.1080/10798587.2017.1327154.

[19] S. Massanet, J. V. Riera and J. Torrens, "A new vision of Zadeh's Z-numbers," *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*. Cham: *Springer International Publishing*, vol. 47, 2016, pp. 581-592, doi: 10.1007/978-3-319-40581-0_47.

[20] A. R. Aliev *et al.,* "Z-number-based linear programming," *International Journal of Intelligent Systems* , vol. 30, no. 5, pp. 563-589, 2015, doi: 10.1002/int.21709.

[21] D. Wu *et al.,* "A new medical diagnosis method based on Z-numbers," *Applied Intelligence* , vol. 48, pp. 854-867, 2018, doi: 10.1007/s10489-017-1002-4.

[22] R. Cheng, J. Zhang and B. Kang, "Ranking of Z-Numbers Based on the Developed Golden Rule Representative Value," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 30, no. 12, pp. 5196-5210, Dec. 2022, doi: 10.1109/TFUZZ.2022.3170208.

[23] A. R. Aliev *et al.,* "Eigensolutions of partially reliable decision preferences described by matrices of Z-numbers," *International Journal of Information Technology & Decision Making*, vol. 19, no. 06, pp. 1429-1450, 2020, doi: 10.1142/S0219622020010063.

[24] R. Banerjee and K. P. Sankar, "A machine-mind architecture and Z*-numbers for real-world comprehension," *Pattern Recognition and Big Data*, pp. 805-842, 2017, doi: 10.1142/9789813144552_0026.

[25] Q. Liu *et al.,* "On the negation of discrete z-numbers," *Information Sciences*, vol. 537, pp. 18-29, 2020, doi: 10.1016/j.ins.2020.05.106.

[26] https://hourlypricing.comed.com/live-prices/?date=20230310.

JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1341

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

A Novel Method for Optimal Synthesis of Reversible Circuits Using Metaheuristic Algorithms

Maryam Mahmoudi[1] | Neda Ashrafi Khozani[2] | Ali Ghorbani[3*]

[1]Department of Computer Engineering, Mey.C., Islamic Azad University, Meymeh, Iran.
Mahmoudi.m174@iau.ac.ir

[2]Department of Computer Engineering, Mey.C., Islamic Azad University, Meymeh, Iran.
Neda_ashrafi@iau.ac.ir

[3]Department of Computer Engineering, Mey.C., Islamic Azad University, Meymeh, Iran.
ghorbani@shaiau.ac.ir

Correspondence
Ali Ghorbani, Department of Computer Engineering, Mey.C., Islamic Azad University, Meymeh, Iran.
Email: ghorbani@shaiau.ac.ir

Main Subject:
Reversible circuits

History:
Received: 28 August 2024
Revised: 22 October 2024
Accepted: 2 November 2024

Abstract

A reversible logic circuit is a circuit that consists of reversible gates, and there is a one-to-one correspondence between its inputs and outputs. These circuits have a unique input corresponding to each output, and information loss does not occur as a result. So far, many attempts have been made in the field of automatic synthesis of reversible circuits, especially with the help of knowledge engineering methods. In this research, the problem of automatic synthesis of reversible circuits was innovatively modeled into a multi-criteria optimization problem, and then a new combination of genetic and bat metaheuristic algorithms was presented to solve this optimization problem. The architecture of the proposed method encodes reversible circuits as chromosomes in the genetic algorithm and as positions in the bat algorithm. By automatically sharing populations between the two algorithms, the method exploits the global exploration ability of GA and the local exploitation capability of BA in a complementary manner. The proposed method outperforms each algorithm individually, especially in quantum cost and delay. For example, in the 2's complement circuit, the quantum cost drops from 25 and 22 to 19, with the delay reduced to 12. In the full adder, garbage outputs decrease from 18 to 9, indicating significant improvement.

Keywords: Reversible circuits, Optimization, Metaheuristic Algorithms.

Highlights

- Design an optimized method for the synthesis of reversible circuits.
- Enhancing the performance and reducing quantum cost using an advanced method of population sharing.
- Reducing synthesis time in comparison to state-of-the-art methods.

Citation: M. Mahmoudi, N. Ashrafi Khozani, and A. Ghorbani, "A Novel Method for Optimal Synthesis of Reversible Circuits Using Metaheuristic Algorithms," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 76-89, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1341 [in Persian].

1. Introduction

Reversible logic circuits have emerged as a pivotal area of research in modern computing, particularly due to their potential to minimize energy dissipation and information loss. These circuits, characterized by a one-to-one correspondence between inputs and outputs, are fundamentally composed of reversible gates [1]. Unlike conventional logic gates, reversible gates ensure that the input states can always be uniquely determined from the output states, making them highly efficient for applications in quantum computing, low-power design, and nanotechnology [2].

The synthesis of reversible circuits has been extensively studied, with numerous approaches leveraging knowledge engineering and optimization techniques. Traditional methods often focus on single-objective optimization, but the complexity of reversible circuits demands a multi-criteria approach to balance factors such as quantum cost, circuit depth, and the number of ancillary inputs and garbage outputs. Metaheuristic algorithms, known for their robustness in solving complex optimization problems, have shown promise in addressing these challenges. Among these, genetic algorithms (GAs) and bat algorithms (BAs) stand out for their ability to efficiently explore large solution spaces [3].

This paper presents a novel hybrid method combining genetic and bat metaheuristic algorithms to optimize the synthesis of reversible circuits [4]. The proposed approach aims to improve upon existing techniques by leveraging the global search capabilities of GA and the local search precision of BA. By modeling the synthesis problem as a multi-criteria optimization task, our method achieves superior results in terms of quantum cost and circuit delay, as demonstrated through simulations on benchmark circuits such as the two's complement and full adder [5].

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 reviews related work in reversible circuit synthesis and metaheuristic optimization. Section 3 details the proposed hybrid algorithm, while Section 4 presents the experimental results and comparative analysis. Finally, Section 5 concludes the paper and suggests directions for future research.

2. Innovation and contributions

This paper introduces a novel hybrid metaheuristic approach, combining genetic and bat algorithms, for the synthesis of reversible circuits with simultaneous optimization of quantum cost and circuit delay. Key innovations of the proposed method include:

- An automated population-sharing mechanism between the genetic and bat algorithms to prevent convergence to local optima and enhance global search capability.
- A unified encoding scheme that enables concurrent optimization of gate selection and circuit layout, facilitating efficient parallel processing.
- Demonstrated superior performance in benchmark evaluations, achieving a 19% reduction in quantum cost compared to standalone algorithmic approaches.

This methodology contributes to the development of scalable and energy-efficient circuit design techniques, with particular relevance for quantum computing and low-power electronic applications. The integrated optimization framework effectively addresses multiple design constraints while improving overall circuit performance metrics.

3. Materials and Methods

This study utilizes a hybrid metaheuristic methodology integrating Genetic Algorithm (GA) and Directional Bat Algorithm (DBA) to optimize reversible circuit synthesis. The system is implemented in Python, representing circuits as chromosomes in GA and locations in DBA, with a unified four-element encoding scheme per gate. Benchmark circuits, including two's complement and full adder configurations, are evaluated based on quantum cost, delay, and garbage output metrics. A population-sharing mechanism between the two algorithms prevents stagnation in local optima. Simulations conducted over 250 generations, with population sizes of 80 for GA and 60 for DBA, demonstrate accelerated convergence and superior solution quality compared to standalone methods.

4. Results and Discussion

The hybrid GA-DBA method demonstrated superior performance in reversible circuit synthesis. For the two's complement circuit, it achieved a quantum cost of 19 (compared to 25 for GA and 22 for DBA) and a delay of

12 (compared to 20 and 14, respectively). In the case of the full adder, the quantum cost remained competitive at 98, while the delay was significantly reduced to 112 (versus 166 for GA and 140 for DBA). Although the method utilized slightly more gates (12 compared to 10–11 for the two's complement circuit), it consistently minimized garbage outputs (9 compared to 15–18 for the full adder).
These results highlight the effectiveness of population-sharing between algorithms in balancing exploration and exploitation, enabling the hybrid approach to outperform standalone methods in multi-objective optimization. The observed trade-off between gate count and other performance metrics suggests that future work could explore weighted optimization strategies to further enhance circuit efficiency.

5. Conclusion

This paper successfully demonstrates the effectiveness of a hybrid GA–DBA metaheuristic approach for optimizing reversible circuit synthesis. The proposed method outperforms standalone algorithms by significantly reducing quantum cost and circuit delay while maintaining competitive gate counts. The innovative population-sharing mechanism proves crucial in escaping local optima and achieving faster convergence. Although the approach slightly increases gate numbers in some cases, it excels in multi-criteria optimization—particularly in minimizing garbage outputs. The results highlight its potential for quantum and low-power applications, with future work suggested to extend the method to higher-value logic systems and explore weighted optimization strategies. The study contributes valuable insights into metaheuristic-based circuit design automation.

6. Acknowledgement

The authors extend their sincere gratitude to the Islamic Azad University, Meymeh Branch, for their provision of research facilities and institutional support. Special acknowledgment is given to colleagues within the Computer Engineering Department for their insightful feedback and scholarly discussions. The authors also express their deep appreciation to the anonymous reviewers whose constructive comments significantly contributed to enhancing the quality of this work.

References

[1] R. Wille and R. Drechsler, “BDD-based synthesis of reversible logic for large functions,” *46th ACM/IEEE Design Automation Conference*, 2009, pp. 270-275, doi: 10.1145/1629911.1629984.

[2] P. W. Shor, “Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer,” *SIAM J. Sci. Statist. Comput.* , vol. 41, pp. 303-332, 1999, doi: 10.1137/S0097539795293172.

[3] H. Thapliyal and N. Ranganathan, “Design of Reversible Latches Optimized for Quantum Cost, Delay and Garbage Outputs,” *23rd International Conference on VLSI Design*, 2010, pp. 235-240, doi: 10.1109/VLSI.Design.2010.74.

[4] X. S. Yang, “A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm,” *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)-Springer*, vol. 284, pp. 65-74, 2010, doi:10.1007/978-3-642-12538-6_6.

[5] A. Ghorbani, M. Dolatshahi, S. M. Zanjani, and B. Barekatain, “A new low-power Dynamic-GDI full adder in CNFET technology,” *Integration*, vol. 83, pp. 46–59, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.vlsi.2021.12.001.

Declaration of Competing Interest: The Authors do not have a conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Maryam Mahmoudi: methodology, writing original draft preparation; manuscript editing; **Neda Ashrafi**: software, methodology, manuscript editing; **Ali Ghorbani**: Resources, manuscript editing.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1341

مقاله پژوهشی

ارائه روشی برای سنتز بهینه مدارهای برگشت‌پذیر با بکارگیری الگوریتم‌های متاهیوریستیک

مریم محمودی[۱] | ندا اشرفی خوزانی[۲] | علی قربانی*[۳]

[۱]دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد میمه، دانشگاه آزاد اسلامی، میمه، ایران.
Mahmoudi.m174@iau.ac.ir

[۲]دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد میمه، دانشگاه آزاد اسلامی، میمه، ایران.
Neda_ ashrafi@iau.ac.ir

[۳]دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد میمه، دانشگاه آزاد اسلامی، میمه، ایران.
ghorbani@shaiau.ac.ir

نویسنده مسئول:
*علی قربانی، استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد میمه، دانشگاه آزاد اسلامی، میمه، ایران.
ghorbani@shaiau.ac.ir

موضوع اصلی:
مدارات برگشت‌پذیر

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۷ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۱ آبان ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۲ آبان ۱۴۰۳

چکیده:
یک مدار منطقی برگشت‌پذیر، مداری است که از گیت‌های برگشت‌پذیر تشکیل شده است و میان ورودی و خروجی‌های آن یک تناظر یک به یک برقرار است. این ویژگی باعث می‌شود ورودی منحصربه‌فرد متناظر با هر خروجی، قابلیت بازیابی داشته باشد و اتلاف اطلاعات در این نوع مدارها اتفاق نیفتد. تاکنون تلاش‌های متعددی در زمینه‌ی سنتز خودکار مدارهای برگشت‌پذیر به‌خصوص به کمک روش‌های مهندسی دانش انجام شده است. در این پژوهش مسئله‌ی سنتز خودکار مدارهای برگشت‌پذیر به‌صورت نوآورانه‌ای به یک مسئله بهینه‌سازی چند معیارِ مدل‌سازی شده و سپس یک روش جدید ترکیبی از الگوریتم‌های متاهیوریستیک ژنتیک و خفاش، برای حل این مسئله بهینه‌سازی ارائه شد. در معماری روش پیشنهادی، مدارهای برگشت‌پذیر ابتدا به‌صورت کروموزوم در الگوریتم ژنتیک و مکان در الگوریتم خفاش کدگذاری می‌شوند. سپس با سازوکار اشتراک‌گذاری جمعیت میان دو الگوریتم، از مزایای جستجوی سراسری ژنتیک و جستجوی محلی دقیق الگوریتم خفاش به‌صورت مکمل بهره‌برداری می‌شود. روش پیشنهادی در مقایسه با هر یک از این الگوریتم‌ها نتایج بهتری به‌ویژه از نظر هزینه کوآنتومی و تأخیر دارد. برای مثال، در مدار مکمل-۲ هزینه کوآنتومی از ۲۵ و ۲۲ به ۱۹ و تأخیر از ۲۰ و ۱۴ به ۱۲ کاهش یافته است. همچنین در مدار تمام‌جمع‌کننده تعداد خروجی‌های زائد از ۱۸ به ۹ رسیده که نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه است.

کلیدواژه‌ها: مدارهای برگشت‌پذیر، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های متاهیوریستیک.

تازه‌های تحقیق:

- ارائه روشی بهینه برای سنتز مدارهای برگشت‌پذیر با ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و خفاش.
- افزایش کارآیی، بهبود هزینه کوانتومی و تأخیر مدار با روش پیشنهادی اشتراک‌گذاری جمعیت بین الگوریتم‌ها.
- افزایش سرعت سنتز روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود.

۱-مقدمه

یک مدار منطقی، برگشت‌پذیر[1] نامیده می‌شود اگر هر جایگشت مشخصی از ورودی را به یک جایگشت یکتا از خروجی نگاشت کند. بنابراین با در دست داشتن خروجی مدار، می‌توان ورودی یکتای متناظر با آن را بازیابی کرد لذا اتلاف اطلاعات و انرژی ناشی از آن در این مدارها صفر خواهد بود. مدارهای برگشت‌پذیر از گیت‌های برگشت‌پذیر تشکیل می‌شوند که این گیت‌ها باید دارای ویژگی برابر بودن تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها باشند. لذا گیت‌هایی مانند AND و OR برخلاف گیت NOT در این مدارها قابل استفاده نیستند. بعلاوه در مدارهای برگشت‌پذیر، انشعاب از خروجی گیت‌ها مجاز نیست به این معنی که هر خروجی فقط می‌تواند یک ورودی را راه‌اندازی‌کند، به‌عبارت‌دیگر، گنجایش خروجی گیت‌ها در مدارهای برگشت‌پذیر برابر یک است.

سنتز مدارهای منطقی را می‌توان به‌صورت تبدیل یک توصیف سطح بالا (به‌عنوان‌مثال جدول درستی) به یک توصیف قابل پیاده‌سازی در سخت‌افزار تعریف کرد. روش‌های متعددی تاکنون برای انجام این فعالیت معرفی شده است که هر کدام از برخی جهت‌ها بهینه‌سازی شده‌اند و ممکن است با برخی معیارهای دیگر بهینه نباشند. در این پژوهش معیارهای مختلفی به‌منظور بهینه‌سازی مدارهای سنتز شده در نظر گرفته‌ایم. به‌این‌ترتیب مسئله‌ی مطرح در این پژوهش یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفِ است. لذا استفاده از روش‌های متاهیوریستیک ازجمله الگوریتم ژنتیک به‌عنوان مشهورترین الگوریتم در این خانواده از الگوریتم‌ها و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی خفاش که از همگرایی بالایی در انجام بهینه‌سازی برخوردار است، می‌تواند راه‌حل مفیدی برای انجام این بهینه‌سازی باشد. در این پژوهش، یک روش ترکیبی به کمک الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی خفاش در حالت بهبودیافته‌ی آن‌که الگوریتم خفاش جهت‌دار نامیده می‌شود، مورد استفاده قرار گرفته است که در بخش‌های بعدی پس از معرفی این روش ترکیبی، نتایج آن در سنتز مدارهای برگشت‌پذیر را مورد بررسی قرار می‌دهیم. معیارهای در نظر گرفته شده در این پژوهش برای انجام سنتز بهینه عبارت‌اند از:

هزینه‌ی کل گیت‌ها[2]: این معیار برابر با تعداد کل گیت‌های تولیدشده در روش سنتز مدارهای برگشت‌پذیر است.

عمق مدار[3]: اگر مدار برگشت‌پذیر C با k گیت را در نظر بگیریم. با فرض اینکه مدار C دارای m زیرمجموعه با گیت‌های موازی باشد(زیرمجموعه ام (1<i<m) دارای ki گیت پایه است)؛ در این حالت عمق مدار برابر تعداد گام‌ها برای اجرا شدن همه گیت‌های موجود در مدار تعریف می‌شود[۱]:

$$Depth = k - \sum_{i=1}^{m} (k_i - 1) \qquad (۱)$$

تعداد (خطوط) کمکی[4]: خطوط کمکی، خطوطی هستند که علاوه بر ورودی و خروجی اصلی تابع موردنظر به مدار افزوده می‌شوند و اساساً به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول حالتی است که خطوط کمکی به مدار افزوده می‌شوند تا یک تابع برگشت‌ناپذیر را به یک تابع برگشت‌پذیر تبدیل کنند. دسته دوم حالتی است که مدار موردنظر برگشت‌پذیر است؛ به‌عبارت‌دیگر با همان تعداد ورودی یا خروجی می‌توان مدار را سنتز کرد؛ اما خطوط کمکی به دلایل مختلفی چون کاهش هزینه[۲و۳] و کاهش عمق[۴] به مدار اضافه می‌شوند و در الگوریتم‌های سنتز[۵] و یا بهینه‌سازی از آن بهره گرفته می‌شود.

خروجی‌های بی‌اهمیت[5]: خروجی‌های ناخواسته یا استفاده نشده گیت (یا مدار) برگشت‌پذیر به‌عنوان خروجی بی‌اهمیت شناخته می‌شوند؛ به‌عبارت‌دیگر خروجی‌هایی که فقط برای حفظ برگشت‌پذیری موردنیاز هستند.

۲-روش پیشنهادی

تاکنون از روش‌های مختلفی برای انجام عملیات سنتز در مدارهای برگشت‌پذیر استفاده‌شده است که برخی از آن‌ها از جمله الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک هستند. در این پژوهش ما از ترکیب دو روش فرا ابتکاری ژنتیک و الگوریتم خفاش جهت‌دار بهره گرفته‌ایم که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

---

[1] Reversible

[2] Quantum cost

[3] Circuit depth

[4] Ancilla Qubit

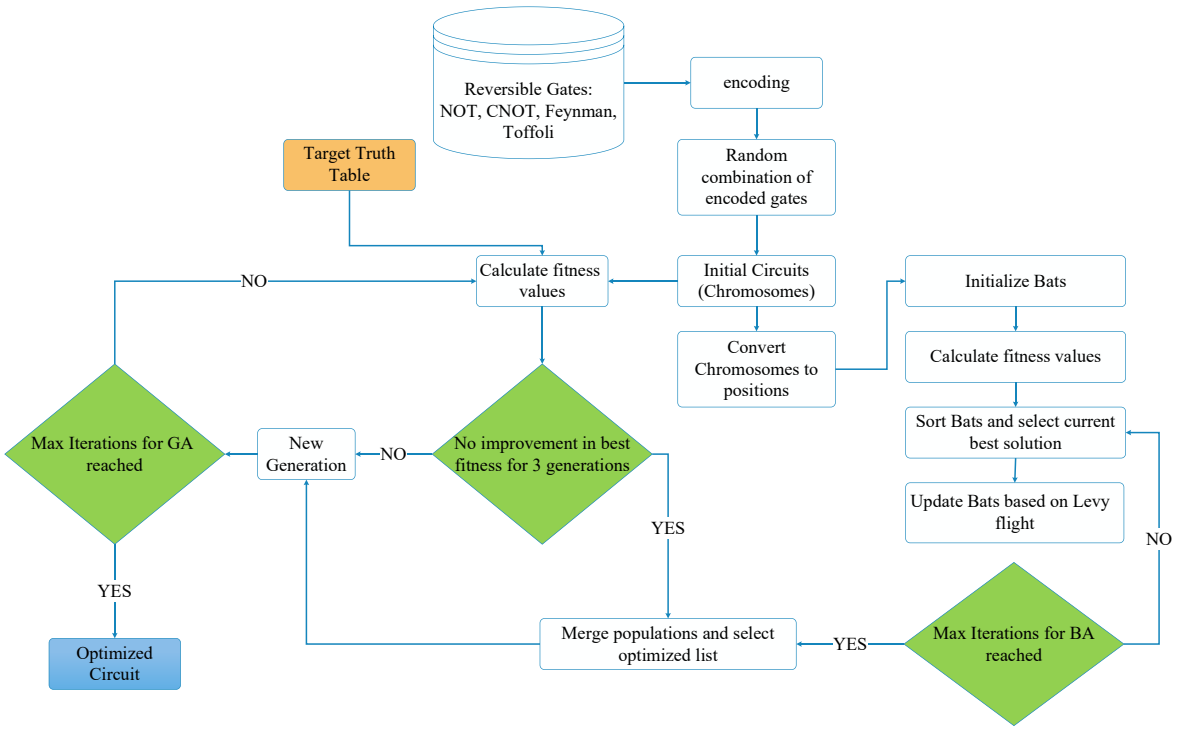
[5] Garbage outputs

اگر برای نمایش یک مدار برگشت‌پذیر سه ارزشی گیت‌ها را روی تعدادی خطوط موازی کنار هم قرار دهیم که نشان‌دهنده ورودی-خروجی‌های مدار هستند، می‌توانیم مدارها را به‌صورتی مشابه با کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک[۷,۶] مدل‌سازی کنیم و با ترکیب آن با الگوریتم خفاش که در ادامه معرفی خواهیم کرد به سنتز بهینه‌ی مدارها بپردازیم. درواقع در این پژوهش، کدگذاری مدار به این صورت است که ابتدا هر یک از گیت‌ها با توجه به نوع و اینکه هر یک از ورودی‌های کنترل و خروجی‌های هدف آن گیت روی کدام خط ورودی و خروجی واقع شده است، کد می‌شوند. سپس از کنار هم قرار گرفتن این کدها یک کد بزرگ‌تر داریم که نشان‌دهنده‌ی یک مدار کامل است و می‌تواند به‌عنوان کروموزوم در الگوریتم ژنتیک و یا مکان‌ها در الگوریتم خفاش در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی شوند.

