



Islamic Azad University , Shiraz Branch
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis



نشریه

تحلیل مدارها،

داده ها

و سامانه ها





نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها

هیأت تحریریه

مدیر مسئول	دکتر حامد آگاهی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز
سردبیر	دکتر طاهر نیکنام	دانشگاه صنعتی شیراز
مدیر داخلی	دکتر زهرا مقصودزاده سروستانی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز
کارشناس	مهندس سیده ندا حسینی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز

هیأت تحریریه

استاد	دکتر طاهر نیکنام	دانشگاه صنعتی شیراز
استاد	دکتر رحیم غیور	دانشگاه شیراز
استاد	دکتر حبیب اله عبیری	دانشگاه شیراز
استاد	دکتر حمید خالوزاده	دانشگاه صنعتی خواجه نصیر
استاد	دکتر اصغر کشت کار	دانشگاه بین المللی امام خمینی
استاد	دکتر محمدباقر منهاج	دانشگاه صنعتی امیرکبیر
استاد	دکتر محمد ناصر مقدسی	دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
استاد	دکتر حسن توکلی	دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله
استاد	دکتر سید ابراهیم افجه ای	دانشگاه شهید بهشتی
دانشیار	دکتر حامد آگاهی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز
دانشیار	دکتر احمد فخاریان	دانشگاه آزاد اسلامی قزوین
دانشیار	دکتر امیرمسعود افتخاری مقدم	دانشگاه آزاد اسلامی قزوین
دانشیار	دکتر مجید ابن علی	دانشگاه شهرکرد
دانشیار	دکتر محمدصادق جوادی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز



نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها

سال سوم - شماره اول - بهار ۱۴۰۴

فهرست مقالات

ردیف	عنوان مقاله / نویسندگان	صفحه
۱	طراحی کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی برای بهبود عملکرد سیستم ترمز ضد قفل امیر مقتدایی راد	۱
۲	رویکرد جدید در تشخیص بیماری صرع مبتنی بر الگوریتم عنکبوت اجتماعی و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بهرام دهقان	۱۳
۳	بررسی امواج فراصوت، ویژگی ها و کاربردهای آن اسماء لک [*] ، فرشته صافی	۲۳
۴	تجزیه و تحلیل عددی سنسور مادون قرمز تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر بلور فوتونی با برش طرفین و شکاف بیضوی برای تشخیص محدوده وسیع ضریب شکست سید حسین مؤید، مجتبی صادقی [*] ، زهرا عادل پور	۳۲
۵	طبقه بندی حالات منتخب صورت از طریق سیگنال الکترومایوگرافی تک کاناله به وسیله شبکه عصبی مصنوعی و درخت تصمیم نیلوفر شجاعیان [*] ، بابک رضایی افشار	۴۴
۶	توسعه و پیاده سازی شبکه های هوشمند انرژی با استفاده از فناوری بلاکچین: چالش ها و فرصت ها علیرضا جوشن	۵۴

Fuzzy Logic-Based Controller Design for Enhancing Anti-lock Braking System Performance

Amir Moghtadaei rad^{1*}

¹ Department of Computer and Electrical Engineering, Has.c., Islamic Azad University, Alborz, Iran
Amir.Moghtadaei@iau.ac.ir

Abstract: This paper presents the design of a fuzzy controller for vehicles' Anti-lock Braking System (ABS), aiming to prevent wheel lockup during braking and enhance vehicle control under critical conditions. Wheel lockup can lead to an increased stopping distance and a loss of vehicle control, particularly on slippery road surfaces. The ABS accurately controls the hydraulic pressure within the braking system to maintain the longitudinal slip between the tire and the road surface within an allowable range. In this study, an optimal fuzzy controller is designed to achieve desirable performance in the ABS. The proposed controller can effectively prevent wheel lockup by adjusting the braking force on the front and rear wheels while improving braking performance under various road conditions. This research focuses on utilizing a fuzzy control system to enable rapid adaptation to different road conditions and mitigate the negative effects caused by wheel slips. Simulation results demonstrate that the proposed system can deliver superior performance compared to conventional braking systems. By improving the design of the ABS, this study contributes significantly to enhancing vehicle safety and reducing road accidents.