در روش پیشنهادی، کدگذاری مدارها به‌گونه‌ای است که هر گیت با توجه به نوع و جایگاه ورودی‌ها و خروجی‌های هدف کدگذاری می‌شود و سپس از ترکیب این کدها یک کد جامع به دست می‌آید که نشان‌دهنده یک مدار کامل است. این کد به‌عنوان کروموزوم در الگوریتم ژنتیک و یا به‌عنوان موقعیت در الگوریتم خفاش استفاده می‌شود و برای بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به‌منظور جلوگیری از گیر افتادن الگوریتم ژنتیک در بهینه‌های محلی، روشی برای اشتراک‌گذاری خودکار جمعیت بین دو الگوریتم به کار گرفته شده است. به این صورت که اگر طی سه نسل متوالی در الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه عمومی تغییر نکند (یعنی بهینه کلی یکسان باقی بماند)، احتمال برخورد با بهینه محلی وجود دارد. در این حالت، جمعیت الگوریتم ژنتیک به‌طور خودکار با جمعیت الگوریتم خفاش به اشتراک گذاشته می‌شود. این اشتراک‌گذاری به معنای انتقال بهترین کروموزوم‌ها از یک الگوریتم به الگوریتم دیگر است و باعث می‌شود که هر دو الگوریتم فضای جستجوی جدیدی را کشف کرده و به بهینه‌سازی بهتری دست یابند.

این مکانیزم به همراه جهش در الگوریتم ژنتیک، نه‌تنها به افزایش تنوع در جمعیت کمک می‌کند، بلکه به‌طور مؤثری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند. الگوریتم خفاش با تمرکز بیشتر بر جستجوی محلی دقیق، به بهبود و اصلاح راه‌حل‌ها کمک کرده و الگوریتم ژنتیک با کاوش در گستره‌ی بیشتری از فضای جستجو به تکامل کلی کمک می‌کند.



شکل۱: معماری روش پیشنهادی

Figure 1. Architecture of the proposed method

۲-۱-تعریف مسئله بهینه‌سازی

در این بخش بر مبنای توضیحات کلی فوق، جزئیات روش پیشنهادی را بررسی می‌کنیم. همان‌طور که از فلوچارت فوق مشخص است، ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و خفاش به‌صورت موازی انجام شده است. درواقع از جمعیت نهایی الگوریتم ژنتیک به‌عنوان جمعیت اولیه الگوریتم خفاش استفاده‌شده است. تعریف تابع برازش و همچنین کروموزوم‌ها (مکان‌ها در الگوریتم خفاش) به‌صورت یکسان انجام شده است که در ادامه جزئیات آن بیان خواهد شد.

۲-۱- ۱-کروموزوم‌ها و مکان‌ها

با توجه به توضیحات این بخش، نگاشت هر مدار برگشت‌پذیر به یک کروموزم (در الگوریتم ژنتیک) و یک مکان (در الگوریتم خفاش) نخستین مرحله در انجام شبیه‌سازی پیشنهاد شده در این پژوهش است. هر مدار کاندید (کروموزوم و یا مکان) طولی معادل ۴ برابر تعداد مجاز گیت‌ها هستند. حداکثر تعداد مجاز گیت‌ها در شبیه‌سازی مدارات ذکر شده در این پژوهش برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است. برای هر ۴ عنصر، عنصر اول نوع گیت را نشان می‌دهد و سه عنصر بعدی خطوط اتصال را نشان می‌دهند. اگر گیت انتخاب‌شده یک گیت ۲-کیو بیتی یا ۱-کیو بیتی باشد، عنصر سوم یا چهارم در تبدیل کروموزوم به مدار بلااستفاده است. به‌عنوان‌مثال عدد ۱ در اولین عنصر از هرکدام از چهارتایی‌های ذکر شده نمایانگر گیت NOT و عنصر بعدی نشان‌دهنده خط اتصال این گیت است.

در این روش، هر مدار برگشت‌پذیر به یک کروموزوم در الگوریتم ژنتیک یا یک مکان در الگوریتم خفاش نگاشت می‌شود. هر کروموزوم شامل مجموعه‌ای از گیت‌ها است که با ترتیب خاصی روی خطوط ورودی-خروجی مدار قرار گرفته‌اند. این نگاشت به این صورت است که هر گیت به چهار عنصر کد تبدیل می‌شود. اولین عنصر نوع گیت را مشخص می‌کند، درحالی‌که سه عنصر بعدی مکان اتصال‌های ورودی و خروجی آن گیت را نشان می‌دهند. به‌عنوان‌مثال، اگر گیت انتخاب‌شده یک گیت NOT باشد، اولین عنصر مقدار ۱ است که نمایانگر گیت NOT است، و عنصر دوم خط اتصال این گیت به ورودی یا خروجی مدار را نشان می‌دهد.

در این شبیه‌سازی، هر مدار برگشت‌پذیر می‌تواند حداکثر ۲۰ گیت داشته باشد. بنابراین، طول هر کروموزوم یا مکان برابر با ۸۰ عنصر (۴ عنصر برای هر گیت و در مجموع ۲۰ گیت) در نظر گرفته می‌شود. این طول به‌اندازه کافی بزرگ است تا پیچیدگی مدارهای برگشت‌پذیر را نشان دهد، اما همچنان برای انجام عملیات بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های ژنتیک و خفاش مناسب است.

نکته مهم در این نگاشت این است که برخی گیت‌ها مانند گیت‌های ۱-کیو بیتی (مانند NOT) و ۲-کیو بیتی (مانند CNOT) از تمامی ۴ عنصر کدگذاری استفاده نمی‌کنند. برای گیت‌های ۱-کیو بیتی، عنصر سوم و چهارم بلااستفاده هستند و مقدار آن‌ها در هنگام کدگذاری نادیده گرفته می‌شود. این طراحی به انعطاف‌پذیری سیستم کمک می‌کند تا گیت‌های مختلف با پیچیدگی‌های مختلف در مدارها قرار گیرند و همچنان بتوانند بهینه‌سازی شوند.

این روش نگاشت به شکلی طراحی‌شده است که به هر دو الگوریتم ژنتیک و خفاش اجازه می‌دهد از مدل‌سازی یکسانی برای مدارها استفاده کنند. به این معنا که کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک و مکان‌ها در الگوریتم خفاش به یک‌شکل کدگذاری می‌شوند و تنها تفاوت در نحوه استفاده از این اطلاعات توسط هر الگوریتم است. الگوریتم ژنتیک با استفاده از عملیات تقاطع و جهش کروموزوم‌ها را بهینه می‌کند، درحالی‌که الگوریتم خفاش با استفاده از پرواز و به‌روزرسانی مکان‌ها به جستجوی نقاط بهینه‌تر در فضای جستجو می‌پردازد.

استفاده از این کدگذاری منظم و سازگار برای گیت‌ها و خطوط اتصال در مدارهای برگشت‌پذیر، علاوه بر بهبود سرعت پردازش الگوریتم‌ها، امکان بهره‌برداری بهینه‌تر از روش‌های موازی‌سازی و به اشتراک‌گذاری اطلاعات بین دو الگوریتم را فراهم می‌آورد. با این روش، هر دو الگوریتم قادر خواهند بود به‌صورت هم‌زمان روی مدارهای یکسان کار کنند و با اشتراک‌گذاری خودکار بهترین کروموزوم‌ها و مکان‌ها، نتایج بهینه‌تری برای سنتز مدارهای برگشت‌پذیر تولید کنند.

۲-۱- ۲-تابع برازش

به‌منظور انجام بهینه‌سازی برای هر مدار کاندید، جدول درستی مدار کاندید تولید شده و با مدار هدف مقایسه می‌شود. تعداد خروجی‌های غیر منطبق بین مدار کاندید و جدول درستی هدف به‌علاوه هزینه کوانتومی مدار کاندید تابع برازش را تشکیل می‌دهند که باید در فرآیند بهینه‌سازی کمینه شوند.

۲-۲-معیارهای ارزیابی مدارهای برگشت‌پذیر

برای ارزیابی مدارهای برگشت‌پذیر، معیارهای متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها پرداخته می‌شود:

۲-۲- ۱-هزینه کوانتومی[1]

هزینه کوانتومی به تعداد عملیات اولیه‌ای که برای اجرای یک مدار برگشت‌پذیر موردنیاز است، اشاره دارد. هر گیت در یک مدار برگشت‌پذیر دارای هزینه‌ای است که وابسته به نوع آن گیت است. به‌عنوان‌مثال، برخی گیت‌ها مانند گیت‌های CNOT و Toffoli هزینه کوانتومی بیشتری نسبت به گیت NOT دارند. کاهش هزینه کوانتومی یکی از اهداف اصلی در طراحی مدارهای برگشت‌پذیر است، زیرا مستقیماً با کارایی مدار و استفاده از منابع محاسبات کوانتومی مرتبط است.

۲-۲- ۲-تأخیر[2]

تأخیر در مدارهای برگشت‌پذیر به تعداد گام‌های محاسباتی گفته می‌شود که برای اجرای کامل مدار لازم است. این گام‌ها معمولاً به تعداد لایه‌های گیت‌هایی که می‌توانند به‌صورت هم‌زمان اجرا شوند، وابسته‌اند. کاهش تأخیر در این مدارها به معنای افزایش سرعت پردازش و اجرای سریع‌تر محاسبات است. بنابراین، بهینه‌سازی تأخیر یکی از اهداف اصلی در طراحی مدارهای برگشت‌پذیر به شمار می‌رود. با کاهش تعداد لایه‌ها و استفاده از معماری‌های بهینه‌تر، می‌توان بهره‌وری بالاتری در پردازش‌های کم‌مصرف و کارآمد حاصل کرد.

۲-۲-۳-تعداد ورودی‌های کمکی[3]

ورودی‌های کمکی خطوط اضافی هستند که به مدار اضافه می‌شوند تا یک تابع برگشت‌ناپذیر به تابعی برگشت‌پذیر تبدیل شود. این ورودی‌ها درواقع کیو بیت‌هایی هستند که در شروع اجرای مدار مستقل از ورودی مدار یک مقدار ثابت دارند. این ورودی‌ها می‌توانند در کاهش پیچیدگی مدار و بهینه‌سازی معیارهایی مانند هزینه کوانتومی و تأخیر نقش مهمی ایفا کنند. بااین‌حال، افزایش بیش‌ازحد تعداد ورودی‌های کمکی ممکن است منجر به پیچیدگی فیزیکی بیشتر و دشواری در پیاده‌سازی مدار شود. بنابراین، طراحی بهینه مدار برگشت‌پذیر نیازمند تعادل دقیق بین استفاده از ورودی‌های کمکی و سایر اهداف مانند کاهش تأخیر و هزینه است.

۲-۲- ۴- خروجی‌های زائد[4]

خروجی‌های زائد به خروجی‌هایی گفته می‌شود که تنها به‌منظور حفظ خاصیت برگشت‌پذیری در مدار تولید می‌شوند و از نظر منطقی درنتیجه نهایی محاسبات نقشی ندارند. این خروجی‌ها برای حفظ توازن بین تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های مدار ضروری هستند، زیرا در مدارهای برگشت‌پذیر هر ورودی باید به یک خروجی متناظر تبدیل شود. بااین‌حال، افزایش تعداد خروجی‌های زائد می‌تواند منجر به مصرف بیشتر منابع، از جمله حافظه و توان محاسباتی، شود. به همین دلیل، کاهش تعداد خروجی‌های زائد یکی از اهداف مهم در بهینه‌سازی مدارهای برگشت‌پذیر به‌منظور افزایش کارایی و کاهش مصرف منابع است.

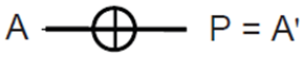
---

[1] Quantum Cost
[2] Delay
[3] Ancilla Inputs
[4] Garbage Outputs

۲-۳- گیت‌های برگشت‌پذیر پایه‌ای دودویی

هر گیت برگشـــت‌پذیر می‌تولند با اســـتفاده از گیت NOT و نیز گیت‌های ۲×۲ همچون CNOT، Controlled-(V) و Controlled-(V+) ساخته شود[۸].

الف- گیت NOT: گیت NOT یک گیت برگشت‌پذیر ۱×۱ است که در شکل۲ نشان داده شده است. هزینه کوانتومی و تأخیر آن برابر یک است[۹,۸]. علاوه بر این، جدول درستی گیت برگشت‌پذیر NOT در جدول ۱ ارائه‌شده است. همچنین پیچیدگی سخت‌افزاری آن برابر $\gamma 1$ است.



شکل ۲: نماد گیت NOT برگشت‌پذیر ۱×۱

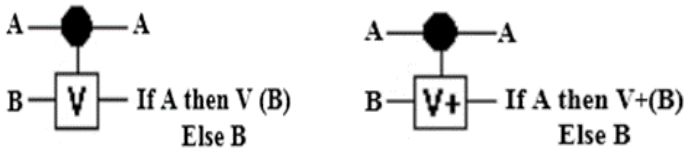
Figure 2. 1x1 reversible NOT notation

جدول ۱: جدول درستی گیتNOT

Table 1. GetNOT correctness table

A	P
0	2
1	1
2	0

ب- گیت کنترل‌شده V و کنترل‌شده +V : گیت کنترل‌شده V و کنترل‌شده +V، گیت‌های برگشت‌پذیر ابتدایی ۲×۲ هستند که در شکل ۳ نشان داده‌شده‌اند [۱۰,۱۱].



(a) (b)

شکل ۳: (a): گیت V، (b): گیت +V

Figure 3. (a) gate V, (b) gate V+

ماتریس‌هایV و+V به ترتیب در معادله‌های زیر نشان داده‌شده‌اند [۱۲-۱۴]:

$$V = \frac{1+i}{2}\begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

ماتریس‌هایV و+V دارای خواص زیر می‌باشند که در روابط زیر آورده شده است[۱۰, ۱۱]:

$$V^{+} = \frac{1-i}{2}\begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$V \times V = NOT \quad (۴)$$

$$V^{+} \times V = V \times V^{+} = I \quad (۵)$$

$$V^{+} \times V^{+} = NOT \quad (۶)$$

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، اگر ورودی کنترل برابر مقدار دو باشد (A=2)، گیت‌هایV و+V به‌ترتیب خروجی‌های Q برابر با V(B) و V+(B) را نتیجه خواهند داد. در غیر این صورت، مقدار ورودی هدف B بدون تغییر به خروجی‌های Q منتقل می‌گردد. هزینه کوانتومی و تأخیر این گیت‌ها برابر یک است.

۳-الگوریتم خفّاش جهت‌دار(DBA)[1]

الگوریتم‌های متاهیوریستیک که عموماً الهام گرفته شده از طبیعت و فرآیندهای فیزیکی هستند، در حال حاضر به‌عنوان یکی از رویکردهای قدرتمند برای حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی پیچیده به کار گرفته می‌شوند. الگوریتم خفاش الهامی از

[1] Directional Bat Algorithm

خصوصیت‌های ردیابی خفاش‌های کوچک در جستجوی شکار است که حدود یک دهه قبل[۱۵] معرفی شد، به‌طوری‌که خفاش‌های کوچک می‌توانند در تاریکی مطلق با انتشار صدا و دریافت آن به شکار طعمه‌های خود بپردازند. برای توسعه این الگوریتم از سه قانون اساسی زیر استفاده می‌شود[۱۶]:

همه خفاش‌ها از انعکاس صدا برای تشخیص فاصله استفاده می‌کنند و تفاوت بین مواد غذایی و موانع پیشرو را می‌دانند.

پرواز خفاش‌ها به‌طور تصادفی با سرعت vi در مکان xi با فرکانس ثابت fmin و طول‌موج مختلف λ و بلندی صوت A0 به‌منظور شکار طعمه صورت می‌گیرد. همچنین آن‌ها می‌توانند به‌طور خودکار امواج پخش‌شده و نرخ پالس‌های ارسالی خود را در $2r \in [0,1]$ با توجه به نزدیکی شکارشان تنظیم کنند.

با توجه به این‌که ممکن است بلندی صدا در بسیاری از جهت‌های مختلف متفاوت باشد، لذا فرض می‌کنیم که بلندی صدا از R۰ تا Rmin متغیر است.

DBA توسط چاکری و همکاران به‌منظور افزایش قابلیت اکتشاف و بهره‌برداری الگوریتم ارائه شده در [۱۵] پیشنهاد شده است. فرض می‌کنیم که تمامی خفاش‌ها یک پالس صوتی را در جهت بهترین موقعیت خفاش (جواب) که در آن غذا در نظر گرفته شده است و پالس دیگر را در جهت خفاش به‌تصادف انتخاب‌شده منتشر کنند. از انعکاس صدا متوجه می‌شوند که آیا غذا در اطراف این دو خفاش وجود دارد یا نه. بهترین موقعیت خفاش توسط مقدار شایستگی (مقدار هدف) تعیین می‌شود. درحالی‌که در اطراف خفاشی که به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده به مقدار شایستگی بستگی دارد، اگر مقدار شایستگی بهتری به‌عنوان خفاش فعلی داشته باشد، آنگاه غذا وجود دارد و خفاش در جهتی به حرکت خود ادامه می‌دهد که غذا فراوان‌تر باشد. در غیر این‌صورت خفاش فعلی در جهت بهترین موقعیت خفاش حرکت می‌کند. لذا، حرکت خفاش‌ها به‌صورت زیر است:

$$x_i^{(t+1)} = \begin{cases} x_i^{(t)} + \left(x^* - x_i^{(t)}\right) f_1 + \left(x_k^{(t)} - x_i^{(t)}\right) f_2 & , \quad F(x_k^{(t)}) < F(x_i^{(t)}) \\ x_i^{(t)} + \left(x^* - x_i^{(t)}\right) f_1 & , \quad F(x_k^{(t)}) \geq F(x_i^{(t)}) \end{cases} \qquad (۱)$$

که در آن x* بهترین موقعیت خفاش است و برای هر $k \neq i$ ، $x_k^{(t)}$ موقعیت خفاش تصادفی است. همچنین مقدار شایستگی هر خفاش را با F نشان داده می‌شود؛ f1 وf2 فرکانس‌های مربوط به دو پالس می‌باشند و به‌صورت زیر به‌روزرسانی می‌شوند:

$$\begin{cases} f_1 = f_{\min} + \left(f_{\max} - f_{\min}\right)\beta_1 \\ f_2 = f_{\min} + \left(f_{\max} - f_{\min}\right)\beta_2 \end{cases} \qquad (۸)$$

که در آن $\beta_1, \beta_2 \in [0,1]$ دو بردار تصادفی با توزیع یکنواخت می‌باشند. در الگوریتم DBA در هر تکرار، در جستجوی محلی یکی از جواب‌ها به‌عنوان بهترین جواب انتخاب‌شده و موقعیت جدید هر خفاش به‌طور محلی با گام تصادفی به‌صورت زیر به‌روز می‌شود:

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \left\langle A_i^{(t)} > \varepsilon w_i^{(t)} \right\rangle \qquad (۹)$$

که در آن $\varepsilon \in [0.1]$ یک بردار تصادفی بوده و $\left\langle A_i^{(t)} \right\rangle$ میانگین بلندی صدای خفاش‌ها در تکرار t است. همچنین $w_i^{(t)}$ پارامتری برای کنترل جستجو است. این پارامتر به‌صورت زیر است:

$$w_i^{(t)} = \left[\frac{w_{i0} - w_{i\infty}}{1 - t_{\max}}\right].\left(t - t_{\max}\right) + w_{i\infty} \qquad (۱۰)$$

که در آن w_{i0} و $w_{i\infty}$ به‌ترتیب مقادیر اولیه و مقادیر نهایی می‌باشند و به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} w_{i0} = \dfrac{Ub_i - Lb_i}{4} \\ w_{i\infty} = 0.01(w_{i0}) \end{cases} \qquad (۱۱)$$

بعلاوه t به‌عنوان تکرار فعلی و t_{max} حداکثر تعداد تکرارها است، از طرف Ub_i و Lb_i به‌ترتیب کران بالا و کران پایین هستند. افزایش یا کاهش یکنواختی پالس صوتی و بلندی صدا به‌صورت زیر است:

$$A_0 = 9,\ A_\infty = 0.6,\ r_0 = 0.1,\ r_\infty = 0.7 \qquad (۱۲)$$

به‌طوری‌که در الگوریتم DBA اندیس‌های 0 و ∞ نشـــان‌دهنده‌ی مقادیر اولیه و نهایی می‌باشـــند. بعلاوه، در الگوریتم DBA زمانی یک جواب جدید پذیرفته می‌شود که هم‌زمان دو شرط زیر برقرار باشند:
جواب فعلی باید مقدار تابع هدف کم‌تری نسبت به جواب قبلی داشته باشد.
مقدار عدد تصادفی تولید شده باید کم‌تر از بلندی صدای فعلی باشد.

۴-نتایج شبیه‌سازی

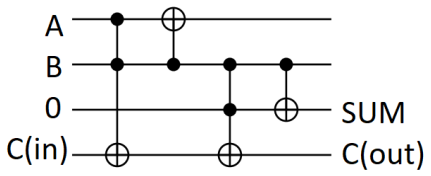
به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، معماری ارائه شده در بخش‌های قبل به کمک زبان برنامه‌نویسی پایتون که یک‌زبان همه‌منظوره و سطح بالاست پیاده‌سازی شد. جمعیت هر نسل در الگوریتم ژنتیک برابر ۸۰ و در الگوریتم خفاش برابر ۶۰ در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد نسل یا تعداد تکرار الگوریتم در هر دو الگوریتم برابر ۲۵۰ در نظر گرفته شده است. نرخ جهش در الگوریتم ژنتیک برابر ۰.۲ قرار داده شده است.
به‌منظور انجام ارزیابی، مسئله مکمل-۲ و همچنین یک تمام جمع کننده در نظر گرفته شده است. به‌منظور ارزیابی، مسئله مکمل-۲ و یک تمام جمع‌کننده به‌عنوان دو مدار کلیدی در نظر گرفته شده‌اند. مکمل-۲ روشی برای نمایش اعداد منفی در سیستم‌های باینری است که با معکوس کردن بیت‌ها و افزودن ۱ به کمترین بیت انجام می‌شود و در عملیات تفریق و نمایش اعداد منفی کاربرد دارد. تمام جمع‌کننده نیز مداری است که سه بیت ورودی (دو بیت اصلی و یک بیت حمل) را دریافت کرده و دو خروجی مجموع و حمل[1] تولید می‌کند [۱۷]. این دو مدار در طراحی مدارهای برگشت‌پذیر که هدف آن‌ها کاهش اتلاف اطلاعات و بهینه‌سازی مصرف انرژی است، مورد استفاده قرار می‌گیرند و به دلیل کاربرد گسترده در محاسبات دیجیتال، بهینه‌سازی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۸]. این دو مسئله به‌صورت جداول درستی نشان داده شده در جداول ۲ و ۳ کدگذاری شده و در حالت‌های مختلف الگوریتم سنتز اجرا شده و نتایج آن در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲: جدول درستی مکمل-۲
Table 2. Supplemental correctness table-2

2's Complement	1's Complement	Binary Input
11	11	00
11	10	01
10	01	10
01	00	11

جدول ۳: جدول درستی تمام جمع کننده
Table 3. The correctness table of the whole adder

Carry (Cout)	Sum (S)	Cin	B	A
0	0	0	0	**0**
0	1	1	0	0
0	1	0	1	0
1	0	1	1	0
0	1	0	0	1
1	0	1	0	1
1	0	0	1	1
1	1	1	1	1



شکل ۴: نمونه خروجی تمام جمع کننده با روش پیشنهادی
Figure 4. Sample output of all adder with the proposed method

[1] Carry

جدول ۴: نتایج مکمل-۲

Table 4. Supplementary results-2

Synthesis method	Delay	Redundant output number	Fixed number of inputs	The number of gits	Quantum cost
Genetic Algorithm	20	0	0	10	**25**
Bat Algorithm	14	1	1	11	**22**
Proposed Method (combined)	12	1	1	12	**19**

جدول۵: نتایج تمام جمع کننده

Table 5. The results of all the adders

Synthesis method	Delay	Redundant output number	Fixed number of inputs	The number of gits	Quantum cost
Genetic Algorithm	166	18	12	23	**104**
Bat Algorithm	140	15	12	23	**98**
Proposed Method (combined)	112	9	11	24	**98**

در مقایسه با روش‌های موجود برای سنتز خودکار مدارات برگشت‌پذیر، از نظر تعداد خروجی زائد همواره نتیجه بهتری دارد و از نظر بدترین حالت مشابه روش‌های موجود عمل می‌کند . لذا به‌طورکلی با توجه به‌سرعت همگرایی بالای روش متاهیوریستیک ترکیبی که پیشنهاد شده است، می‌توان روش پیشنهادی را روشی دانست که با سرعت بیشتری به مدار نهایی موردنظر می‌رسد و کیفیت مدار سنتز شده با سایر روش‌ها قابل‌رقابت است.

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بر روی ارائه یک روش کلی سنتز بهینه‌ی مدارهای برگشت‌پذیر به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چند مقدارِ متمرکز شده‌ایم. روش پیشنهادی به‌صورت ترکیبی از دو الگوریتم شناخته‌شده‌ی ژنتیک و خفاش ارائه شد. نتایج پیاده‌سازی نشان‌دهنده‌ی برتری مطلق روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و خفاش به‌طور جداگانه دارد. جز در مورد تعداد گیت‌های مورد استفاده در مدار نهایی سنتز شده برای حالت مکمل-۲، که روش پیشنهادی تنها یک گیت اضافه نسبت به حالت تکی الگوریتم‌ها دارد، سایر نتایج عددی برتری این روش در سنتز خودکار و بهینه‌ی مدارهای برگشت‌پذیر را نشان می‌دهد. بصری‌سازی و نمایش مدارهای سنتز شده، استفاده از سایر گیت‌های برگشت‌پذیر موجود و همچنین استفاده از روش‌پیشنهادی در سنتز مدارهای برگشت‌پذیر در مرتبه‌های بالاتر (منطق سه ارزشی، چهار ارزشی و غیره) را نیز می‌توان به‌عنوان کارهای آتی این پژوهش مدنظر قرار داد.

مراجع

[1] R. Wille, M. Soeken, D.M. Miller, and R. Drechsler, “circuit lines and gate costs in the synthesis of reversible logic,” *Integration*, vol. 48, pp. 284-294, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.vlsi.2013.08.002.

[2] P. W. Shor, “Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer,” *SIAM J. Sci. Statist. Comput.* , vol. 41, pp. 303-332, 1999, doi: 10.1137/S0097539795293172.

[3] A. M. Steane, “Error Correcting Codes in Quantum Theory,” *Physical Review Letters*, vol. 77, pp.793-797, July 1996, doi: 10.1103/PhysRevLett.77.793.

[4] R. Wille and R. Drechsler, “BDD-based synthesis of reversible logic for large functions,” *46th ACM/IEEE Design Automation Conference*, 2009, pp. 270-275, doi: 10.1145/1629911.1629984.

[5] C. P. Williams and A. G. Gray, “Automated Design of Quantum Circuits,” *NASA International Conference on Quantum Computing and Quantum Communications (Springer)*, pp. 113-135, 1999, doi: 10.1007/3-540-49208-9_8.

[6] S. A. Mirjalili, “Evolutionary Algorithms and Neural Networks Theory and Applications,” *Springer,* vol. 780, pp. 43-55, 2019.

[7] M. Kumar, M. Husain, N. Upreti, and D. Gupta, "Genetic Algorithm: Review and Application," *International Journal of Information Technology and Knowledge Management* vol. 2, no. 2, pp. 451-454, 2010.

[8] H. Thapliyal and N. Ranganathan, "Design of Reversible Latches Optimized for Quantum Cost, Delay and Garbage Outputs," *23rd International Conference on VLSI Design*, 2010, pp. 235-240, doi: 10.1109/VLSI.Design.2010.74.

[9] H. Thapliyaland and N. Ranganathan, "Design of reversible sequential circuits optimizing quantum cost, delay, and garbage outputs," *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 1-31, Dec. 2010, doi: 10.1145/1877745.1877748.

[10] B. Sen, M. Dutta, S. Some, and B. K. Sikdar, "Realizing Reversible Computing in QCA Framework Resulting in Efficient Design of Testable ALU," *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1-22, Dec. 2014, doi: 10.1145/2629538.

[11] A. Barenco, C. H. Bennett, R. Cleve, D. P. DiVincenzo, N. Margolus, P. Shor, T. Sleator, J. Smolin, and H. Weinfurter, "Elementary gates for quantum computation," *Physical Review Letters*, vol. 52, pp. 34-57, Mar. 1995, doi: 10.1103/PhysRevA.52.3457.

[12] W. N. N. Hung, Xiaoyu Song, Guowu Yang, Jin Yang, and M. Perkowski, "Optimal synthesis of multiple output Boolean functions using a set of quantum gates by symbolic reachability analysis," in *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 25, no. 9, pp. 1652-1663, Sept. 2006, doi: 10.1109/TCAD.2005.858352.

[13] M. Morrison, "Design of a reversible ALU based on novel reversible logic structures," University of South Florida, 2012.

[14] J. A. Smolin and D. P. DiVincenzo, "Five two-bit quantum gates are sufficient to implement the quantum Fredkin gate," *Physical Review A*, vol. 53, pp. 28-55, Apr. 1996, doi: 10.1103/PhysRevA.53.2855.

[15] X. S. Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm," *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)-Springer*, vol. 284, pp. 65-74, 2010, doi:10.1007/978-3-642-12538-6_6.

[16] R. Seyghaly, J. Garcia, X. Masip-Bruin, and M. M. Varnamkhasti, "Interference Recognition for Fog Enabled IoT Architecture using a Novel Tree-based Method," *IEEE International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/COINS54846.2022.9854944.

[17] A. Ghorbani, M. Dolatshahi, S. M. Zanjani, and B. Barekatain, "A new low-power Dynamic-GDI full adder in CNFET technology," *Integration*, vol. 83, pp. 46–59, Mar. 2022, doi: doi: 10.1016/j.vlsi.2021.12.001.

[18] A. Ghorbani, Mehdi Dolatshahi, S. Mohammadali Zanjani, and Behrang Barekatain, "A New Low Power, Area Efficient 4-bit Carry Look Ahead Adder in CNFET Technology," *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 65–73, Mar. 2022, doi: 10.52547/mjee.16.1.65.

JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1342

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

A Legal and Security Study on Data Privacy in Smart Cities with a Focus on IoT and Blockchain

Ghazaleh Shahinzadeh[1*] | Khodadad Khodadadi Dashtaki[2] | Zahra Moradi[3] | S. Mohammadali Zanjani[4-5]

[1] Faculty of Law and Social Sciences, Payame Noor University, Isfahan, Iran, ghazaleh.shahinzadeh@isfahan.pnu.ac.ir

[2]Department of Law, Faculty of Law and Social Sciences, Payam Noor University, Tehran, Iran, khodadadi.kh@pnu.ac.ir

[3]Faculty member of Department of Law, Faculty of Law and Social Sciences, Payam Noor University, Tehran, Iran. zahramoradi_80@pnu.ac.ir

[4] Department of Electrical Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran. smazanjani@iau.ac.ir

[5]Smart Microgrid Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Correspondence
Ghazaleh Shahinzadeh, M.Sc., Faculty of Law and Social Sciences, Payame Noor University, Isfahan, Iran.
Email: ghazaleh.shahinzadeh@isfahan.pnu.ac.ir

Main Subjects:
Smart City

Paper History:
Received: 10 August 2024
Revised: 5 September 2024
Accepted: 15 September 2024

Abstract

The advancement of smart cities and the expansion of the Internet of Things (IoT), along with the need to reduce energy consumption in green smart cities, signify a revolution in urban planning and management. Despite social improvements and increased efficiency, these advancements bring new challenges, particularly in the realm of security and privacy protection. The widespread use of sensors and smart devices leads to the collection and processing of vast amounts of data, which, if mismanaged, can pose significant threats to data security and individual privacy. Blockchain, as an emerging technology, offers new capabilities for enhancing security and privacy. This study conducts a detailed examination of the impact of existing policies and laws on security and privacy in smart cities and analyzes the role of IoT and blockchain technologies in improving these areas. It also explores the security and privacy challenges and the integration of these technologies into urban management. This research aims to optimize the use of modern technologies while ensuring the security and privacy of citizens in smart cities, thereby enhancing overall efficiency and public welfare while safeguarding citizens' privacy rights.

Keywords: Blockchain, Data security, Internet of Things, Privacy, Smart cities.

Highlights

- Analysis of data privacy and security challenges in the context of IoT and blockchain technologies in smart cities.
- In-depth examination of legal frameworks governing data protection and privacy in urban environments.
- Proposal of blockchain as a solution for addressing privacy concerns in IoT ecosystems within smart city infrastructure.
- Case study focusing on smart city legal and regulatory environments, with a spotlight on Iranian data protection laws.

Citation: Gh. Shahinzadeh, K. K. Dashtaki, Z. Moradi, S.M. Zanjani, "A Legal and Security Study on Data Privacy in Smart Cities with a Focus on IoT and Blockchain," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 90-115, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1342 [in Persian].

1. Introduction

With the rapid acceleration of urbanization, smart cities have emerged as pivotal factors in transforming urban spaces. These cities, leveraging advanced technologies such as the Internet of Things (IoT) and big data analytics, bring significant improvements to the quality of life for citizens. Urban experts and planners are integrating cutting-edge technologies, including cloud computing and sensors, to redesign urban infrastructures for comprehensive and multidimensional interaction with smart networks [1].

Recent research highlights that cities such as London, New York, and Paris are increasingly embracing smart transformations. These developments involve building new infrastructure and enhancing existing assets and networks [2]. Moreover, the Indian government has launched a plan to develop 100 smart cities aimed at driving economic growth through technological solutions for citizen engagement. Similarly, China is adopting a government-driven approach to implementing smart cities, resulting in enhanced economic structures and increased labor competitiveness [3].

Global spending on smart city projects is estimated to be approximately $81 billion, with projections to rise to $1.91 trillion by 2030. Key technologies deployed in these cities include cloud computing, IoT, and networks of sensors. However, the transformation of existing infrastructures and the management of new citizen interactions present significant challenges for governments and local authorities, particularly in political, regulatory, and technical domains [4]. As smart cities evolve and IoT expands, security and privacy issues have become increasingly prominent. The use of advanced technologies, such as IoT and big data analytics, necessitates a strong focus on information security and privacy protection [5].

While existing research emphasizes the development of smart cities, comprehensive analyses of data security threats and privacy complexities appear to be lacking. The primary objective of this study is to address this gap by providing an in-depth analysis of the issues and challenges related to privacy and security in smart cities [6]. Data security in the face of cyber threats and unauthorized access is considered one of the most critical and sensitive challenges [7-9]. This paper aims to cover the existing gap by conducting a thorough examination of the threats and complexities associated with data security and privacy and addressing essential questions regarding how these issues should be managed in the digital age [10]. In this context, the present study evaluates the existing legal and regulatory frameworks and analyzes their effectiveness in coping with emerging technologies and innovative approaches, aiming to strike a balance between technological advancement and individual rights.

2. Innovation and contributions

The novelty of this research lies in its interdisciplinary approach, bridging the gap between computer science and legal studies to tackle privacy and security issues in smart cities. First, it provides a critical assessment of how blockchain technology, when integrated with IoT infrastructures, can mitigate privacy concerns through decentralized transparent data management. Unlike existing centralized systems, blockchain enhances trust among stakeholders by enabling secure, immutable data exchanges without a need for third-party intermediaries. Second, this study introduces a legal-technical framework that evaluates current privacy regulations—such as GDPR, CCPA, and sector-specific data protection laws—within the context of smart city ecosystems. It assesses whether these regulations are sufficient to address the complex privacy and security challenges posed by IoT networks and proposes enhancements that could better align with the rapidly evolving digital environment. Finally, this paper's contribution extends to a case study on the Iranian legal landscape, offering a unique perspective on how developing nations are navigating the balance between urban innovation and citizen data protection. By examining the legal efficacy of Iranian data protection policies, the study highlights the global relevance of these challenges and offers tailored solutions for emerging smart cities around the world.

3. Materials and Methods

This research employs a combination of legal analysis, case studies, and technical assessments to evaluate the data privacy implications of IoT and blockchain integration in smart cities. From a legal perspective, the study conducts a doctrinal analysis of key international and national privacy frameworks, including GDPR, CCPA, and Iran’s data protection laws. It examines how these regulations govern data collection, storage, and dissemination in smart city contexts and explores potential gaps in their application, particularly concerning IoT and blockchain technologies. Furthermore, the study reviews court cases, regulatory enforcement actions, and policy documents to assess the real-world application of these legal frameworks. Technologically, the paper uses system security evaluation methodologies to assess blockchain’s ability to enhance data protection in IoT networks. This involves the examination of cryptographic techniques, data hashing, consensus protocols, and smart contracts that form the core of blockchain security model. The effectiveness of blockchain in mitigating threats such as unauthorized access, data breaches, and privacy violations within smart city networks is critically analyzed. The research also includes a comparative case study on Iran’s smart city initiatives, focusing on legal frameworks and their interaction with technological innovation. This case study highlights the regional differences in regulatory approaches and the potential for international harmonization of privacy standards in the context of global urban development.

4. Results and Discussion

The results of the legal analysis indicate that existing privacy laws, such as GDPR and CCPA, are insufficient to fully address the privacy risks posed by IoT devices in smart cities. These frameworks often focus on centralized systems, which fail to account for the decentralized, distributed nature of IoT networks. For instance, while GDPR emphasizes data minimization and purpose limitation, IoT systems continuously collect and process vast amounts of data, making compliance with these principles challenging. From a technological standpoint, blockchain shows promise in mitigating some of the security challenges associated with IoT data management. The use of cryptographic protocols ensures that data transmitted within a smart city environment is encrypted and verified, reducing the risk of data breaches. Moreover, the blockchain decentralized nature aligns with the distributed architecture of IoT systems, enhancing data integrity and security. However, the study also identifies scalability and latency as potential limitations of blockchain technology in large-scale urban environments. The Iranian case study reveals that the country's current data protection frameworks are underdeveloped in comparison to international standards. Although recent legislative initiatives, such as the Data Protection and Privacy in Cyberspace Bill, show progress, significant gaps remain in the enforcement and regulatory oversight of data privacy in smart cities. The integration of blockchain technologies into Iranian smart city projects offers a pathway to enhancing citizen trust, but it will require substantial legal reforms to ensure compliance with global privacy norms.

5. Conclusion

The examination of security and privacy issues in smart cities and the proposal of improvement strategies reveal that, with the advancement of technology and the expansion of smart cities, data security and the protection of individual privacy have become critical challenges in these environments. These issues encompass unauthorized access to data, cyber threats, and privacy violations, which require innovative and effective solutions for resolution. To enhance security and privacy in smart cities, several measures are essential, including the reform and improvement of relevant laws and regulations, the development of appropriate technological infrastructure, education and awareness for citizens, and collaboration between institutions and industries. Moreover, leveraging modern technologies such as the IoT and blockchain can significantly improve data security and privacy protection in smart cities. The effective implementation of these solutions, alongside the coordination of various institutions and industries, can pave the way for building smart cities with a high level of security and privacy. Therefore, a thorough analysis of these issues and the presentation of improvement solutions will contribute to the progress and development of smart urban environments, enhancing citizen satisfaction within these cities.

6. Acknowledgement

We want to extend our sincere gratitude to the editorial board of "The Journal of Southern Communication Engineering" for providing the opportunity to publish this article.

References

[1] F. Moqaddari, "Redefining the concept of smart cities and the process of urban smartification based on the conceptual and functional evolution of smart cities," *Urban Design Discourse; Review of Contemporary Literature and Theories*, vol. 1, no. 2, 2020 (in Persian).

[2] H. M. Kim, S. Sabri, and A. Kent, "Smart cities as a platform for technological and social innovation in productivity, sustainability, and livability: A conceptual framework," in *Smart Cities for Technological and Social Innovation*, Academic Press, 2021, pp. 9–28, doi: 10.1016/b978-0-12-818886-6.00002-2.

[3] A. Randhawa and A. Kumar, "Exploring sustainability of smart development initiatives in India," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, no. 2, pp. 701–710, 2017, doi: 10.1016/j.ijsbe.2017.08.002.

[4] M. Whaiduzzaman, A. Barros, M. Chanda, S. Barman, T. Sultana, M. S. Rahman, and C. Fidge, "A review of emerging technologies for IoT-based smart cities," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9271, 2022, doi: 10.3390/s22239271.

[5] A. Venkatesh and M. S. Eastaff, "A study of data storage security issues in cloud computing," *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1741–1745, 2018, doi: 10.9756/bijsesc.9012.

[6] M. Sookhak, H. Tang, Y. He, and F. R. Yu, "Security and privacy of smart cities: a survey, research issues and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1718–1743, 2018, doi:

10.1109/comst.2018.2867288.

[7] B. Hammi, R. Khatoun, S. Zeadally, A. Fayad, and L. Khoukhi, "IoT technologies for smart cities," *IET Networks*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1049/iet-net.2017.0163.

[8] M. H. P. Rizi and S. A. H. Seno, "A systematic review of technologies and solutions to improve security and privacy protection of citizens in the smart city," *Internet of Things*, vol. 20, p. 100584, 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100584.

[9] L. D. Radu, "Disruptive technologies in smart cities: a survey on current trends and challenges," *Smart Cities*, vol. 3, no. 3, pp. 1022–1038, 2020, doi: 10.3390/smartcities3030051.

[10] E. Ismagilova, L. Hughes, N. P. Rana, and Y. K. Dwivedi, "Security, privacy and risks within smart cities: Literature review and development of a smart city interaction framework," *Information Systems Frontiers*, pp. 1–22, 2022, doi: 10.1007/s10796-020-10044-1.