Keywords: Anti-lock braking system (ABS), fuzzy controller, Hydraulic Control Unit, Electronic Control Unit.

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025

Received: 2025-02-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-03-19

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcda>

Published: 2025-06-21

CITATION

Moghtadaei rad, A., "Fuzzy Logic-Based Controller Design for Enhancing Anti-lock Braking System Performance", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 1-12, 2025.
 DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Anti-lock braking systems (ABS) are critical for vehicle safety, preventing wheel lockup during sudden braking and enhancing steering control, especially on slippery roads. The design of a robust control system for ABS can significantly improve braking performance and vehicle stability. Sudden braking and wheel locking are among the most critical dangers that threaten vehicles and passengers. Wheel locking increases braking distance and reduces steering control, particularly on wet and slippery surfaces where the risk of wheel locking is higher. Therefore, a system that can control wheel brakes and prevent slippage is essential. This paper focuses on designing a fuzzy logic controller for controlling the opening and closing of electric valves to generate braking force on all four wheels of the vehicle. The motivation behind this study is to enhance road safety and reduce the likelihood of accidents caused by uncontrolled wheel slip.

2- Methodology

The proposed study utilizes a fuzzy logic controller to manage the hydraulic pressure in the braking system. The control strategy involves monitoring wheel speed sensors and estimating longitudinal slip to adjust the braking force accordingly. The fuzzy controller is designed with four main components: fuzzification, fuzzy inference engine, rule base, and defuzzification. The methodology includes the development of a simulation model using MATLAB/Simulink to evaluate the performance of the proposed control system under various road conditions. The model incorporates vehicle dynamics, hydraulic brake modeling, and sensor data processing to ensure accurate control of wheel slip. Additionally, real-world scenarios such as sudden braking on wet and icy roads were simulated to assess the system's robustness and adaptability.

3- Results and discussion

Simulation results indicate that the fuzzy logic controller effectively maintains the longitudinal slip within an optimal range, preventing wheel lockup while maximizing braking efficiency. Compared to conventional ABS systems, the proposed controller offers improved stability and shorter braking distances, especially on slippery roads. The performance evaluation under different braking scenarios demonstrates the adaptability of the controller to varying road conditions. The proposed system shows robustness against parameter variations and external disturbances, proving its applicability in real-world driving conditions. The comparative analysis with traditional control methods highlights the advantages of using a fuzzy logic approach, particularly in complex and unpredictable environments.

4- Conclusion

The fuzzy logic-based ABS controller designed in this study offers a significant improvement in vehicle safety by preventing wheel lockup and enhancing braking performance. The simulation results confirm that the proposed system can adapt to diverse road conditions and provide reliable control of wheel slip. Future work could involve the implementation of the controller in a real-time embedded system and testing it on a physical vehicle to validate simulation results. Furthermore, exploring hybrid control strategies that combine fuzzy logic with machine learning techniques could further enhance the adaptability and efficiency of ABS systems.





طراحی کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی برای بهبود

عملکرد سیستم ترمز ضد قفل

امیر مقتدایی راد^{*}۱- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد هشتگرد، دانشگاه آزاد اسلامی، البرز، ایران (Amir.Moghtadai@iau.ac.ir)