Declaration of Competing Interest: Authors do not have conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Ghazaleh Shahinzadeh: literature review, data analysis, and manuscript writing; **Khodadad Khodadadi Dashtaki**: Supervision; **Zahra Moradi**: Supervision; **S. Mohammadali Zanjani**: manuscript editing.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1342

مقاله مروری

مطالعه حقوقی و امنیتی حریم خصوصی داده‌ها در شهرهای هوشمند با تمرکز بر اینترنت اشیا و بلاک‌چین

غزاله شاهین زاده*[۱] | خداداد خدادادی دشتکی[۲] | زهرا مرادی[۳] | سیدمحمدعلی زنجانی[۴-۵]

[۱]دانشکده حقوق و علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، اصفهان، ایران.
ghazaleh.shahinzadeh@isfahan.pnu.ac.ir
[۲]گروه حقوق، دانشکده حقوق و علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
khodadadi.kh@pnu.ac.ir
[۳]گروه حقوق، دانشکده حقوق و علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
zahramoradi_80@pnu.ac.ir
[۴]دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
smazanjani@iau.ac.ir
[۵]مرکز تحقیقات ریزشبکه های هوشمند، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

نویسنده مسئول:
* غزاله شاهین زاده ، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده حقوق و علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، اصفهان، ایران.
ghazaleh.shahinzadeh@isfahan.pnu.ac.ir

موضوع اصلی:
شهرهای هوشمند

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۲۰ مردادماه ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۵ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۲۵ شهریور ۱۴۰۳

چکیده:

پیشرفت شهرهای هوشمند و گسترش اینترنت اشیا، به همراه نیاز به کاهش مصرف انرژی در شهرهای هوشمند سبز، نمایانگر یک انقلاب در شهرسازی و مدیریت شهری است. با وجود بهبودهای اجتماعی و افزایش کارایی، این پیشرفت‌ها چالش‌های جدیدی به‌خصوص در زمینه امنیت و حفظ حریم خصوصی به همراه دارند. استفاده بیش‌ازپیش از حسگرها و دستگاه‌های هوشمند، منجر به جمع‌آوری و پردازش حجم زیادی از اطلاعات شده است که در صورت مدیریت نامناسب، می‌تواند به تهدیدی برای امنیت داده‌ها و حریم خصوصی افراد تبدیل شود. بلاک‌چین به‌عنوان یک فناوری نوین، قابلیت‌های جدیدی برای افزایش امنیت و حفظ حریم خصوصی ارائه می‌دهد. این تحقیق به بررسی دقیق تأثیر سیاست‌ها و قوانین موجود بر امنیت و حریم خصوصی در شهرهای هوشمند پرداخته و نقش فناوری‌های اینترنت اشیا و بلاک‌چین را در بهبود این زمینه‌ها تحلیل می‌کند. همچنین چالش‌های امنیتی و حریم خصوصی و نحوه ادغام این فناوری‌ها در مدیریت شهری موردبررسی قرارگرفته است. هدف این تحقیق، استفاده بهینه از فناوری‌های نوین و حفظ امنیت و حریم خصوصی شهروندان در شهرهای هوشمند است، تا به این وسیله کارایی و رفاه عمومی ارتقا یابد و حقوق حریم خصوصی شهروندان محافظت شود.

کلیدواژه‌ها: امنیت داده، اینترنت اشیا، بلاک‌چین، حفظ حریم خصوصی، شهرهای هوشمند.

تازه‌های تحقیق:

- تحلیل چالش‌های حفظ حریم خصوصی و امنیت داده‌ها در بستر اینترنت اشیا و فناوری بلاک‌چین در شهرهای هوشمند.
- بررسی عمیق چارچوب‌های حقوقی حاکم بر حفاظت از داده‌ها و حریم خصوصی در محیط‌های شهری.
- پیشنهاد به‌کارگیری بلاک‌چین به‌عنوان راه‌حلی برای رفع نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی در اکوسیستم‌های اینترنت اشیا در زیرساخت‌های شهرهای هوشمند.
- مطالعه موردی با تمرکز بر وضعیت حقوقی و مقرراتی شهرهای هوشمند، با تأکید ویژه بر قوانین حفاظت از داده‌ها در ایران.

۱-مقدمه

با پیشرفت سریع فرآیند شهرنشینی، شهرهای هوشمند به‌عنوان عوامل اساسی در تغییر و تحول فضاهای شهری مطرح هستند. این شهرها با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا و تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ، بهبود قابل‌توجهی را در کیفیت زندگی شهروندان به ارمغان می‌آورند. کارشناسان شهری و برنامه‌ریزان با تلفیق فناوری‌های نوین از جمله محاسبات ابری و حسگرها، زیرساخت‌های شهری را به‌منظور ایجاد تعامل جامع و چندبعدی با شبکه‌های هوشمند بازطراحی می‌کنند [۱].

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که در سطح جهان، شهرهایی از جمله لندن، نیویورک و پاریس، به‌سوی تحولات هوشمند گرایش پیدا کرده‌اند. این تحولات شامل توسعه زیرساخت‌های جدید و بهبود دارایی‌ها و شبکه‌های موجود می‌شود [۲]. همچنین، دولت هند به‌منظور ایجاد رشد اقتصادی از طریق راه‌حل‌های فناورانه برای تعامل با شهروندان برنامه‌ای را برای توسعه ۱۰۰ شهر هوشمند تدوین کرده است. همچنین، چین از یک رویکرد دولت‌محور برای راه‌اندازی شهرهای هوشمند بهره‌می‌برد که منجر به بهبود ساختارهای اقتصادی و افزایش رقابت‌پذیری نیروی کار می‌شود [۳].

هزینه‌های جهانی مرتبط با پروژه‌های شهرهای هوشمند حدود ۸۱ میلیارد دلار برآورد شده است و انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۲۲ به ۱۵۸ میلیارد دلار افزایش یابد. از جمله فناوری‌های استفاده شده در این شهرها می‌توان به محاسبات ابری، اینترنت اشیا، شبکه و حسگرها اشاره کرد. با این‌حال، تبدیل زیرساخت‌های موجود و مدیریت تعاملات جدید شهروندان، چالش‌های قابل‌توجهی را برای دولت‌ها و مقامات محلی، به‌ویژه در زمینه‌های سیاسی، نظارتی و فنی ایجاد می‌کند [۴].

در جریان پیشرفت شهرهای هوشمند و گسترش اینترنت اشیا، مسائل امنیتی و حریم خصوصی به‌ویژه اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا و تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ، نیازمند توجه ویژه به امنیت اطلاعات و حفظ حریم خصوصی است [۵].

تحقیقات موجود بر موضوع شهرهای هوشمند تأکید دارند، اما به نظر می‌رسد که تحلیل‌های جامعی از تهدیدات امنیت داده‌ها و پیچیدگی‌های حریم خصوصی انجام نشده‌اند. هدف اصلی این تحقیق پر کردن این شکاف با انجام یک تحلیل جامع از مسائل و پیچیدگی‌های مرتبط با حریم خصوصی و امنیت در شهرهای هوشمند است [۶]. امنیت اطلاعات در مقابل تهدیدات سایبری و دسترسی‌های غیرمجاز، یکی از چالش‌های بزرگ و حساس محسوب می‌شود [۹-۷]. این مقاله قصد دارد با بررسیِ جامع تهدیدات و پیچیدگی‌های مرتبط با امنیت داده‌ها و حریم خصوصی، شکاف موجود را پوشش دهد و به سؤالات اساسی در مورد نحوه مدیریت این مسائل در عصر دیجیتال پاسخ دهد [۱۰].

در این راستا، مقاله حاضر به ارزیابی موجودیت چارچوب‌های قانونی و نظارتی پرداخته و به تحلیل کارایی آن‌ها در برابر فناوری‌های نوظهور و رویکردهای نوآورانه می‌پردازد تا بتوان به تعادلی میان پیشرفت و حقوق فردی دست یافت. در ادامه و در بخش دوم، چارچوب قانونی جمع‌آوری و استفاده از داده‌ها در شهرهای هوشمند مورد بررسی قرار می‌گیرد که شامل انواع داده‌های جمع‌آوری شده، چالش‌های حقوقی مرتبط با حفاظت از حریم خصوصی، و تأثیر مقررات قانونی بر حریم خصوصی است. سپس، در بخش سوم، پیشرفت‌های فناوری و چالش‌های امنیتی مرتبط با حفظ حریم خصوصی در شهرهای هوشمند (از جمله روش‌های جلوگیری از نفوذ، مدیریت داده‌های حساس، و استفاده از روش‌های رمزنگاری) بررسی می‌شوند. در بخش چهارم، اثربخشی قوانین و مقررات حفاظت از داده در شهرهای هوشمند ایران مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش پایانی، نتایج کلی از تحقیق و بررسی‌های انجام شده ارائه می‌شود و اهمیت این مطالعه برای درک بهتر چالش‌های حقوقی و امنیتی حریم خصوصی در شهرهای هوشمند بیان شده، پیشنهاداتی برای اقدامات آینده و توسعه مطالعات بیشتر در این زمینه ارائه می‌شود.

۲- چشم‌انداز حقوقی جمع‌آوری و استفاده از داده‌ها در شهرهای هوشمند

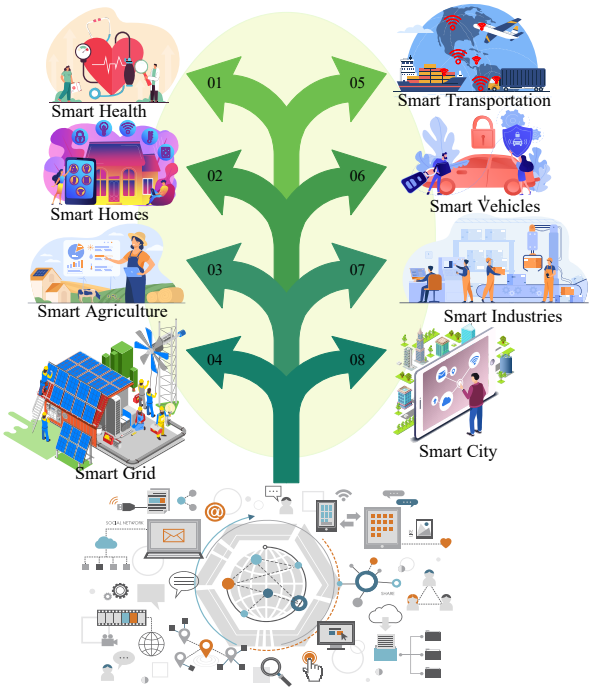
این بخش به بررسی چارچوب قانونی جمع‌آوری و استفاده از داده‌ها در شهرهای هوشمند می‌پردازد و به جوانب مختلفی که برای اطمینان از حفظ حقوق حریم خصوصی و امنیت داده‌ها اساسی است، می‌پردازد. ابتدا، انواع مختلف داده‌هایی که در شهرهای هوشمند جمع‌آوری می‌شود، از داده‌های حسگری تا داده‌های تولیدشده توسط شهروندان بررسی می‌شوند تا اهمیت گستردگی و عمق اطلاعات جمع‌آوری شده را برای امکان اجرای عملیات و خدمات شهری نشان دهد. سپس چالش‌های حقوقی مرتبط با حفاظت از حریم خصوصی و داده‌ها در شهرهای هوشمند و مسائلی مانند مالکیت داده‌ها، رضایت و شفافیت، و همچنین

پیچیدگی‌های اطمینان از رضایت در میان پیشرفته‌های فناوری سریع و مداوم بررسی می‌شوند. با شناسایی این موانع قانونی، سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان می‌توانند استراتژی‌های قوی را برای کاهش خطرات و حفظ استانداردهای حریم خصوصی در حالی توسعه دهند که از مزایای فناوری‌های شهر هوشمند بهره می‌برند.

در ادامه، تأثیر مقررات قانونی بر حفظ حریم خصوصی در شهرهای هوشمند بررسی می‌شود تا دلایل نیاز به چارچوب‌های قانونیِ واکنش‌گر، برای به‌روزرسانی پاسخ به تغییرات فناوری مورد تأکید واقع شود. با ارزیابی کارایی مفاد قانونی فعلی، بخش‌هایی شناسایی می‌شوند که نیاز به بهبود نوآوری‌های قانونی دارند تا حقوق و حریم خصوصی شهروندان در شهرهای هوشمند حفظ شود.

۲-۱- انواع داده‌های جمع‌آوری شده در شهر هوشمند

در شهرهای هوشمند، انواع گوناگونی از داده‌ها از طریق حسگرها، دستگاه‌ها و سامانه‌های متصل به یکدیگر جمع‌آوری می‌شوند. این داده‌ها شامل اطلاعات شخصی مانند هویت افراد، موضوعات موردعلاقه و رفتارها یا سبک زندگی است، همچنین داده‌های غیرشخصی مرتبط با زیرساخت‌های شهری، الگوهای ترافیکی، شرایط محیطی، کیفیت هوا، مدیریت پسماند و مصرف انرژی را نیز شامل می‌شوند [۱۱]. جمع‌آوری این داده‌های متنوع، سامانه‌های شهر هوشمند را قادر می‌سازد تا خدمات شهری را بهینه‌سازی کند، کارایی را افزایش دهد و کیفیت زندگی کلان شهروندان را بهبود بخشد. اطلاعات شخصی شامل داده‌هایی مانند هویت و رفتار افراد است که با آن‌ها مرتبط می‌شوند. این موارد شامل نام، آدرس، اطلاعات تماس، فعالیت‌های رسانه‌ای اجتماعی و حتی داده‌های بیومتریک می‌شود. اطلاعات شخصی اغلب از طریق منابع مختلفی مانند دستگاه‌های هوشمند، برنامه‌های تلفن همراه، دوربین‌های نظارتی و شبکه‌های وای-فای عمومی جمع‌آوری می‌شوند. جمع‌آوری و پردازش اطلاعات شخصی در شهرهای هوشمند برای اهداف مختلفی مانند ارائه خدمات شخصی‌سازی شده، تبلیغات هدفمند و نیز برنامه‌ریزی شهری بر اساس الگوهای رفتاری شهروندان انجام می‌شود. این فرآیند نیازمند توجه ویژه به مسائل امنیتی و حفاظت از حریم خصوصی شهروندان است تا در کنار توسعه شهرهای هوشمند، امنیت اطلاعات فراهم شود و حقوق شهروندان محفوظ باقی بماند [۱۲]. در شکل ۱ تصویری از انتقال داده‌ها در یک شهر هوشمند نمایش داده شده است.



شکل ۱: تصویری از انتقال داده‌ها در یک شهر هوشمند.

Figure 1. An Illustration of Data Transmission in a Smart City.

بااین‌حال، جمع‌آوری و پردازش داده‌های شخصی، موجب نگرانی‌های قابل‌توجهی درباره حفظ حریم خصوصی و استفاده ناصحیح یا دسترسی غیرمجاز به اطلاعات حساس می‌شود. از سوی دیگر، داده‌های غیرشخصی از طریق حسگرهای متعددی که در زیرساخت‌های شهری مانند روشنایی هوشمند معابر و خیابان‌ها، دوربین‌های ترافیک، ایستگاه‌های هواشناسی و سامانه‌های مدیریت پسماند نصب شده‌اند، جمع‌آوری می‌شوند. جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل داده‌های غیرشخصی نقش مهمی در بهینه‌سازی خدمات شهری، بهبود تخصیص منابع و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌ها برای برنامه‌ریزی و مدیریت شهری ایفا می‌کنند [۱۳].

۲-۲- چالش‌های حقوقی در حفاظت از حریم خصوصی و داده‌ها

جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و استفاده از داده‌ها در شهرهای هوشمند با مسائل قانونی و حریم خصوصی مهمی همراه است که باید به‌طورجدی مدنظر قرار گیرد. این مسائل شامل مواردی همچون مالکیت داده، رضایت، شفافیت، مسئولیت و امنیت می‌شوند. با وجود طبیعت یکپارچه و به‌هم‌پیوسته سامانه‌های شهر هوشمند و پیچیدگی اجرای قوانین و مقررات موجود، به‌ویژه درزمینه حمایت از حقوق حفاظت داده و حریم خصوصی، این چالش‌ها بیش‌ازپیش اهمیت پیدا می‌کنند [۱۴]. در جمهوری اسلامی ایران نیز، ملاحظات قانونی مرتبط با جمع‌آوری داده در شهرهای هوشمند باید با اصولی که در قانون اساسی و قوانین و مقررات مختلف حاکم بر حریم خصوصی و حفاظت داده تعریف شده‌اند، سازگاری داشته باشند. به‌عنوان‌مثال، مجموعه قوانین مدنی و قانون تجارت الکترونیکی، مقرراتی را در خصوص حریم خصوصی و حفاظت داده در معاملات الکترونیکی ارائه می‌دهند. همچنین، قانون حفاظت اطلاعات شخصی[۱] اصولی را برای جمع‌آوری، پردازش و ذخیره‌سازی داده‌های شخصی تعیین می‌کند و اهمیت اخذ رضایت افراد و تضمین امنیت داده‌ها را مورد تأکید قرار می‌دهد [۱۵]. در کشورهای دیگر نیز، مانند اتحادیه اروپا[۲]، قوانین حفاظت داده و حریم خصوصی نقش اساسی در جمع‌آوری و استفاده از داده‌ها در شهرهای هوشمند ایفا می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، قانون عمومی حفاظت داده[۳] یکی از تنظیمات مهم در اتحادیه اروپا است که چارچوب جامعی برای حفاظت از داده‌های شخصی فراهم می‌کند. در قوانین عمومی حفاظت داده، افراد بر روی داده‌های شخصی خود کنترل دارند و سازمان‌ها باید رضایت برای جمع‌آوری داده‌ها را به‌طور صریح کسب کنند و به افراد درباره هدف و مدت زمان پردازش داده‌ها اطلاع دهند [۱۶].

در ایالات متحده، قوانین متفاوتی مربوط به حفاظت از داده و حریم خصوصی در سطح فدرال و ایالتی وجود دارند که بر ارگان‌ها و سازمان‌ها اعمال می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، قانون حفاظت از حریم خصوصی سال ۱۹۷۴ یکی از قوانین اصلی در سطح فدرال است که محدودیت‌هایی بر جمع‌آوری، استفاده و افشای اطلاعات شخصی افراد را برای سازمان‌های فدرال تعیین می‌کند. همچنین، ایالت‌های مختلف نیز قوانین حفاظت از حریم خصوصی خود را دارند، از جمله قانون مصرف‌کننده کالیفرنیا[۴] و قانون حفاظت از داده مصرف‌کننده ویرجینیا[۵] که به افراد حقوقی خاص درباره داده‌های شخصی خود اعطا می‌کند و تعهداتی را برای کسب‌وکارها تحمیل می‌کند [۱۷]. در چین، قوانین حفاظت داده و حریم خصوصی عمدتاً تحت قوانین امنیت سایبری و دستورالعمل امنیت اطلاعات شخصی[۶] تنظیم می‌شوند. این قوانین از سازمان‌ها می‌خواهند که رضایت افراد را برای جمع‌آوری داده‌ها کسب کنند، تدابیر امنیتی برای حفاظت از اطلاعات شخصی اجرا کنند و انتقال داده‌ها به‌صورت چند سویه را محدود کنند. همچنین، دولت چین نقش مهمی در نظارت بر جمع‌آوری و استفاده از داده‌ها، به‌ویژه درزمینه امنیت ملی و منافع عمومی ایفا می‌کند [۱۸].

بااین‌وجود، در حوزه شهرهای هوشمند، با وجود چارچوب‌های قانونی برای نظارت بر جمع‌آوری داده‌ها و حفاظت از حریم خصوصی، چالش‌ها و بحث‌های فعالی وجود دارد. برقراری تعادل مناسب بین مزایای خدمات مبتنی بر داده و حقوق حریم خصوصی افراد نیازمند بحث و تبادل‌نظر مداوم بین سیاست‌گذاران، ارائه‌دهندگان فناوری و شهروندان است تا اطمینان حاصل شود که موازین قانونی و حریم خصوصی به‌طور کامل رعایت شده است.

---

[1] Personal Data Protection Law (PDPL)
[2] European Union (EU)
[3] General Data Protection Regulation (GDPR)
[4] California Consumer Privacy Act (CCPA)
[5] Consumer Data Protection Act (CDPA)
[6] Personal Information Security Structure (PISS)

۲-۳- تأثیر مقررات حقوقی بر حفظ حریم خصوصی

تأثیر قوانین مربوط به جمع‌آوری داده‌ها بر حفظ حریم خصوصی، رضایت عمومی شهروندان و شفافیت در شهرهای هوشمند بسیار حائز اهمیت است. این قوانین نقش بسزایی در تعیین نگرش و پذیرش طرح‌های شهر هوشمند ایفا می‌کنند. با اجرای قوانین و سازوکارهای مسئولیت، اعتماد به حفظ حقوق حریم خصوصی تقویت می‌شود و این موضوع، باعث افزایش اعتماد به پروژه‌های شهر هوشمند می‌شود. همچنین، افزایش شفافیت در مورد جمع‌آوری، پردازش و استفاده از داده‌ها به طریق معناداری به افزایش رضایت عمومی و پذیرش گسترده‌تر راه‌حل‌های شهر هوشمند کمک می‌کند [۱۹].

قوانین قوی مرتبط با جمع‌آوری داده‌ها می‌توانند به طرز چشمگیری بر اعتماد عمومی و مشارکت فعال در پروژه‌های شهر هوشمند اثرگذار باشند. این قوانین باعث می‌شوند شفافیت و مسئولیت در استفاده از داده‌ها در مرکز توجه قرار گیرند تا فناوری‌های شهر هوشمند به‌صورت مسئولانه و اخلاقی اجرا شوند. این تدابیر در نهایت منجر به بهبود خدمات شهری و افزایش آسایش شهروندان نیز می‌شوند. اگرچه جزئیات این قوانین ممکن است در کشورهای مختلف متفاوت باشند، اما هدف اساسی آن‌ها همواره ثابت است: حفاظت از حریم خصوصی، ترویج شفافیت و تضمین رضایت عمومی در استفاده از داده‌های شهر هوشمند [۲۰]. در جدول ۱، انواع داده‌های جمع‌آوری‌شده در شهر هوشمند، اهمیت، نقاط قوت و ضعف نفوذ اطلاعات، قوانین و پروتکل‌های استفاده‌شده در آن بخش و راهکارهای حفظ حریم خصوصی و امنیت داده‌ها مقایسه و بررسی شده‌اند.

۳- پیشرفت فناوری و چالش‌های امنیت حریم خصوصی در شهرهای هوشمند

۳-۱- نقش پروتکل‌های رمزنگاری در امنیت و حریم خصوصی داده‌های شهر هوشمند

در شهرهای هوشمند، استفاده از رمزنگاری و پروتکل‌های امنیتی برای داده‌ها امری حیاتی درجهت حفظ حریم خصوصی و محافظت از اطلاعات حساس است. رمزنگاری به معنای تبدیل داده‌ها به شکلی است که تنها با استفاده از یک کلید رمزگشایی، قابل دسترسی است. با بهره‌گیری از الگوریتم‌های قوی رمزنگاری، شهرهای هوشمند می‌توانند اطمینان حاصل کنند که داده‌های ارسالی و ذخیره شده در سامانه‌ها به‌طور محرمانه باقی می‌مانند و از دسترسی غیرمجاز محافظت می‌شوند. در این شهرها، از انواع مختلفی از پروتکل‌های رمزنگاری برای بهبود امنیت داده‌ها استفاده می‌شود [۲۱]. به‌عنوان‌مثال، از پروتکل امنیت لایه انتقال استفاده می‌شود که یک پروتکل پرکاربرد است و ارتباط امن را در شبکه‌ها فراهم می‌کند. این پروتکل، داده‌های ارسالی بین دستگاه‌ها یا برنامه‌ها را رمزنگاری می‌کند و از انشعاب و تغییر داده‌ها جلوگیری می‌کند. پروتکل لایه امنیتی سوکت‌های امن[1] نیز پروتکل دیگری است که به‌طور گسترده برای ایجاد اتصال امن بین یک مشتری و یک سرور استفاده می‌شود و اطمینان از صحت و محرمانگی داده‌ها را فراهم می‌کند [۲۲]. استفاده از پروتکل‌های رمزنگاری در شهرهای هوشمند به طرز قابل‌توجهی امنیت داده‌ها را تضمین می‌کند، اما لازم است به قواعد و ضعف‌های مرتبط با این پروتکل‌ها توجه کنیم. الگوریتم‌ها و پروتکل‌های رمزنگاری قوی می‌توانند اطلاعات را از دسترسی غیرمجاز محافظت کرده و حریم خصوصی را بهبود بخشند. بااین‌حال، پیچیدگی روش‌های رمزنگاری ممکن است به‌سرعت پردازش داده‌ها آسیب بزند. همچنین، اجرای دقیق و مدیریت صحیح پروتکل‌های رمزنگاری برای جلوگیری از آسیب و تأمین مدیریت امنیتی کلیدها امری حیاتی است [۲۳]. در کشورهای مختلف، جزئیات قوانین و مقررات مربوط به رمزنگاری ممکن است متفاوت باشد. برخی کشورها ممکن است نیازمندی‌های سخت‌گیرانه‌تری درباره رمزنگاری برای امنیت داده‌ها داشته باشند، درحالی‌که دیگران ممکن است به رویکردهای منعطف‌تری متوجه شوند. این فهم از تفاوت‌ها بسیار حیاتی است تا اجرای مؤثر پروتکل‌های رمزنگاری در شهرهای هوشمند، برای ایجاد تعادل بین امنیت داده‌ها و کارایی عملیاتی را فراهم کند.

[1] Secure Sockets Layer (SSL)

جدول ۱: انواع داده‌ها و اهمیت حفاظت از حریم خصوصی و امنیت داده‌ها در شهر هوشمند

Table 1. Types of Data and the Importance of Privacy and Data Security Protection in a Smart City

نوع داده	اهمیت	نقاط قوت	نقاط ضعف نفوذ اطلاعات	قوانین و پروتکل‌ها	راهکارهای حفظ حریم خصوصی و امنیت
داده‌های حمل‌ونقل (نظیر داده‌های ترافیکی، موقعیت وسایل نقلیه عمومی)	بهبود مدیریت ترافیک و کاهش ازدحام، افزایش کارایی سیستم حمل‌ونقل عمومی	تحلیل داده‌ها برای بهبود جریان ترافیک و کاهش زمان سفر	احتمال سرقت داده‌های موقعیت مکانی، حمله سایبری به سامانه‌های حمل‌ونقل	قانون عمومی حفاظت داده، قوانین محلی حمل‌ونقل	رمزنگاری داده‌ها، استفاده از پروتکل‌های امنیتی نظیر HTTPS، ایجاد سامانه‌های تشخیص نفوذ
داده‌های محیط‌زیست (نظیر کیفیت هوا، سطح نویز، دما)	پایش و بهبود کیفیت محیط‌زیست، ایجاد سیاست‌های زیست‌محیطی	داده‌های دقیق و لحظه‌ای برای اتخاذ تصمیمات سریع	دسترسی غیرمجاز به داده‌ها، تغییر داده‌ها توسط مهاجمان	قوانین محیط‌زیستی محلی و بین‌المللی	استفاده از سامانه‌های امنیتی مبتنی بر اینترنت اشیا، اعمال محدودیت‌های دسترسی، استفاده از بلاک‌چین برای ثبت تغییرات
داده‌های انرژی (نظیر مصرف برق و گاز، تولید انرژی تجدیدپذیر)	بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش هزینه‌ها، افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	بهبود مدیریت مصرف و تولید انرژی، کاهش هزینه‌ها	احتمال دسترسی غیرمجاز به داده‌های مصرف انرژی، حملات به سامانه‌های شبکه برق	استانداردهای امنیت انرژی نظیر ISO 27001	رمزنگاری داده‌ها، ایجاد شبکه‌های مجزا برای داده‌های حساس، پایش مستمر سامانه‌ها
داده‌های سلامت (نظیر داده‌های مربوط به بیماری‌ها، وضعیت اورژانس)	بهبود خدمات سلامت، کاهش زمان واکنش در شرایط اضطراری	بهبود پاسخگویی به شرایط اضطراری و مدیریت بهداشت عمومی	سرقت داده‌های حساس سلامت، تهدید به حریم خصوصی بیماران	قانون قابلیت حمل و پاسخ‌گویی بیمه سلامت[1]، قانون عمومی حفاظت داده، قوانین محلی بهداشت و سلامت	استفاده از رمزنگاری پیشرفته، اعمال محدودیت‌های دسترسی، آموزش کارکنان بهداشتی درزمینه امنیت اطلاعات
داده‌های ایمنی (نظیر داده‌های امنیت عمومی، نظارت تصویری)	افزایش امنیت عمومی، کاهش جرائم	ارتقاء سطح امنیت و پیشگیری از جرائم	سوءاستفاده از داده‌های نظارت تصویری، نقض حریم خصوصی افراد	قوانین محلی امنیت عمومی، استانداردهای بین‌المللی نظارت	ذخیره‌سازی داده‌های نظارتی در محیط‌های امن، استفاده از فناوری‌های تشخیص نفوذ، کنترل دسترسی به داده‌های حساس
داده‌های شهروندی (نظیر نظرات و پیشنهادات شهروندان، درخواست‌های خدمات شهری)	بهبود خدمات شهری، افزایش مشارکت شهروندان	ارتقاء کیفیت خدمات و افزایش رضایتمندی شهروندان	نقض حریم خصوصی شهروندان، سوءاستفاده از داده‌های شهروندی	قانون عمومی حفاظت داده، قوانین محلی حمایت از داده‌های شخصی	استفاده از پروتکل‌های امنیتی نظیر پروتکل امنیت لایه انتقال[2]، اعمال سیاست‌های محرمانگی داده، استفاده از سامانه مدیریت دسترسی

[1] Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA)

[2] Transport Layer Security (TLS)

۳-۲- تأثیر تهدیدات سایبری بر امنیت اطلاعات در شهرهای هوشمند

افزایش اتصالات و وابستگی به زیرساخت دیجیتال در شهرهای هوشمند، منجر به گسترش قابل‌توجه حملات سایبری شده است. این چالش‌ها بیشتر از مسائل معمولی نفوذ داده‌ها بوده و شامل حملات سایبری پیشرفته به زیرساخت‌های اساسی، داده‌های حساس و خدمات ضروری می‌شوند. با پیشرفت شهرهای هوشمند، پیچیدگی سامانه‌های متصل به آن‌ها منجر به تشدید این تأثیرات مخاطره‌آمیز شده و نیاز به استراتژی‌های جامع مدیریت ریسک و اقدامات امنیتی پیشگیرانه را افزایش داده است [۲۴]. شهرهای هوشمند با توسعه‌ی فناوری و اتصالات دیجیتال، به‌صورت قابل‌توجهی با تهدیدات امنیت سایبری مواجه هستند که خطرات قابل‌توجهی برای سلامت عملکرد و حریم شخصی ساکنان آن‌ها ایجاد می‌کنند. این تهدیدات شامل موارد زیر است:

* نفوذ داده: دسترسی غیرمجاز به مخازن داده حساس مانند پروفایل‌های شهروندی، سوابق مالی و پایگاه‌های داده زیرساختی می‌تواند باعث نفوذ داده شده و پیامدهای جدی برای حریم خصوصی و اعتماد شهروندان شود.
* دسترسی غیرمجاز: سازوکارهای احراز هویت ضعیف و کنترل دسترسی نامناسب ممکن است دسترسی غیرمجاز به سامانه‌ها و شبکه‌های حیاتی را فراهم کند که به مهاجمان شرور، امکان بهره‌برداری از آسیب‌پذیری‌ها و تخریب اصالت داده را می‌دهد.
* اختلال در خدمات: حملات سایبری به خدمات ضروری مانند سامانه‌های حمل‌ونقل، شبکه‌های انرژی و شبکه‌های اورژانس می‌توانند عملیات را مختل کرده، خطاهای خدماتی ایجاد کرده و زندگی روزمره شهروندان را مختل کنند.
* حملات بدخواهانه به زیرساخت‌های اساسی: حملات سایبری پیشرفته از جمله حملات باج‌افزارها، حملات تخریب خدمات توزیع شده[1] و تهدیدات پیشرفته و مداوم[2] ممکن است خطرات قابل‌توجهی برای اصالت و دسترسی به زیرساخت‌های اساسی مانند سامانه‌های تأمین آب، شبکه‌های برق و شبکه‌های ارتباطی ایجاد کنند. این تهدیدات نشان می‌دهند که شهرهای هوشمند نیازمند استراتژی‌های جامع مدیریت ریسک و اقدامات امنیتی پیشگیرانه هستند تا بتوانند به‌طور مؤثری با چالش‌های امنیت سایبری روبرو شده، امنیت شهروندان را حفظ کنند.

مثال‌های جهانی از وقایع امنیت سایبری در شهرهای هوشمند نشان‌دهنده میزان خطرناک بودن تهدیدات واقعی است. به‌عنوان نمونه، حمله رنسوم‌وئر به شهر آتلانتا در سال ۲۰۱۸ باعث اختلالات گسترده در خدمات، ضررهای مالی و چالش‌های عملیاتی بلندمدت شد. همچنین، نفوذ داده به سیستم اندازه‌گیری هوشمند در کره جنوبی، حریم خصوصی هزاران ساکن را به خطر انداخت و آسیب‌پذیری‌های موجود در زیرساخت‌های شهری را نشان داد [۲۵]. برای کاهش این خطرات و مقابله با تهدیدات امنیت سایبری، باید اولویت شهرهای هوشمند در اجرای اقدامات قوی امنیت سایبری و استراتژی‌های دفاعی پیشگیرانه باشد. یکی از موارد مهم در امنیت سایبری، ارزیابی‌های منظم آسیب‌پذیری است. این ارزیابی‌ها به‌منظور شناسایی نقاط ضعف سیستم و اولویت‌بندی تلاش‌های اصلاحی در برابر تهدیدات سایبری انجام می‌شود. همچنین، آزمایش‌های نفوذ نیز برای شبیه‌سازی حملات سایبری واقعی و ارزیابی اثربخشی کنترل‌های امنیتی موجود، شناسایی آسیب‌پذیری‌ها و اعتبارسنجی رویه‌های پاسخ به حوادث انجام می‌شود. علاوه بر این، بررسی‌های امنیتی نیز به‌صورت دوره‌ای از سیاست‌ها، رویه‌ها و پیکربندی‌های امنیتی انجام می‌شود تا از رعایت استانداردها و بهترین روش‌های صنعت اطمینان حاصل شود. همچنین، پروتکل‌های امنیتی قوی مانند شبکه‌های انتقال امن[3]، رمزنگاری و احراز هویت چندگانه نیز به‌منظور حفاظت از داده‌های در حال انتقال و جلوگیری از دسترسی غیرمجاز، پیاده‌سازی می‌شوند. از جمله دیگر تلاش‌های امنیتی، استقرار دیواره‌های آتشین و سامانه‌های تشخیص نفوذ[4] است. این ابزارها به‌منظور نظارت بر ترافیک شبکه، شناسایی فعالیت‌های مشکوک و مسدود کردن ترافیک مخرب در زمان واقعی استفاده می‌شوند. همچنین، آموزش شهروندان در مورد خطرات امنیت سایبری، بهترین روش‌ها و روش‌های گزارش حوادث نیز برای تقویت آن‌ها به‌عنوان شرکت‌کنندگان فعال در دفاع مشترک در برابر تهدیدات سایبری انجام می‌شود. همچنین، ترویج همکاری و به اشتراک‌گذاری اطلاعات بین نهادهای دولتی، شرکای بخش خصوصی و متخصصان امنیت سایبری نیز از دیگر تلاش‌های مهم در این زمینه است. در نهایت، ایجاد یک چارچوب قانونی و حقوقی قوی و کامل نیز به‌منظور تعیین تدابیر و ضوابطی برای حفاظت از داده‌ها، تأمین امنیت شبکه‌ها و سامانه‌های اطلاعاتی، و تعیین مسئولیت‌ها و وظایف مراجع مختلف از

[1] Distributed Denial of Service (DDoS)
[2] Advanced Persistent Threats (APTs)
[3] Virtual Private Networks (VPNs)
[4] Intrusion Detection Systems (IDS)

جمله مراجع سیاست‌گذاری، مراجع نظارتی و مراجع قضایی قابل‌استفاده است. این چارچوب باید شامل قوانین محافظت از داده‌ها، امنیت اطلاعات، حفظ حریم خصوصی شهروندان و تعیین فناوری‌های امنیتی مناسب برای استفاده در شهرها باشد تا امنیت سایبری به بهترین شکل ممکن تضمین شود. علاوه بر این، وظیفه مراجع قضایی رصد قوانین و در صورت نقض آن‌ها انجام تحقیقات و پیگیری است. به‌علاوه، مراجع نظارتی، مسئول ارزیابی تمامیت و امنیت سامانه‌های اطلاعاتی هستند و مسئولیت نظارت بر اجرای قوانین را دارند. همچنین، مراجع سیاست‌گذاری باید سیاست‌ها و دستورالعمل‌های لازم برای افزایش امنیت سایبری در شهرها را تدوین و اجرا کنند و اقدامات آموزشی و آگاهی‌زا برای شهروندان راه‌اندازی کنند. این تدابیر در کنار همکاری و تعامل فعال بین این مراجع، می‌توانند بهبود قابل‌توجهی در امنیت سایبری شهرهای هوشمند به ارمغان بیاورند و از تهدید داده‌ها و حریم خصوصی شهروندان جلوگیری کنند [۲۶]. با انتخاب رویکردی پیشگیرانه نسبت به امنیت سایبری و اجرای سازوکارهای دفاعی قوی، شهرهای هوشمند می‌توانند قابلیت انعطاف خود را در برابر تهدیدات سایبری افزایش داده و زیرساخت‌های اساسی خود را محافظت کنند، همچنین حریم شخصی و رفاه ساکنان خود را در یک محیط شهری دیجیتال و افزایشی تضمین کنند.

۳-۳- استانداردها و پروتکل‌های اینترنت اشیا[1] در شهر هوشمند

سازوکارهای امنیتی سنتی مانند رمزنگاری و زیرساخت، به دلیل پیچیدگی و مصرف منابع بالا، ممکن است برای پلتفرم‌های اینترنت اشیا عملی نباشند. به همین دلیل، استانداردهای جدید با طراحی‌های امنیتی سبک‌وزن برای پاسخگویی به نیازهای خاص امنیتی اکوسیستم اینترنت اشیا توسعه‌یافته‌اند. یکی از چالش‌های کلیدی در این زمینه، نیاز به استفاده از استانداردهای متعدد توسط دستگاه‌ها است، چراکه اینترنت اشیا بر پایه فناوری‌های موجود و پروتکل‌های ارتباطی مختلف بنا شده است. در این راستا، پروتکل‌هایی مانند پروتکل کاربرد محدود[2] و پروتکل انتقال تله‌متری پیام[3] طراحی شده‌اند.

پروتکل کاربرد محدود پروتکلی سبک برای شبکه‌های محدود منابع است که شامل سازوکارهای امنیتی مانند امنیت لایه انتقال دیتاگرام[4] و احراز هویت کلید پیش‌اشتراکی[5] است. پروتکل انتقال تله‌متری نیز پروتکلی مناسب برای شبکه‌های کم‌عَرضه و نامعتبر است که از سازوکارهای امنیتی مانند امنیت لایه انتقال و امنیت ماشین به ماشین سبک[6] بهره می‌برد.

تهدیدات امنیتی در اینترنت اشیا به دلیل حضور آن‌ها در تمامی لایه‌های معماری اینترنت اشیا، از لایه‌های داده لینک و شبکه تا لایه‌های جلسه و کاربرد، نگرانی عمده‌ای به‌حساب می‌آیند. برای مقابله با این تهدیدات، پروتکل‌های مختلف اینترنت اشیا با ویژگی‌های امنیتی در لایه‌های مختلف معماری طراحی شده‌اند. به‌عنوان‌مثال، پروتکل‌هایی مانند e802.15.4 و WirelessHART ویژگی‌های امنیتی خاصی ارائه می‌دهند؛ WirelessHART با استفاده از رمزنگاری AES-128 و تکنیک‌های دیگری مانند حفظ یکپارچگی داده‌ها و احراز هویت، امنیت بالایی را تأمین می‌کند. همچنین، پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های کم‌قدرت و با تلفات بالا[7] با استفاده از " حوزه امنیت" در سرآیند خود، سطوح مختلفی از امنیت را ارائه می‌دهد و از ویژگی‌هایی مانند اعتبارسنجی داده‌ها، امنیت معنایی، و مدیریت کلید برخوردار است. بااین‌حال، پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های کم‌قدرت و با تلفات بالا با تهدیدات امنیتی مختلفی مانند حملات انتخابی، حملات Sinkhole، و حملات Sybil مواجه است که RFC 7416 به بررسی این حملات پرداخته و راهکارهایی برای مقابله با آن‌ها پیشنهاد داده است.

در ادامه پروتکل‌ها و استانداردهای اینترنت اشیا در شهر هوشمند را مورد بررسی قرار می‌دهیم [۲۷].

* **پروتکل کاربرد محدود:** پروتکل کاربرد محدود برای استفاده در شبکه‌های محدود منابع مانند اینترنت اشیا طراحی شده و امکان ارتباط ساده و کارآمد بین دستگاه‌ها را فراهم می‌کند. پروتکل کاربرد محدود مشابه پروتکل انتقال ابرمتن[8] است اما بهینه‌تر و سبک‌تر است. این پروتکل از مدل درخواست/پاسخ استفاده می‌کند و می‌تواند به‌صورت هم‌زمان در شبکه‌های بی‌سیم و سیمی

[1] Internet of Things (IoT)
[2] Constrained Application Protocol (CoAP)
[3] Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)
[4] Datagram Transport Layer Security (DTLS)
[5] Pre-Shared Key (PSK)
[6] Lightweight Machine-to-Machine (LwM2M)
[7] Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)
[8] Hypertext Transfer Protocol (HTTP)

کار کند. پروتکل کاربرد محدود شامل سازوکارهای امنیتی مانند امنیت لایه انتقال دیتاگرام و احراز هویت کلید پیش‌اشتراکی است که اطمینان حاصل می‌کند داده‌های منتقل شده بین دستگاه‌ها محافظت شده‌اند و از دسترسی غیرمجاز جلوگیری می‌شود.

* **پروتکل انتقال تله‌متری پیام:** پروتکل انتقال تله‌متری پیام برای استفاده در شبکه‌های کم‌عرضه و نامعتبر طراحی شده است و شامل سازوکارهای امنیتی مانند امنیت لایه انتقال و امنیت ماشین به ماشین سبک است. این پروتکل از مدل انتشار/اشتراک استفاده می‌کند که اجازه می‌دهد دستگاه‌ها به‌طور کارآمد داده‌ها را به یک سرور مرکزی ارسال کرده و دیگر دستگاه‌ها بتوانند به این داده‌ها دسترسی پیدا کنند. از ویژگی‌های مهم امنیتی این پروتکل، استفاده از پروتکل امنیت لایه انتقال برای رمزنگاری داده‌ها و حفظ یکپارچگی و محرمانگی اطلاعات و نیز سازوکارهای امنیتی ماشین به ماشین سبک برای احراز هویت و کنترل دسترسی به داده‌ها است.

* **توصیه ITU-T Y.2060:** توصیه ITU-T Y.2060 مروری جامع بر مفهوم و محدوده اینترنت اشیا ارائه می‌دهد و شامل مدل مرجع چهار لایه‌ای با قابلیت‌های مدیریت و امنیت است. این مدل لایه‌های ادراک، شبکه، خدمات و اپلیکیشن را پوشش می‌دهد و راهکارهای امنیتی و مدیریت داده‌ها را در هر لایه پیشنهاد می‌کند. مدیریت داده‌ها شامل روش‌هایی برای مدیریت امن داده‌ها و حفاظت از حریم خصوصی کاربران، و احراز هویت است و در کنترل دسترسی، راهکارهایی برای احراز هویت کاربران و دستگاه‌ها و کنترل دسترسی به داده‌ها ارائه می‌دهد.

* **توصیه ITU-T Y.2061:** توصیه ITU-T Y.2061 برای توسعه و ارتقاء شبکه‌های نسل بعدی[1] و کاربردهای ارتباطات ماشین محور[2] امنیتی در نظر گرفته شده است. این توصیه شامل راهنماها و روش‌هایی برای ایجاد و مدیریت سامانه‌های ارتباطی امن و کارآمد است که بتوانند نیازهای ارتباطات ماشین به ماشین را پاسخگو باشند. این استاندارد شامل راهکارهایی برای ایجاد و مدیریت شبکه‌های امن ماشین به ماشین و روش‌هایی برای کنترل دسترسی و احراز هویت کاربران و دستگاه‌ها است.

* **استانداردهای IETF-RFC 4919 & 4944:** این استانداردها راهکارهایی برای پیاده‌سازی شبکه‌های مبتنی بر IPv6 در سامانه‌های محدود مانند شبکه‌های سنسوری ارائه می‌دهند. استاندارد LoWPAN6 با کاهش اندازه سرآیندهای IPv6، امکان استفاده از این پروتکل‌ها در سامانه‌های محدود را فراهم می‌کند. LoWPAN6 برای بهبود امنیت و کارایی در شبکه‌های محدود منابع طراحی شده است و از تکنیک‌های رمزنگاری برای حفاظت از داده‌ها و جلوگیری از دسترسی غیرمجاز استفاده می‌کند.