چکیده: این مقاله به طراحی یک کنترل کننده فازی برای سیستم ترمز ضد قفل خودرو پرداخته که هدف آن جلوگیری از قفل شدن چرخ ها در هنگام ترمز و بهبود کنترل خودرو در شرایط بحرانی است. قفل شدن چرخ ها می تواند منجر به افزایش فاصله توقف خودرو و از دست رفتن کنترل آن به ویژه در شرایط جاده ای لغزنده شود. سیستم ترمز ضد قفل با کنترل دقیق فشار هیدرولیک در سیستم ترمز، لغزش طولی ایجاد شده بین تایر و سطح جاده را در یک محدوده مجاز کنترل می کند. در این مقاله، با طراحی کنترل کننده فازی بهینه، هدف دستیابی به عملکرد مطلوب در سیستم ترمز ضد قفل است. این کنترل کننده با تنظیم نیروی ترمز بر روی چرخ های جلو و عقب خودرو، می تواند از قفل شدن چرخ ها جلوگیری کند و در عین حال عملکرد سیستم ترمز را در شرایط مختلف جاده ای بهبود بخشد. این تحقیق به استفاده از سیستم کنترل فازی جهت تطبیق سریع با شرایط مختلف جاده ای و کاهش اثرات منفی ناشی از لغزش طولی چرخ ها پرداخته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که این سیستم می تواند عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم های ترمز معمولی ارائه دهد. این مقاله از طریق بهبود طراحی سیستم ترمز ضد قفل، نقش قابل توجهی در افزایش ایمنی خودروها و کاهش حوادث جاده ای ایفا می کند.

واژه های کلیدی: سیستم ترمز ضد قفل، کنترل کننده فازی، واحد کنترل هیدرولیک، واحد کنترل الکترونیک.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

در شرایط مختلف نمی باشد، از معیار دیگری با عنوان لغزش طولی برای این منظور استفاده می شود [۱-۳].

لغزش طولی عبارت است از اختلاف سرعت خطی تایر و خودرو در راستای طولی تقسیم بر سرعت تایر یا خودرو (هر کدام که بیشتر باشد). به این ترتیب لغزش طولی برای حالات شتاب گیری و ترمز گیری از روابط زیر به دست می آید:

$$\lambda = (r\omega - V) / V < 0 \quad (1)$$

لغزش طولی هنگام شتاب گیری:

$$\lambda = (r\omega - V) / V > 0 \quad (2)$$

نیروی اصطکاک بین تایر و سطح جاده تابع میزان لغزش طولی بین آنها می باشد (شکل ۲). در حالت کلی تغییرات مقدار مطلق نیروی اصطکاک طولی نسبت به تغییرات لغزش طولی شبیه به نمودار ۱ می باشد. مؤلفه عرضی نیروی اصطکاک بین تایر و سطح جاده تابع لغزش طولی است و تغییرات آن با لغزش طولی بر روی جاده های مختلف با فرض ثابت بودن زاویه لغزش (زاویه راستای طولی تایر با راستای سرعت مطلق آن) در حالت کلی شبیه نمودار ۲ است:

۱- مقدمه

حرکت خودرو و پایداری آن بر روی جاده به طور کلی بستگی به نیروی اصطکاک به وجود آمده بین تایرها و سطح جاده دارد. با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات که محورهای آن در راستای طول و عرض تایر هستند، می توان نیروی اصطکاک بین تایر و سطح جاده را به دو مؤلفه طولی و عرضی تجزیه نمود که مؤلفه طولی نیروی اصطکاک باعث ترمز گیری و شتاب خودرو شده و مؤلفه عرضی آن حرکات عرضی خودرو (دورزدن و حرکت به چپ و راست) را ایجاد می کند (شکل ۱). بسته به شرایط حرکت خودرو و جاده مقدار هر کدام از مؤلفه های نیروی اصطکاک می تواند از صفر تا مقدار حداکثر تغییر نماید. اختلاف سرعت بین تایر و سطح جاده (سرعت خودرو) در نقطه تماس باعث به وجود آمدن نیروی اصطکاک طولی برخلاف جهت سرعت نسبی بین آنها می شود. نیروی اصطکاک طولی عامل شتاب گیری و ترمز گیری خودرو است. هنگام ترمز گیری، سرعت تایر کمتر از سرعت خودرو یا جاده و در موقع شتاب گیری، بیشتر از آن است. از آنجا که اختلاف سرعت تایر و سرعت خودرو معیار خوبی برای تحلیل نیروی اصطکاک