* **استاندارد IETF-RFC 6550:** این استاندارد، پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های کم‌مصرف و مستهلک[3] را معرفی می‌کند و شامل سه حالت امنیتی است: غیرامن، پیش‌نصب شده، و احراز هویت شده. راهکارهایی برای مسیریابی امن در شبکه‌های کم‌مصرف و مستهلک و روش‌هایی برای احراز هویت و کنترل دسترسی به داده‌ها در این استاندارد گنجانده شده است.

* **استاندارد نام‌گذاری اشیاء[4]:** مشابه سیستم نام دامنه[5]، این استاندارد چارچوبی برای نام‌گذاری اشیاء در سامانه‌های توزیع شده فراهم می‌کند و درخواست‌ها را به محل صحیح هدایت می‌کند. تضمین نام‌گذاری یکتا برای دستگاه‌ها و سرویس‌ها و روش‌هایی برای کنترل دسترسی و احراز هویت در نام‌گذاری اشیاء از ویژگی‌های امنیتی این استاندارد هستند.

* **استاندارد پروتکل انتقال تله‌متری پیام[6]:** این پروتکل، پیام‌رسانی سبک است که برای صف‌بندی پیام‌ها در مسافت‌های طولانی طراحی شده است و با استفاده از رمزنگاری و سیاست‌های دسترسی، اطمینان از حفظ حریم خصوصی حتی در صورت به‌خطر افتادن سرور را فراهم می‌کند. استفاده از تکنیک‌های رمزنگاری برای حفاظت از داده‌ها و روش‌هایی برای کنترل دسترسی و احراز هویت کاربران و دستگاه‌ها از ویژگی‌های امنیتی این استاندارد هستند.

* **استانداردهای امنیت لایه انتقال / امنیت لایه انتقال دیتاگرام:** امنیت لایه انتقال و امنیت لایه انتقال دیتاگرام استانداردهایی برای تأمین امنیت در لایه حمل‌ونقل هستند و از سازوکارهایی مانند RSA، HMAC، و AES بهره می‌برند. این

[1] Next Generation Networks (NGN)
[2] Machine-Oriented Communications (MOC)
[3] Low-Power and Lossy Networks (LLNs)
[4] Object Naming Service (ONS)
[5] Domain Name System (DNS)
[6] MQTT: OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards)

استانداردها از تکنیک‌های رمزنگاری برای حفاظت از داده‌ها و تضمین یکپارچگی و محرمانگی اطلاعات بین دستگاه‌ها استفاده می‌کنند.

* **استانداردهای IEEE 1888.3:** این استانداردها برای تضمین امنیت پروتکل‌های شبکه سبز فراگیر[1] طراحی شده‌اند و شامل راهکارهایی برای حفاظت اطلاعات، حفظ یکپارچگی، محرمانگی، احراز هویت و کنترل دسترسی هستند. استفاده از تکنیک‌های رمزنگاری برای حفاظت از داده‌ها و روش‌هایی برای کنترل دسترسی و احراز هویت کاربران و دستگاه‌ها از ویژگی‌های امنیتی این استاندارد هستند.

* **پروتکل کنترل انتقال جریان[2]:** پروتکل کنترل انتقال جریان یک پروتکل لایه حمل‌ونقل است که قابلیت انتقال داده‌ها به‌صورت پیام‌محور را دارد و از ویژگی‌هایی مانند چند مسیریابی و مقاومت در برابر حملات امنیتی بهره می‌برد. راهکارهایی برای مسیریابی امن و مقاوم در برابر حملات و روش‌هایی برای کنترل دسترسی و احراز هویت کاربران و دستگاه‌ها از ویژگی‌های امنیتی این پروتکل هستند.

* **گروه محاسبات مطمئن[3]:** این گروه، سازوکارهای امنیتی متنوعی مانند ماژول پلتفرم مطمئن[4] و به‌روزرسانی اعتماد از راه دور[5] برای اطمینان از امنیت دستگاه‌های اینترنت اشیا ارائه می‌دهد. استفاده از ماژول پلتفرم مطمئن و به‌روزرسانی اعتماد از راه دور برای تضمین امنیت دستگاه‌ها و روش‌هایی برای حفاظت از داده‌ها و کنترل دسترسی به اطلاعات از ویژگی‌های امنیتی این گروه هستند.

* **استاندارد ISO/IEC 27001:** یک استاندارد بین‌المللی برای مدیریت امنیت اطلاعات است که به سازمان‌ها کمک می‌کند تا یک سیستم مدیریت امنیت اطلاعات[6] موثر را پیاده‌سازی کنند. این استاندارد شامل سیاست‌ها، فرآیندها، رویه‌ها، و کنترل‌های لازم برای مدیریت و حفاظت از اطلاعات است. تضمین مدیریت موثر امنیت اطلاعات در سازمان‌ها و استفاده از کنترل‌های امنیتی مختلف برای حفاظت از داده‌ها و اطلاعات حساس از ویژگی‌های این استاندارد هستند.

* **استاندارد ISO/IEC 29100:** این استاندارد، یک چارچوب بین‌المللی برای حفظ حریم خصوصی اطلاعات است که شامل راهنمایی‌ها و اصولی برای مدیریت حریم خصوصی داده‌ها است. تضمین حفظ حریم خصوصی داده‌ها و اطلاعات شخصی و راهنمایی‌هایی برای مدیریت ریسک‌های مرتبط با حریم خصوصی اطلاعات از ویژگی‌های این استاندارد هستند.

در لایه‌های مختلف شهر هوشمند، انتخاب پروتکل‌ها و استانداردهای مناسب برای تأمین امنیت و حریم خصوصی اطلاعات اهمیت زیادی دارد. براساس توضیحات استانداردها و پروتکل‌های فوق، برای داده‌های حمل‌ونقل مانند داده‌های ترافیکی و موقعیت وسایل نقلیه عمومی، پروتکل‌هایی نظیر پروتکل کاربرد محدود و پروتکل انتقال تله‌متری پیام به دلیل قابلیت‌های امنیتی آن‌ها شامل امنیت لایه انتقال دیتاگرام و امنیت لایه انتقال، می‌توانند به‌خوبی عمل کنند. این پروتکل‌ها امنیت انتقال داده‌ها را با استفاده از رمزنگاری و احراز هویت فراهم می‌کنند، که در حفاظت از اطلاعات حساس و جلوگیری از دسترسی غیرمجاز به داده‌های ترافیکی و موقعیت کمک می‌کند.

همچنین، توصیه ITU-T Y.2060 با ارائه راهکارهای مدیریت و امنیت داده‌ها در لایه‌های مختلف شبکه، به تقویت امنیت در این زمینه کمک می‌کند. برای داده‌های محیط‌زیست نظیر کیفیت هوا، سطح نویز و دما، استانداردهایی مانند LoWPAN6 و RFC 6550 می‌توانند مفید واقع شوند. LoWPAN6 به دلیل طراحی بهینه برای شبکه‌های محدود و استفاده از تکنیک‌های رمزنگاری، امنیت داده‌های محیط‌زیست را تأمین می‌کند. همچنین، RFC 6550 با ارائه روش‌های مسیریابی امن در شبکه‌های کم‌مصرف و مستهلک، از امنیت داده‌های محیط‌زیست در برابر تهدیدات محافظت می‌کند. این استانداردها به همراه توصیه ITU-T Y.2061 که راهکارهایی برای شبکه‌های نسل بعدی ارائه می‌دهد، می‌توانند به مدیریت و حفظ حریم خصوصی داده‌های محیط‌زیست کمک کنند.

---

[1] Proactive Green Communication Networks (PGCN)
[2] Stream Control Transmission Protocol (SCTP)
[3] Trusted Computing Group (TCG)
[4] Trusted Platform Module (TPM)
[5] Remote Trust Update (RTU)
[6] Information Security Management System (ISMS)

در خصوص داده‌های انرژی، سلامت، ایمنی و شهروندی، استفاده از استانداردهای SCTP، ISO/IEC 27001 و ISO/IEC 29100 برای تأمین امنیت و حریم خصوصی اطلاعات بسیار مناسب است. SCTP به دلیل ویژگی‌های امنیتی مانند چند مسیریابی و مقاومت در برابر حملات، می‌تواند به امنیت داده‌های انرژی، سلامت و ایمنی کمک کند.

استانداردهای ISO/IEC 27001 و ISO/IEC 29100 نیز با فراهم کردن چارچوب‌های مدیریت امنیت اطلاعات و حفظ حریم خصوصی، از محافظت مؤثر داده‌های حساس و شخصی شهروندان اطمینان حاصل می‌کنند. این استانداردها به همراه گروه محاسبات مطمئن با ارائه سازوکارهایی مانند ماژول پلتفرم مطمئن، به حفظ امنیت و حریم خصوصی در تمام لایه‌های اطلاعات شهری کمک می‌کنند.

در جدول ۲، نقش پروتکل‌های رمزنگاری در امنیت و حریم خصوصی داده‌های شهر هوشمند، کاربردها، نقاط قوت و نقاط ضعف استانداردها و پروتکل‌های امنیتی در امنیت اینترنت اشیا در شهر هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است [۲۸].

۳-۴- ارتباط بین اینترنت اشیا و بلاک‌چین در افزایش امنیت و اعتماد

استفاده از اینترنت اشیا و فناوری بلاک‌چین به‌عنوان دو مولفه اساسی در تقویت امنیت و افزایش اعتماد در شهرهای هوشمند بسیار اهمیت دارد. اینترنت اشیا به‌عنوان یک زیرساخت برای اتصال و ارتباط دستگاه‌ها و سنسورها عمل می‌کند که این کار، جمع‌آوری و بهره‌برداری از داده‌ها برای کاربردهای مختلف در شهرهای هوشمند را آسان‌تر می‌کند. بااین‌وجود، حجم بزرگ داده‌های تولیدشده توسط دستگاه‌های اینترنت اشیا منجر به چالش‌های امنیتی مختلفی می‌شود که نیازمند راه‌حل‌های مؤثر هستند. فناوری بلاک‌چین به‌عنوان یک راه‌حل جذاب برای مقابله با این چالش‌های امنیتی در شهرهای هوشمند مطرح شده است [۲۹].

بلاک‌چین به‌عنوان یک دفترچه ردیابی غیرمتمرکز و غیرقابل تغییر عمل می‌کند که امکان ارائه شفافیت، صحت داده‌ها و جلوگیری از تغییرات غیرمجاز را فراهم می‌کند. این فناوری، اعتماد بین افراد و نهادها را تقویت می‌کند. با استفاده از بلاک‌چین، شهرهای هوشمند می‌توانند امنیت تراکنش‌های داده، اعتبارسنجی منابع داده و پیشگیری از فعالیت‌های غیرمجاز را بهبود بخشند [۳۰]. به‌عنوان‌مثال، در بخش داده‌های حمل‌ونقل، بلاک‌چین می‌تواند از دست‌کاری داده‌ها جلوگیری کرده و شفافیت در تائید و مدیریت داده‌ها را بهبود بخشد. برای داده‌های محیط‌زیست، بلاک‌چین با ثبت امن و شفاف داده‌های کیفیت هوا، نویز و دما، به محافظت از صحت و امنیت این داده‌ها کمک می‌کند. در حوزه انرژی، سلامت و ایمنی، بلاک‌چین می‌تواند نظارت بر داده‌های انرژی و حفاظت از اطلاعات حساس سلامت و ایمنی را تضمین کند و با ارائه لایه‌های اضافی امنیت و شفافیت، اعتماد را در مدیریت این داده‌ها افزایش دهد.

از نظر حقوقی، ادغام فناوری بلاک‌چین در شهرهای هوشمند نیازمند ایجاد یک چارچوب قانونی جامع است که بتواند استفاده از این فناوری، مسئولیت‌ها، و رعایت مقررات را به‌خوبی اداره کند. جنبه‌های حقوقی ارتباطی با مالکیت داده، حفاظت از حریم خصوصی و مسئولیت در صورت نقض داده‌ها باید به‌دقت در این چارچوب مشخص شوند تا حقوق و منافع همه طرفین را تضمین کند. همچنین، نظارت قضایی نقش حیاتی در حل اختلافات ناشی از تراکنش‌های بر پایه بلاک‌چین و اجرای توافقات حقوقی دارد. دادگاه‌ها و نهادهای قضایی باید دانش لازم را درک کرده و به‌طور موثر در راستای اصول حقوقی عمل کنند.

همچنین، تصویب قوانین مرتبط، با امکان ارائه شواهد بر پایه بلاک‌چین و اجرای قراردادهای هوشمند، نیازمند بررسی دقیق و روشن‌سازی در چارچوب حقوقی است. به‌عنوان‌مثال، سامانه بهداشت استونی یک نمونه موفق از ادغام فناوری بلاک‌چین است که امنیت و صحت پرونده‌های پزشکی بیماران را تضمین می‌کند و به افراد، کنترل بر روی اطلاعات شخصی سلامت خود را می‌دهد؛ درحالی‌که استانداردهای حریم خصوصی را حفظ می‌کند.

به‌عنوان‌مثال دیگر، در دبی، فناوری بلاک‌چین برای امنیت تراکنش‌های ثبت املاک استفاده می‌شود که خطر فعالیت‌های تقلبی را کاهش داده و اعتماد در بخش ملکی را افزایش می‌دهد. بنابراین، ادغام هماهنگ اینترنت اشیا و فناوری بلاک‌چین یک الگوی تحولی برای افزایش امنیت و اعتماد در شهرهای هوشمند فراهم می‌کند. در جدول ۳، ارتباط بین اینترنت اشیا و بلاک‌چین در افزایش امنیت و اعتماد در بخش‌های مختلف داده‌های شهر هوشمند بررسی شده است.

جدول ۲: کاربردها، نقاط قوت و ضعف پروتکل‌ها و استانداردهای امنیتی در حفاظت از داده‌های شهر هوشمند

Table 2. Applications, Strengths, and Weaknesses of Security Protocols and Standards for Protecting Smart City Data

پروتکل/استاندارد	کاربرد	نقاط قوت امنیتی	نقاط ضعف امنیتی
CoAP	پروتکل کاربردی	- استفاده از DTLS برای رمزنگاری داده‌ها. - احراز هویت کلید پیش‌اشتراکی برای جلوگیری از دسترسی غیرمجاز. - بهینه‌شده برای شبکه‌های محدود منابع.	- DTLS ممکن است در شبکه‌های با تأخیر بالا یا از دست رفتن بسته‌ها به‌درستی عمل نکند. - ضعف در حفاظت در برابر حملات DoS.
MQTT	پروتکل پیام‌رسانی	- استفاده از TLS برای رمزنگاری داده‌ها. - LwM2M برای احراز هویت و کنترل دسترسی. - مدل انتشار/اشتراک کارآمد در شبکه‌های کم‌عرضه.	- TLS ممکن است بر روی عملکرد شبکه تأثیر بگذارد. - امنیت LwM2M به میزان پیاده‌سازی بستگی دارد و ممکن است به‌طور کامل پیاده‌سازی نشود.
ITU-T Y.2060	مدل مرجع و مدیریت داده‌ها	- شامل راهکارهای امنیتی در تمام لایه‌ها. - ارائه روش‌های احراز هویت و کنترل دسترسی. - جامع و کامل در مدیریت امنیت داده‌ها.	- نیاز به پیاده‌سازی پیچیده در مقایسه با استانداردهای ساده‌تر. - ممکن است به‌صورت کامل در همه پیاده‌سازی‌ها مورداستفاده قرار نگیرد.
ITU-T Y.2061	شبکه‌های نسل بعدی	- شامل راهنماهای امنیتی برای M2M . - روش‌های احراز هویت و کنترل دسترسی. - تمرکز بر روی امنیت و کارایی شبکه‌های نسل بعدی.	- ممکن است نیاز به منابع زیاد برای پیاده‌سازی داشته باشد. - پیچیدگی در پیاده‌سازی شبکه‌های M2M امن.
IETF-RFC 4919 & 4944	پروتکل‌های IPv6 و شبکه‌های محدود	- کاهش اندازه سرآیندها برای بهبود کارایی. - تکنیک‌های رمزنگاری برای حفاظت از داده‌ها. - مناسب برای شبکه‌های محدود منابع.	- محدودیت در عملکرد امنیتی به دلیل اندازه محدود بسته‌ها. - ممکن است در شبکه‌های بسیار محدود به‌اندازه کافی امن نباشد.
IETF-RFC 6550	پروتکل مسیریابی LLNs	- سه حالت امنیتی: غیرامن، پیش‌نصب شده، و احراز هویت شده. - روش‌های امن برای مسیریابی و کنترل دسترسی. - طراحی شده برای شبکه‌های کم‌مصرف.	- ممکن است پیاده‌سازی حالت‌های امنیتی به‌طور کامل در همه موارد عملیاتی نباشد. - پیچیدگی در تنظیم و مدیریت وضعیت‌های امنیتی مختلف.
ONS	نام‌گذاری و DNS	- تضمین نام‌گذاری یکتا برای دستگاه‌ها و سرویس‌ها. - روش‌های کنترل دسترسی و احراز هویت. - مشابه DNS برای نام‌گذاری اشیاء توزیع‌شده.	- ممکن است در برابر حملات DNS به‌اندازه کافی مقاوم نباشد. - نیاز به پیاده‌سازی‌های صحیح برای حفاظت از اطلاعات.
OASIS: MQTT	پروتکل پیام‌رسانی	- رمزنگاری و سیاست‌های دسترسی. - مناسب برای مسافت‌های طولانی. - حمایت از حفاظت از حریم خصوصی حتی در صورت به‌خطر افتادن سرور.	- امنیت به پیاده‌سازی صحیح رمزنگاری و سیاست‌های دسترسی بستگی دارد. - ممکن است در شرایط خاص آسیب‌پذیر باشد.
TLS/DTLS	امنیت لایه حمل‌ونقل	- استفاده از تکنیک‌های رمزنگاری قوی مانند RSA، HMAC و AES. - حفاظت از یکپارچگی و محرمانگی اطلاعات. - قابل‌استفاده در انواع پروتکل‌ها.	- ممکن است به دلیل نیاز به منابع پردازشی، بر عملکرد شبکه تأثیر بگذارد. - پیاده‌سازی نادرست می‌تواند به مشکلات امنیتی منجر شود.
IEEE 1888.3	شبکه‌های سبز فراگیر	- استفاده از تکنیک‌های رمزنگاری برای حفاظت از داده‌ها. - شامل روش‌های کنترل دسترسی و احراز هویت. - طراحی شده برای بهبود امنیت در شبکه‌های سبز.	- ممکن است نیاز به منابع و پیچیدگی در پیاده‌سازی داشته باشد. - ممکن است در برابر حملات جدید به‌روز نباشد.
SCTP	پروتکل حمل‌ونقل	- قابلیت انتقال داده‌ها به‌صورت پیام‌محور. - ویژگی‌های امنیتی مانند چند مسیریابی و مقاومت در برابر حملات. - کنترل دسترسی و احراز هویت.	- ممکن است در مقایسه با TCP و UDP پیچیدگی بیشتری داشته باشد. - نیاز به پیکربندی دقیق برای استفاده از ویژگی‌های امنیتی.
TCG	امنیت دستگاه‌ها	- استفاده از ماژول پلتفرم مطمئن و به‌روزرسانی اعتماد از راه دور - تضمین امنیت دستگاه‌ها و حفاظت از داده‌ها. - روش‌های کنترل دسترسی و احراز هویت.	- ممکن است به منابع اضافی و پیچیدگی در پیاده‌سازی نیاز داشته باشد. - پیاده‌سازی نادرست می‌تواند به مشکلات امنیتی منجر شود.

ISO/IEC 27001	مدیریت امنیت اطلاعات	- ایجاد یک سیستم مدیریت امنیت اطلاعات موثر. - شامل سیاست‌ها، فرآیندها، و کنترل‌های امنیتی. - مناسب برای مدیریت و حفاظت از اطلاعات حساس.	- پیچیده و زمان‌بر باشد. - نیاز به به‌روزرسانی دارد و ممکن است به نظارت مداوم برای حفظ امنیت نیازمند باشد.
ISO/IEC 29100	حفظ حریم خصوصی اطلاعات	- شامل راهنمایی‌ها برای مدیریت حریم خصوصی داده‌ها. - تضمین حریم خصوصی و حفاظت از اطلاعات شخصی. - مناسب برای مدیریت ریسک‌های حریم خصوصی.	- ممکن است در همه موارد، پیاده‌سازی به‌صورت کامل عملیاتی نباشد. - نیاز به پیاده‌سازی‌های دقیق برای حفاظت از حریم خصوصی.

جدول ۳: بررسی نقش اینترنت اشیا و بلاک‌چین در امنیت و اعتماد در بخش‌های مختلف داده‌های شهر هوشمند

Table 3. Analysis of the Role of IoT and Blockchain in Security and Trust Across Different Data Segments in Smart Cities

بخش داده‌های شهر هوشمند	کاربرد اینترنت اشیا	نقش بلاک‌چین	نقاط قوت	نقاط ضعف
حمل‌ونقل	جمع‌آوری و ارسال داده‌های ترافیکی و موقعیت وسایل نقلیه	ذخیره‌سازی امن داده‌های ترافیکی و موقعیت وسایل نقلیه، تائید صحت داده‌ها	افزایش شفافیت، کاهش تقلب، بهبود مدیریت ترافیک	نیاز به منابع پردازشی بالا، پیچیدگی پیاده‌سازی
محیط‌زیست	پایش کیفیت هوا، سطح نویز، دما و سایر شاخص‌های محیطی	ثبت تغییرات و داده‌های محیطی در بلاک‌چین به‌صورت غیرقابل تغییر	افزایش دقت و صحت داده، قابلیت ردیابی تغییر	نیاز به ذخیره‌سازی بزرگ، پیچیدگی یکپارچه‌سازی
انرژی	مدیریت مصرف و تولید انرژی، پایش مصرف انرژی	ثبت و تائید تراکنش‌های انرژی و قراردادهای هوشمند برای مدیریت مصرف	بهبود کارایی و شفافیت، کاهش اتلاف انرژی	هزینه‌های پیاده‌سازی بالا، نیاز به فناوری‌های پیشرفته
سلامت	جمع‌آوری داده‌های پزشکی و سلامت، مانیتورینگ وضعیت بیماران	ذخیره‌سازی امن داده‌های پزشکی، کنترل دسترسی با قراردادهای هوشمند	افزایش امنیت و حریم خصوصی، بهبود دسترسی به داده‌ها	پیچیدگی پیاده‌سازی، نیاز به زیرساخت‌های مناسب
ایمنی	نظارت تصویری، جمع‌آوری داده‌های امنیت عمومی	ذخیره‌سازی امن داده‌های نظارتی، تضمین صحت داده‌ها	بهبود امنیت عمومی، جلوگیری از دست‌کاری داده‌ها	نیاز به ظرفیت ذخیره‌سازی بزرگ، پیچیدگی مدیریت داده‌ها
خدمات شهری	جمع‌آوری نظرات و پیشنهادات شهروندان و نیز درخواست‌های خدمات شهری	ثبت و پیگیری درخواست‌ها و نظرات شهروندان به‌صورت شفاف و قابل‌ردیابی	افزایش نرخ مشارکت شهروندان، بهبود خدمات شهری	پیچیدگی پیاده‌سازی، نیاز به آموزش شهروندان

۳-۵- نقش دولت و نهادهای مرتبط در اجرای قوانین حفاظت از داده‌ها

یکی از موارد مهم در حفاظت از داده‌ها در شهرهای هوشمند، همکاری و هماهنگی میان دولت، صنعت و نهادهای قضایی است. دولت‌ها مسئول تصویب قوانین و مقررات مربوط به حفاظت از داده‌ها و حریم خصوصی هستند و باید به‌طور شفاف و مسئولانه، حقوق افراد را در مورد جمع‌آوری، پردازش و استفاده از داده‌ها تضمین کنند. بازیگران صنعتی، از جمله توسعه‌دهندگان راه‌حل‌های شهر هوشمند، نیز در طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌ای امن و رعایت بهترین شیوه‌های حریم خصوصی مسئولیت دارند. همچنین، نهادهای قضایی نقش حیاتی در اجرای قوانین و حل اختلافات مربوط به حریم خصوصی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، شراکت‌های عمومی و خصوصی در افزایش امنیت و حریم خصوصی در شهرهای هوشمند حائز اهمیت است [۳۱].

همکاری بین نهادهای دولتی، شرکت‌های خصوصی و سازمان‌های جامعه مدنی می‌تواند منجر به راه‌حل‌های جامع و مؤثرتری شود و در به اشتراک‌گذاری تخصص، منابع و بهترین شیوه‌ها برای حل چالش‌های امنیت سایبری کمک کند. همچنین، می‌توانند همکاری درزمینه تحقیق و توسعه را ترویج کنند تا امکان اجرای فناوری‌های نوآورانه و پروتکل‌های امنیتی فراهم شود. اقدامات

مشترک می‌تواند برنامه‌های آموزشی، کارگاه‌ها و کمپین‌های آگاهی را فراهم کند تا افراد، سازمان‌ها و جوامع را در مورد خطرات امنیتی و بهترین شیوه‌های حفاظت از داده آموزش دهد.

۴- مطالعه موردی اثربخشی قوانین و مقررات حفاظت از داده‌های شهرهای هوشمند در ایران

۴-۱- بررسی وضعیت فعلی قانونی حفاظت از داده‌های شهرهای هوشمند در ایران

وضعیت فعلی قوانین و مقررات مربوط به داده‌ها در شهرهای هوشمند در ایران به دلیل عدم وجود یک متن قانونی یکپارچه و منسجم در این زمینه، با مشکلاتی روبه‌رو است. این خلأ قانونی باعث ایجاد یک وضعیت جدی در ارتباط با حفاظت از داده‌ها در شهرهای هوشمند شده است. بنابراین، لازم است هر یک از نهادهای مسئول در این زمینه، با توجه به صلاحیت‌ها و وظایف محدود خود، اقداماتی را برای پر کردن این خلأ اساسی و ایجاد یک چارچوب قانونی واحد و کارآمد برای حفاظت از داده‌ها در شهرهای هوشمند ایران انجام دهند [۳۲]. جدول ۴ بررسی نقش دولت و نهادهای مرتبط در حفاظت از داده‌های شهر هوشمند و جدول ۵ قوانین و مقررات داده و بخش‌های مختلف متولی آن را نمایش می‌دهد.

این وضعیت از سال ۱۳۸۴ به وجود آمده است، هنگامی‌که "لایحه حفظ حریم خصوصی" به مجلس شورای اسلامی ارائه شد. متأسفانه، قبل از رسیدگی و تصویب، در فروردین سال ۱۳۸۵ دولت جدید این لایحه را پس گرفت و از آن زمان تاکنون هیچ اقدامی در این زمینه انجام نشده است. این لایحه شامل ۷ سرفصل بود که به موضوعاتی مانند حریم خصوصی جسمانی، حریم خصوصی اماکن و منازل، حریم خصوصی در محل کار، حریم خصوصی اطلاعات، اطلاعات شخصی در فعالیت‌های رسانه‌ای، حریم خصوصی ارتباطات و مسئولیت‌های ناشی از نقض حریم خصوصی پرداخته بود. بنابراین، ازآنجایی‌که قانون‌گذاری، وظیفه اصلی و اولیه مجلس شورای اسلامی است، انتظار ورود کمیسیون تنظیم مقررات ارتباطات به حوزه حریم خصوصی، به‌طور عمومی، امکان‌پذیر نیست. اما اگر ضرورتی احساس شود، این کمیسیون می‌تواند الزام‌های فنی حفاظت از حریم خصوصی کاربران را برای افراد و شرکت‌های فعال در این حوزه با وضع مصوبات مناسب، به اجرا بگذارد. ازآنجایی‌که هیچ‌یک از نهادهای موجود در کشور مسئولیت اجرای قوانین حریم خصوصی را به عهده نگرفته‌اند، احتمال ایجاد یک نهاد جدید با ساختار و تشکیلات منحصربه‌فرد، ضروری به نظر می‌رسد [۳۳]. اما پاسخ به این سؤال که کدام‌یک از نهادهای موجود در کشور مسئولیت اجرای چنین قوانینی را بر عهده بگیرد و یا آیا نهاد جدیدی باید ایجاد شود، سؤالی پیچیده است که پاسخ آن به شرایط و موقعیت‌های خاص کشور وابسته است.

به‌طورکلی، تا زمانی که متن قانونی منسجم در این زمینه وجود نداشته باشد، نمی‌توان به‌طور قطعی، نقش و مسئولیت نهادهای نظارتی و اجرایی را در این زمینه مشخص کرد. با اهمیت بالایی که این موضوع دارد، توجه به ایجاد یک نهاد مسئول در این زمینه ضروری است تا حریم خصوصی در کشور به‌خوبی حفظ شود.

۴-۲- نواقص قوانین و مقررات مربوط به شهر هوشمند و فضای مجازی

به‌منظور تأکید بر اهمیت بی‌پایان داده‌ها در جهان امروز، "لایحه حمایت از داده و حریم خصوصی در فضای مجازی" توسط سازمان فناوری اطلاعات ایران، پژوهشگاه قوه قضاییه و دانشگاه علم و فرهنگ تدوین‌شده است. این لایحه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قوانین درزمینه حفظ حریم خصوصی و اطلاعات کاربران در فضای سایبر به‌شمار می‌آید. در بخش چهارم این لایحه با عنوان "تنظیم و نظارت بر پردازش داده‌های شخصی"، چهار نهاد اصلی، مسئولیت نظارت بر پردازش داده‌های شخصی را بر عهده دارند. این چهار نهاد شامل کمیسیون صیانت و حفاظت از داده‌های شخصی، هیئت نظارت، کارگروه‌های تخصصی و دبیرخانه اجرایی کمیسیون هستند که در سایر کشورها به‌عنوان نهادهایی که از داده‌ها محافظت می‌کنند، شناخته می‌شوند. در ماده ۴۰ این لایحه، اعضای کمیسیون صیانت و حفاظت از داده‌های شخصی به شرح زیر تعریف شده‌اند: وزیر ارتباطات و فناوری اطلاعات به‌عنوان رئیس کمیسیون، وزیر اطلاعات، وزیر کشور، وزیر دادگستری، وزیر فرهنگ و ارشاد اسلامی، وزیر اقتصاد و امور دارایی، دبیر شورای عالی انقلاب فرهنگی، رئیس مرکز ملی فضای مجازی، معاون پیشگیری از وقوع جرم قوه قضائیه، رئیس کمیسیون اصل نودم مجلس شورای اسلامی، دادستان کل کشور، و دبیر شورای اجرایی فناوری اطلاعات به‌عنوان دبیر کمیسیون [۴۲-۴۱].

جدول ۴: بررسی نقش دولت و نهادهای مرتبط در حفاظت از داده‌های شهر هوشمند

Table 4. Analysis of the Role of Government and Related Institutions in Protecting Smart City Data

نهاد/سازمان	نقش	وظایف و مسئولیت‌ها	چالش‌ها	اقدامات کلیدی پیشنهادی
هیات دولت	تعیین سیاست‌ها و قوانین کلی حفاظت از داده‌ها	تدوین و تصویب قوانین، ایجاد زیرساخت‌های قانونی، نظارت بر اجرای قوانین	هماهنگی بین نهادهای مختلف، تأمین بودجه و منابع لازم	ایجاد واحدهای تخصصی، برگزاری جلسات هماهنگی بین نهادها، تخصیص بودجه مناسب، تصویب قوانین ملی نظیر قانون عمومی حفاظت داده
وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات	نظارت بر اجرای قوانین و مقررات در حوزه فناوری اطلاعات	تدوین استانداردها و پروتکل‌های امنیتی، نظارت بر عملکرد شرکت‌های فناوری	پیچیدگی فناوری، تغییرات سریع در حوزه فناوری	به‌روزرسانی استانداردها، همکاری با نهادهای بین‌المللی، ارتقاء دانش فنی، اجرای استانداردهای امنیتی نظیر ISO 27001
سازمان ملی استاندارد	تدوین و تصویب استانداردهای ملی در حوزه امنیت داده‌ها	ایجاد و انتشار استانداردهای امنیتی، نظارت بر اجرای استانداردها توسط شرکت‌ها و نهادها	هماهنگی با سایر نهادها، پذیرش و انطباق با استانداردهای بین‌المللی	مشارکت فعال در نهادهای بین‌المللی استانداردسازی، برگزاری کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی
شهرداری‌ها	اجرای قوانین و مقررات در سطح محلی	مدیریت داده‌های شهری، نظارت بر پروژه‌های شهر هوشمند، همکاری با شرکت‌های خصوصی	محدودیت‌های مالی، پیچیدگی مدیریت داده‌ها	جذب سرمایه‌گذار خصوصی، استفاده از پلتفرم‌های مدیریت داده هوشمند، آموزش و توانمندسازی پرسنل
سازمان حفاظت از داده‌ها	حفاظت از حقوق شهروندان درزمینه داده‌ها	نظارت بر جمع‌آوری، پردازش و ذخیره‌سازی داده‌ها، رسیدگی به شکایات و تخلفات	حفظ تعادل بین حفاظت از داده‌ها و استفاده از داده‌ها برای بهبود خدمات	استفاده از فناوری‌های پیشرفته نظارتی، برگزاری کمپین‌های آگاهی‌رسانی، توسعه سامانه‌هایی برای گزارش‌دهی شفاف
نیروی انتظامی	تأمین امنیت فیزیکی و سایبری شهر هوشمند	پیشگیری و مقابله با جرائم سایبری، نظارت بر امنیت شبکه‌ها و سامانه‌ها	مقابله با تهدیدات پیچیده سایبری، تأمین تجهیزات و نیروی انسانی متخصص	ارتقاء سطح آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی، همکاری با نهادهای بین‌المللی، استفاده از فناوری‌های نوین امنیتی
شرکت‌های فناوری	پیاده‌سازی و نگهداری سامانه‌های امن	توسعه و اجرای راهکارهای امنیتی، حفاظت از داده‌های کاربران	رقابت در بازار، تأمین منابع مالی برای امنیت داده‌ها	همکاری با نهادهای دولتی، ارتقاء سطح امنیت داخلی، توسعه راهکارهای نوآورانه
مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌ها	پژوهش و توسعه فناوری‌های امنیتی	انجام تحقیقات درزمینه امنیت سایبری، آموزش نیروی انسانی متخصص	تأمین مالی تحقیقات، نیاز به همکاری با صنعت	ارائه دوره‌های آموزشی تخصصی، انتشار مقالات و نتایج تحقیقاتی
نهادهای بین‌المللی	تدوین استانداردها و پروتکل‌های بین‌المللی	ایجاد و انتشار استانداردها و راهنماهای بین‌المللی، نظارت بر اجرای استانداردها	هماهنگی بین کشورها، پذیرش و انطباق با شرایط محلی	تقویت همکاری‌ها در حوزه بین‌المللی، به‌روزرسانی مداوم استانداردها، تبادل دانش و تجربیات، ایجاد استانداردهای بین‌المللی نظیر ISO

جدول ۵: ماده‌های قانونی مرتبط با حوزه حریم خصوصی و امنیت داده و بخش‌های مختلف متولی
Table 5. Legal Provisions Related to Privacy and Data Security and the Responsible Sectors

مراجع	نام نهاد یا سازمان	ماده قانونی مرتبط
مراجع سیاست‌گذاری و تقنینی	مجمع تشخیص مصلحت نظام	بند ۱ اصل ۱۱۰ قانون اساسی: «تعیین سیاست‌های کلی نظام جمهوری اسلامی ایران» [۳۴]
	مجلس شورای اسلامی	اصل ۷۱ قانون اساسی: «مجلس شورای اسلامی در عموم مسائل در حدود مقرر در قانون اساسی می‌تواند قانون وضع کند.» [۳۵]
	شورای عالی فضای مجازی	«تدوین سیاست‌ها و تصویب مقررات کلان موردنیاز فضای مجازی مانند توافقنامه‌های درجه و سطح خدمات، حمایت از حقوق کاربران فضای مجازی و تنظیم روابط فعالان فضای مجازی در چارچوب مصوبات شورای عالی.» [۳۶]
	کمیسیون تنظیم مقررات ارتباطات	سیاست‌گذاری، تدوین و تصویب مقررات در حوزه ارتباطات و فناوری اطلاعات[۳۷]
مراجع نظارتی و اجرا	وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات	قانون اهداف و وظایف وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات: بند ک. «تدوین و پیشنهاد استانداردهای ملی مربوط به ارتباطات و فناوری اطلاعات در کشور به مراجع ذی‌ربط.» بند ف. «حفاظت و حراست و عدم ضبط و افشای انواع مراسلات و امانات پستی و همچنین مکالمات تلفنی و مبادلات شبکه اطلاع‌رسانی و اطلاعات مربوط به اشخاص حقیقی و حقوقی طبق قانون.» [۳۸]
	سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی	بند ۹، ماده ۶ اساسنامه با موضوع وظایف و اختیارات سازمان: «حمایت از حقوق استفاده‌کنندگان خدمات پستی، مخابراتی و فناوری اطلاعات و نظارت مستمر بر اعمال صحیح آن‌ها، تدوین و پیشنهاد دستورالعمل‌های لازم به‌منظور تنظیم روابط ارائه‌کنندگان خدمات پستی، مخابراتی و فناوری اطلاعات و پیشنهاد اصلاح قوانین پستی، مخابراتی و ارتباطی به مراجع ذی‌صلاح قانونی.» [۳۹]
	کارگروه تعیین مصادیق محتوای مجرمانه	ماده ۲۲ قانون جرائم رایانه‌ای: «مسئولیت نظارت بر فضای مجازی و پالایش تارنماهای حاوی محتوای مجرمانه.»
	سازمان فناوری اطلاعات	ماده ۲ اساسنامه: «مدیریت، حمایت و ساماندهی امور مربوط به امنیت فضای تبادل اطلاعات، نرم‌افزار و سخت‌افزار، بالابردن آمادگی الکترونیکی، توسعه اینترنت، توسعهٔ فناوری اطلاعات و کاربردهای آن در کشور.» بند ۱۱ ماده ۷ اساسنامه : «ایجاد، توسعه، نگهداری و بهره‌برداری از مراکز داده ملی اینترنتی به‌منظور میزبانی و حفظ داده‌های حساس دولتی.» [۴۰]
مراجع قضایی	قوه قضاییه	اصل ۱۵۶ قانون اساسی: «رسیدگی و صدور حکم در مورد تظلمات، تعدیات، شکایات، حل‌وفصل دعاوی و رفع خصومات و اخذ تصمیم و اقدام لازم.»
	کارگروه تعیین مصادیق محتوای مجرمانه	ماده ۲۲ قانون جرائم رایانه‌ای: «رسیدگی به شکایات مردمی.»

با توجه به ماده ۴۰، با تشکیل جلسات کمیسیون، احکام عضویت اعضا توسط رئیس کمیسیون صادر می‌گردد. همچنین، کارگروه‌های تخصصی که از نمایندگان نهادهای مسئول امور حاکمیتی مرتبط با صیانت و حفاظت از داده‌های شخصی تشکیل شده‌اند، وظایف مشخص شده در این لایحه را بر عهده دارند و در جلسات اولیه کمیسیون، آیین‌نامه تشکیل کارگروه‌ها تصویب خواهد شد.

مطابق ماده ۴۷ و ۴۸، توجه به نکات زیر ضروری است:
۱- نظارت نه‌تنها بر پردازش داده‌های شخصی، بلکه باید بر کنترل‌کننده و پردازشگر نیز صورت پذیرد.
۲- در نظر گرفتن چهار رکن، یعنی کمیسیون، هیئت نظارت، کارگروه تخصصی و دبیرخانه اجرایی، باعث پیچیده شدن فرایند تنظیم و نظارت و افزایش سازوکار اداری خواهد شد.
۳- اعطای صلاحیت برای حل‌وفصل اختلافات بین کارگروه‌های تخصصی و هیئت نظارت و سایر نهادهای حاکمیتی، در تناقض با صلاحیت‌های دیوان عدالت اداری است.
۴- عضویت نمایندگان نهادهای مسئول امور حاکمیتی در کارگروه‌های تخصصی باید واضح‌تر معرفی شود.
با توجه به این موضوعات، پیشنهاد می‌شود یک کمیسیون برای نظارت بر اجرای صحیح این لایحه و همچنین کنترل‌کنندگان و پردازشگران تشکیل شود و وظایف، صلاحیت‌ها و اختیارات نهادهای مذکور بدون ارجاع به مصوبات بعدی در متن خود لایحه پیش‌بینی شود تا سازوکارهای اداری پیچیده در مسیر حمایت و صیانت از داده‌های شخصی کاهش یابد.

۴-۳- راهکارهای پیشنهادی برای ارتقای قوانین در حوزه زیرساخت‌های فناوری در شهر هوشمند

با توجه به کاستی‌های موجود در قوانین و مقررات مرتبط با داده و حریم خصوصی در شهر هوشمند و با توجه به اهمیت فزاینده استفاده از فناوری‌های مدرن از جمله اینترنت اشیا و بلاک‌چین در توسعه شهر هوشمند، باید راهکارهایی ارائه شود که بتوانند این نواقص را برطرف سازند و همچنین تضمینِ رعایت الزامات حقوقی مرتبط را فراهم کنند.
در جدول ۶، راهکارهای پیشنهادی برای ارتقای قوانین در حوزه زیرساخت‌های فناوری برای شهر هوشمند در ایران با محوریت اینترنت اشیا و زیرساخت‌های محاسبات ابری بررسی شده است. به‌علاوه، لازم است تا این راهکارها با اصول اصلاحی و جلب اعتماد مردم در توسعه شهر هوشمند هماهنگ شوند تا پایداری و پذیرش عمومی آن‌ها تضمین شود.
در این راستا، گزینه‌هایی برای بهبود قوانین و مقررات مربوط به داده و حریم خصوصی در شهر هوشمند پیشنهاد می‌شود. این گزینه‌ها شامل اصلاح و بهبود قوانین موجود، ایجاد قوانین جدید، تشکیل کمیسیون‌ها و هیات‌های تخصصی، آموزش و اطلاع‌رسانی، ارتقای زیرساخت‌های فناوری، همکاری بین نهادها، استفاده از فناوری بلاک‌چین، تشویق به استفاده مسئولانه از داده‌ها، تضمین حقوق حریم خصوصی، راه‌اندازی سازوکارهای نظارت و بازرسی، و ارتقای آگاهی عمومی هستند. این گزینه‌ها می‌توانند بهبود قابل‌توجهی در امنیت و حفاظت داده‌ها در شهر هوشمند به دنبال داشته باشند. این اقدامات به‌منظور ساماندهی و کنترل مناسب داده‌ها، حفاظت از حریم خصوصی شهروندان، ایجاد زیرساخت‌های مناسب و ایجاد محیطی امن و پایدار برای توسعه شهر هوشمند ضروری است. برای اطمینان از اجرای موثر این راهکارها، نیاز به هماهنگی بین نهادها، ارائه آموزش‌های تخصصی برای کارکنان مربوطه، و ایجاد سازوکارهای قوی برای نظارت و ارزیابی پیشرفت این اقدامات وجود دارد[۴۳].
در بخش داده‌های حمل‌ونقل، بلاک‌چین می‌تواند با ایجاد یک دفتر کل غیرقابل تغییر و شفاف، امنیت و اعتماد را افزایش دهد. پروتکل‌هایی مانند پروتکل کاربرد محدود و پروتکل انتقال تله‌متری پیام برای انتقال داده‌های ترافیکی و موقعیت وسایل نقلیه عمومی، می‌توانند به‌خوبی از ویژگی‌های بلاک‌چین بهره‌برداری کنند. با استفاده از بلاک‌چین، داده‌های ترافیکی ثبت و تائید شده و به‌صورت غیرقابل تغییر در دفتر کل توزیع‌شده ذخیره می‌شوند. این کار از تغییرات غیرمجاز و دست‌کاری داده‌ها جلوگیری کرده و به تقویت امنیت و اعتبار اطلاعات کمک می‌کند. بلاک‌چین همچنین می‌تواند با ارائه شفافیت در فرآیندهای تائید و مدیریت داده‌ها، به اعتمادسازی بیشتر بین ذینفعان مختلف از جمله اپراتورها و کاربران نهایی کمک کند.
برای داده‌های محیط‌زیست، بلاک‌چین می‌تواند به بهبود امنیت داده‌های کیفیت هوا، سطح نویز و دما کمک کند. استفاده از بلاک‌چین در این بخش به همراه استانداردهایی مانند LoWPAN6 و RFC 6550 می‌تولند به ثبت و ذخیره‌سازی داده‌ها به‌صورت امن و شفاف کمک کند. بلاک‌چین با ایجاد یک سیستم ثبت دادهِ غیرقابل تغییر و توزیع‌شده، اطمینان می‌دهد که داده‌های محیط‌زیست به‌صورت معتبر و بدون تغییرات غیرمجاز در دسترس قرار گیرند. این ویژگی به همراه تکنیک‌های رمزنگاری و روش‌های مسیریابی امن، از صحت و امنیت داده‌های محیط‌زیست محافظت می‌کند و شفافیت و اعتماد را در میان سازمان‌ها و شهروندان افزایش می‌دهد.

جدول ۶: راهکارهای پیشنهادی برای ارتقای قوانین در حوزه زیرساخت‌های فناوری در شهر هوشمند

Table 6. Proposed Solutions for Enhancing Laws in the Domain of Technology Infrastructure in Smart Cities

حوزه	چالش‌ها	راهکارهای پیشنهادی	اهداف
اینترنت اشیا	امنیت داده‌ها، تعامل بین دستگاه‌ها، حجم بالای داده‌ها	**۱. استانداردسازی و پروتکل‌های امنیتی:** تدوین و اجرای استانداردهای امنیتی برای دستگاه‌های اینترنت اشیا، استفاده از پروتکل‌های رمزنگاری برای داده‌های در حال انتقال. **۲. شبکه‌های ارتباطی پیشرفته:** بهبود زیرساخت‌های مخابراتی برای پشتیبانی از دستگاه‌های اینترنت اشیا، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های 5G برای افزایش سرعت و کاهش تأخیر. **۳. مدیریت و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها:** پیاده‌سازی انواع سامانه‌های تحلیل داده‌های بزرگ برای پردازش و مدیریت حجم بالای داده‌های اینترنت اشیا. **۴. ایجاد چارچوب‌های قانونی:** تدوین قوانین برای حفاظت از حریم خصوصی و امنیت داده‌های اینترنت اشیا و تنظیم مقررات برای مسئولیت‌پذیری تولیدکنندگان و ارائه‌دهندگان خدمات.	**۱. افزایش امنیت:** حفاظت از داده‌های کاربران و دستگاه‌های متصل **۲. بهبود عملکرد شبکه:** کاهش تأخیر و افزایش سرعت انتقال داده‌ها. **۳. مدیریت کارآمد داده‌ها:** پردازش و تحلیل داده‌های با حجم بالا به‌صورت مؤثر. **۴. پایداری و اطمینان:** افزایش اعتماد عمومی به فناوری‌های اینترنت اشیا از طریق مقررات شفاف و مؤثر.
زیرساخت‌های محاسبات ابری	امنیت و حریم خصوصی داده‌ها، تضمین دسترسی پیوسته، هزینه‌ها	**۱. حفاظت از داده‌ها:** تدوین مقررات برای حفاظت از داده‌های ذخیره شده در فضای ابری، استفاده از فناوری‌های رمزنگاری قوی برای داده‌های استراحت و در حال انتقال. **۲. پشتیبانی از زیرساخت‌های ابری:** ارتقاء زیرساخت‌های شبکه برای پشتیبانی از سرویس‌های ابری، افزایش پهنای باند و بهبود سرعت انتقال. **۳. تضمین دسترسی و عملکرد:** توسعه سامانه‌های پشتیبانی و بازیابی برای تضمین دسترسی پیوسته و کاهش زمان‌های خرابی. **۴. مدیریت هزینه‌ها:** ایجاد مقررات برای مدیریت هزینه‌های استفاده از خدمات ابری، نظارت بر قراردادها و پرداخت‌ها، تشویق به استفاده بهینه از منابع ابری.	**۱. افزایش امنیت داده‌ها:** حفاظت از داده‌های حساس و حفظ حریم خصوصی کاربران. **۲. بهبود دسترسی و عملکرد:** تضمین دسترسی پیوسته و کارایی بالا برای خدمات ابری. **۳. مدیریت بهینه هزینه‌ها:** کاهش هزینه‌های مربوط به استفاده از خدمات ابری و افزایش بهره‌وری. **۴. پایداری و مقیاس‌پذیری:** ارائه زیرساخت‌های مقیاس‌پذیر و پایدار برای پشتیبانی از رشد سریع نیازهای ابری.
بلاک‌چین	مقیاس‌پذیری، هزینه‌ها، تنظیمات قانونی	**۱. توسعه زیرساخت‌های بلاک‌چین:** سرمایه‌گذاری در توسعه و بهینه‌سازی زیرساخت‌های بلاک‌چین برای مقیاس‌پذیری و کارایی. **۲. تدوین قوانین و مقررات:** تنظیم قوانین و مقررات مربوط به استفاده از فناوری بلاک‌چین، از جمله قوانین مربوط به قراردادهای هوشمند و حفظ حریم خصوصی. **۳. یکپارچگی با سامانه‌های موجود:** ایجاد راهکارهای یکپارچه برای ادغام بلاک‌چین با سامانه‌های اطلاعاتی و زیرساخت‌های فناوری موجود. **۴. آموزش و توسعه مهارت‌ها:** آموزش نیروی انسانی و توسعه مهارت‌های مربوط به بلاک‌چین در سطح ملی.	**۱. افزایش مقیاس‌پذیری:** بهبود مقیاس‌پذیری و عملکرد شبکه‌های بلاک‌چین. **۲. کاهش هزینه‌ها:** کاهش هزینه‌های مربوط به پیاده‌سازی و نگهداری بلاک‌چین. **۳. شفافیت و امنیت:** افزایش شفافیت و امنیت داده‌ها از طریق فناوری بلاک‌چین. **۴. پذیرش و توسعه:** تسهیل پذیرش فناوری بلاک‌چین و ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای توسعه بیشتر.

در داده‌های انرژی، سلامت، و ایمنی، بلاک‌چین می‌تواند به ارائه لایه‌های اضافی امنیت و شفافیت کمک کند. به‌عنوان‌مثال، در داده‌های انرژی مانند مصرف برق و گاز، بلاک‌چین می‌تواند به نظارت و تائید صحت داده‌ها در شبکه‌های انرژی کمک کند. داده‌های سلامت و ایمنی که شامل اطلاعات حساس و شخصی است، می‌تواند با استفاده از بلاک‌چین به‌صورت غیرقابل تغییر و امن، ذخیره شده و به اشتراک گذاشته شوند. استانداردهای SCTP، ISO/IEC 27001، و ISO/IEC 29100 می‌توانند با بهره‌برداری از ویژگی‌های بلاک‌چین، از جمله قابلیت‌های ثبت غیرقابل تغییر و تائید هویت، به بهبود امنیت و حریم خصوصی داده‌های حساس کمک کنند. این امر به بهبود اعتماد در مدیریت و دسترسی به اطلاعات مهم سلامت و ایمنی می‌انجامد.

در نهایت، بلاک‌چین می‌تواند در داده‌های شهروندی نیز به افزایش امنیت و اعتماد کمک کند. با استفاده از بلاک‌چین، نظرات و پیشنهادات شهروندان و درخواست‌های خدمات شهری می‌تواند به‌صورت امن و شفاف ثبت و مدیریت شود. بلاک‌چین با ارائه یک سامانه ثبت غیرقابل تغییر و تائید هویت کاربران، به جلوگیری از تقلب و دست‌کاری در اطلاعات شهروندان کمک می‌کند. این ویژگی به همراه پروتکل‌ها و استانداردهای موجود، از جمله ONS و OASIS، به افزایش اعتماد عمومی و بهبود تعاملات میان شهروندان و نهادهای شهری کمک می‌کند. بلاک‌چین با ارائه امنیت و شفافیت اضافی، می‌تواند به بهبود کیفیت خدمات شهری و ارتقاء رضایت شهروندان منجر شود. با اعمال این راهکارها به طرز موثر، می‌توان بهبود قوانین و مقررات مربوط به داده و حریم خصوصی در شهر هوشمند را تضمین کرد و محدودیت‌های قانونی برای استفاده از اینترنت اشیا و فناوری بلاک‌چین را بهبود بخشید. همچنین، امکان ایجاد یک محیط امن و پایدار برای افراد و نهادها در این حوزه فراهم می‌شود.

۵-نتیجه‌گیری

بررسی وضعیت امنیتی و حریم خصوصی در شهرهای هوشمند و ارائه راهکارهای بهبود آن‌ها نشان می‌دهد که با پیشرفت فناوری و گسترش شهرهای هوشمند، مسائل امنیت داده‌ها و حریم خصوصی افراد به یکی از چالش‌های اساسی این محیط‌ها تبدیل‌شده است. این مسائل شامل مواردی نظیر دسترسی غیرمجاز به داده‌ها، تهدیدات سایبری و نقض حریم خصوصی افراد هستند که نیازمند راهکارهای نوین و موثر برای حل آن‌ها هستند. برای بهبود وضعیت امنیتی و حریم خصوصی در شهرهای هوشمند، اقداماتی از جمله اصلاح و بهبود قوانین و مقررات مربوطه، ایجاد زیرساخت‌های فناوری مناسب، آموزش و آگاهی‌بخشی به افراد و همکاری بین نهادها و صنایع، ضروری است. همچنین، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین از قبیل اینترنت اشیا و بلاک‌چین می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در امنیت و حفاظت از داده‌ها و حریم خصوصی در شهرهای هوشمند ایجاد کند. با اعمال موثر این راهکارها و هماهنگی نهادها و صنایع مختلف، امکان ساخت شهرهای هوشمند با سطح بالایی از امنیت و حریم خصوصی ممکن می‌شود. به همین دلیل، تجزیه‌وتحلیل دقیق این مسائل و ارائه راهکارهای بهبود، به پیشرفت و توسعه محیط‌های شهری هوشمند و افزایش رضایت شهروندان از آن‌ها کمک می‌کند.

مراجع

[1] F. Moqaddari, “Redefining the concept of smart cities and the process of urban smartification based on the conceptual and functional evolution of smart cities,” *Urban Design Discourse; Review of Contemporary Literature and Theories*, vol. 1, no. 2, 2020 [in Persian].

[2] H. M. Kim, S. Sabri, and A. Kent, “Smart cities as a platform for technological and social innovation in productivity, sustainability, and livability: A conceptual framework,” in *Smart Cities for Technological and Social Innovation*, Academic Press, 2021, pp. 9–28, doi: 10.1016/b978-0-12-818886-6.00002-2.

[3] A. Randhawa and A. Kumar, “Exploring sustainability of smart development initiatives in India,” *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, no. 2, pp. 701–710, 2017, doi: 10.1016/j.ijsbe.2017.08.002.

[4] M. Whaiduzzaman, A. Barros, M. Chanda, S. Barman, T. Sultana, M. S. Rahman, and C. Fidge, “A review of emerging technologies for IoT-based smart cities,” *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9271, 2022, doi: 10.3390/s22239271.

[5] A. Venkatesh and M. S. Eastaff, “A study of data storage security issues in cloud computing,” *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1741–1745, 2018, doi: 10.9756/bijsesc.9012.

[6] M. Sookhak, H. Tang, Y. He, and F. R. Yu, “Security and privacy of smart cities: a survey, research issues and challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1718–1743, 2018, doi: 10.1109/comst.2018.2867288.

[7] B. Hammi, R. Khatoun, S. Zeadally, A. Fayad, and L. Khoukhi, “IoT technologies for smart cities,” *IET Networks*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1049/iet-net.2017.0163.

[8] M. H. P. Rizi and S. A. H. Seno, “A systematic review of technologies and solutions to improve security and privacy protection of citizens in the smart city,” *Internet of Things*, vol. 20, p. 100584, 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100584.

[9] L. D. Radu, “Disruptive technologies in smart cities: a survey on current trends and challenges,” *Smart Cities*, vol. 3, no. 3, pp. 1022–1038, 2020, doi: 10.3390/smartcities3030051.

[10] E. Ismagilova, L. Hughes, N. P. Rana, and Y. K. Dwivedi, “Security, privacy and risks within smart cities: Literature review and development of a smart city interaction framework,” *Information Systems Frontiers*, pp. 1–22, 2022, doi: 10.1007/s10796-020-10044-1.

[11] S. M. Zanjani, S. M. Zanjani, H. Shahinzadeh, M. Moazzami, F. Ebrahimi and N. Nourmahnad, "Leveraging Big Data Intelligence for Electronic Health Data Collection and Mining in Smart Innovative Cities: Approaches and Applications," *7th Iranian Conference on Advances in Enterprise Architecture (ICAEA)*, Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2023, pp. 45-52, doi: 10.1109/ICAEA60387.2023.10414446.

[12] H. K. Channi and R. Kumar, “The role of smart sensors in smart city,” in *Smart Sensor Networks: Analytics, Sharing and Control*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 27–48, doi: 10.1007/978-3-030-77214-7_2.

[13] A. Jantarani, M. Barati, M. Ghobakhloo, A. Shahin, and M. Talari, “Identifying the requirements of using the Industrial Internet of Things in the automotive supply chain,” *Journal of Operations Management*, vol. 2, no. 7, pp. 27–54, 2022.

[14] L. Xia, D. T. Semirumi, and R. Rezaei, “A thorough examination of smart city applications: Exploring challenges and solutions throughout the life cycle with emphasis on safeguarding citizen privacy,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, p. 104771, 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104771.

[15] Faghihi and Jamshidi, “A review of user data protection laws in selected countries,” *Expert Reports (Islamic Consultative Assembly Research Center)*, vol. 94, no. 26, pp. 506–543, 2018 [in Persian].

[16] F. Farahmand, “A comparative study of the data protection regulation with the General Data Protection Regulation (GDPR),” *Technology Law*, 2023, doi: 10.22133/mtlj.2023.383528.1164 [in Persian].

[17] S. G. Jamison, “Creating a National Data Privacy Law for the United States,” *Cybaris Intell. Prop. L. Rev.*, vol. 10, p. 1, 2019.

[18] G. Pyo and C. Ji, “Cybersecurity and Data Protection: A Study on China's New Cybersecurity Legal Regime and How It Affects Inbound Investment in China,” *International Lawyer*, vol. 51, p. 537, 2018.

[19] J. Eslami and K. Pishgadam, “A comparative study of the concept of freedom in the Citizen Rights Charter and the Universal Declaration of Human Rights,” *Legal Research*, vol. 20, no. 45, pp. 95–123, 2021, doi: 10.48300/jlr.2021.129106 [in Persian].

[20] H. Mazarei, M. Dadvar, and M. Atabakzadeh, “Distributed Denial of Service Attacks Detection in Internet of Things Using the Majority Voting Approach,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 49, pp. 23–48, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1984927.1201.

[21] F. Fazli, M. Mansubbassiri, and F. Babazadeh, “A-RPL: Routing Algorithm with the Ability to Support Mobility in Internet of Things Networks,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 50, pp. 11–32, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1975641.1183.

[22] S. Tahmasebi Limooni, S. Ghasemi, and R. Ghorbanloo, “Identifying the common threats and vulnerabilities in the Internet of Things (IoT) and offering security policies for confronting them,” *Journal of Knowledge Studies*, vol. 12, no. 44, pp. 32–54, 2019.

[23] D. Mishra, P. Vijayakumar, V. Sureshkumar, R. Amin, S. H. Islam, and P. Gope, “Efficient authentication protocol for secure multimedia communications in IoT-enabled wireless sensor networks,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 77, pp. 18295–18325, 2018, doi: 10.1007/s11042-017-5376-4.

[24] A. H. Salehi Shayegan, A. Zakeri, and A. Salehi Shayegan, “Optimizing resources allocation for fog computing-based internet of things networks to reduce latency cost,” *Computational Economics*, vol. 1, no. 3, pp. 99–112, 2022.

[25] P. Lis and J. Mendel, “Cyberattacks on critical infrastructure: An economic perspective,” *Economics and Business Review*, vol. 5, no. 2, pp. 24–47, 2019, doi: 10.18559/ebr.2019.2.2.

[26] A. R. Berkel, P. M. Singh, and M. J. van Sinderen, "An information security architecture for smart cities," in *Business Modeling and Software Design: 8th International Symposium, BMSD 2018, Vienna, Austria, July 2-4, 2018, Proceedings 8*, Springer International Publishing, 2018, pp. 167-184, doi: 10.1007/978-3-319-94214-8_11.

[27] R. Gupta, N. K. Jadav, A. Nair, S. Tanwar, and H. Shahinzadeh, "Blockchain and AI-based secure onion routing framework for data dissemination in IoT environment underlying 6g networks," in *2022 Sixth International Conference on Smart Cities, Internet of Things and Applications (SCIoT)*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/sciot56583.2022.9953671.

[28] G. Shahinzadeh, H. Shahinzadeh, and S. Tanwar, "Security and Privacy Issues in the Internet of Things: A Comprehensive Survey of Protocols, Standards, and the Revolutionary Role of Blockchain," in *2024 8th International Conference on Smart Cities, Internet of Things and Applications (SCIoT)*, 2024, pp. 59-67, doi: 10.1109/sciot62588.2024.10570131.

[29] A. Asilian, H. Shahinzadeh, S. M. Zanjani, G. B. Gharehpetian, A. Y. Abdelaziz, and S. Tanwar, "The Role of Microelectronics for Smart Cities, Smart Grids and Industry 5.0: Challenges, Solutions, and Opportunities," in *13th Smart Grid Conference (SGC)*, 2023, pp. 1-12, doi: 10.1109/sgc61621.2023.10459310.

[30] S. M. Zanjani, H. Shahinzadeh, S. M. Kargar, M. Moazzami, F. Ebrahimi, and M. Hemmati, "Internet of Things Security: A Review on Challenges, Solutions and Research Directions," in *2023 7th International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, 2023, pp. 1-8, doi: 10.1109/iot60973.2023.10365381.

[31] L. Cui, G. Xie, Y. Qu, L. Gao, and Y. Yang, "Security and privacy in smart cities: Challenges and opportunities," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 46134-46145, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2853985.

[32] M. Taghavayi and M. Shafie, "Analysis of indicators and strategies for achieving urban smartification (Case study: Isfahan City)," *Spatial Planning*, vol. 12, no. 1, pp. 51-80, 2022, doi: 10.22108/sppl.2022.131222.1621 [in Persian].

[33] A. Tavakoli and D. Dehghani, "The conflict between security-oriented approaches and fair trial principles," *Criminal Law Research Quarterly*, vol. 1, no. 3, pp. 7-34, 2013 [in Persian].

[34] Esmaeili and T. Tahan-Nazif, "An analysis of the nature of the Supreme Council of the Cultural Revolution in the Constitutional Law of the Islamic Republic of Iran," *Islamic Law Research Journal*, vol. 28, no. 9, pp. 87-120, 2008 [in Persian].

[35] S. E. Hosseini, "The limitations of the Islamic Consultative Assembly in legislation (Article 71 of the Constitution)," *Islamic Government*, vol. 66, no. 17, pp. 163-194, 2012 [in Persian].

[36] B. Ansari and Alvandenjad, "The nature and position of regulatory bodies in cyberspace governance in Iran," *Legal Lessons*, vol. 6, no. 1, pp. 281-314, 2020 (in Persian).

[37] A. Asgharnia, Rostami, and Vali, "Critique and pathology of the legal system regulating economic competition in Iran from a competition law perspective," *Industrial Economics Research Quarterly*, vol. 4, no. 11, pp. 61-76, 2020, doi: 10.30473/indeco.2020.7549 [in Persian].

[38] K. Khorramdel, Estavarsangari, K. Alaei, and Zarabi, "Challenges related to regulatory authorities overseeing audio and video production in cyberspace," *Administrative Law Research Quarterly*, vol. 9, no. 30, pp. 31-56, 2022, doi: 10.52547/qjal.9.30.31 [in Persian].

[39] Salami, Mazhari, and Mohammadi, "Urban management responsibilities in realizing citizens' environmental rights (with a focus on the resolutions of Tehran City Council)," *Comparative Law Research and Development Quarterly*, vol. 4, no. 11, pp. 84-111, 2021, doi: 10.22034/law.2021.533814.1092 [in Persian].

[40] F. Elashti and J. Javan Jafari Bojnordi, "Violation of the freedom of information flow in situational crime prevention in cyberspace," *Criminal Law Research Quarterly*, vol. 5, no. 18, pp. 69-100, 2017, doi: 10.22054/jclr.2017.7400 [in Persian].

[41] N. A. Nemati, Nabiollah, and S. Sadeghi-Neshat, "Civil liability for breaches of data security in cyber threats," *Security and Protective Research*, vol. 23, no. 6, pp. 157-186, 2017 [in Persian].

[42] Ghanad, Aligholi, and Amireh, "The concept and importance of personal data and privacy protection in cyberspace," *Technology Law*, vol. 1, no. 1, pp. 297-322, 2020, doi: 10.22133/clj.2020.243290.1016 [in Persian].

[43] W. Kozłowski and K. Suwar, "Smart city: definitions, dimensions, and initiatives," 2021, doi: 10.35808/ersj/2442.

Journal of Southern
Communication
Engineering

Islamic Azad University Bushehr Branch

Online ISSN: 2980-9231

Vol. 15, Issue 57, Autumn 2025

Contents

Journal of Southern Communication Engineering
Islamic Azad University Bushehr Branch

Journal of Southern Communication Engineering

License holder: Islamic Azad University Bushehr Branch

Address: Iran, Bushehr, Islamic Azad University Bushehr Branch
Tel: (+98) 9107837420 **Fax:** (+98) 771 5683717
Website: https://jce.bushehr.iau.ir/ **eISSN:** 2980-9231
Email: jce.iaub@gmail.com – jce@ iaubusher.ac.ir

Indexed by:

JCE is published according to 87/422092 permission of Islamic Azad University.