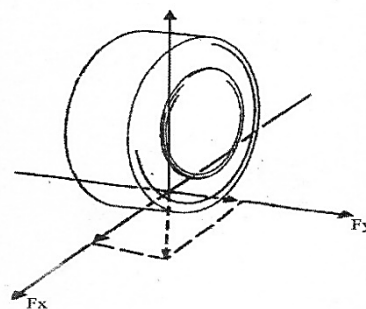


که بستگی به شرایط ترمزگیری و وضعیت هریک از چرخها دارد، کنترل نموده و با در نظر گرفتن اولویت پایداری خودرو بر روی جاده عملکرد سیستم ترمز را بهبود می بخشد [۴]. این مقاله شامل ۵ بخش است. بخش اول مقدمه‌ای بر دلیل استفاده از سیستم ترمز ضد قفل در خودرو است. بخش دوم به نحوه عملکرد سیستم ترمز ضد قفل و مدلسازی آن می پردازد. مدل سیستم ترمز خودرو با در نظر گرفتن نیروهای کشنده جلو و عقب و همچنین نیروهای نرمال وارد بر چرخها توسعه داده شده است. این مدل از دینامیک چرخها و قوانین فیزیکی مانند قانون دوم نیوتن و قوانین گشتاور بهره می برد. برای کنترل کننده فازی طراحی شده، دو کنترل کننده جداگانه برای چرخهای جلو و عقب خودرو در نظر گرفته شده اند. ورودی کنترل کننده فازی، خطای ردیابی لغزش مرجع است و خروجی آن گشتاور ترمزی مورد نیاز برای کنترل سیستم است. بخش سوم به شبیه سازی و تست مدل می پردازد. مدل سیستم ترمز ضد قفل در محیط Simulink نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است. پارامترهای فیزیکی و دینامیکی خودرو در جدول های مقاله ذکر شده اند و نتایج شبیه سازی شامل گشتاور ترمزی، لغزش چرخها و تغییرات سرعت خودرو ارائه شده اند. در بخش چهارم کنترل کننده فازی طراحی شده و جداول مربوط به قواعد فازی و ورودی ها و خروجی های سیستم کنترل فازی آورده شده است. در بخش پنجم تست و ارزیابی کنترل کننده فازی، صورت گرفته و عملکرد کنترل کننده فازی در ردیابی لغزش مرجع و جلوگیری از قفل شدن چرخها بررسی شده است. نتایج نشان داده اند که سیستم کنترل فازی توانسته است لغزش چرخها را در محدوده مجاز نگه دارد و عملکرد ترمز را بهبود بخشد. در نهایت در بخش نتیجه گیری، نتیجه و دستاوردهای این مقاله توضیح داده شده است.

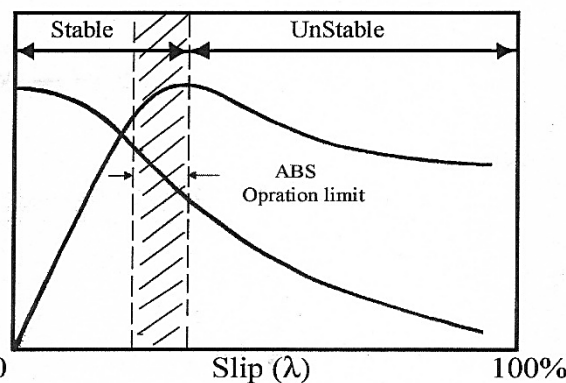
۲- ساختار و عملکرد سیستم ترمز ضد قفل:

در هنگام ترمزگیری با فشردن پدال ترمز، فشار هیدرولیکی ایجاد شده در سیلندر اصلی به وسیله سیال عامل که همان روغن است از طریق لوله های ترمز به مکانیزم های ترمزگیری بر روی چرخها منتقل می شود. با ورود سیال تحت فشار به این مکانیزمها لنتها یا کفشک های ترمز به سطوح دیسک یا کاسه چرخ فشرده شده و باعث کاهش سرعت دورانی چرخها می گردند. کاهش سرعت چرخها و به وجود آمدن لغزش در ناحیه تماس تایر با سطح جاده تولید نیروی اصطکاک در جهت خلاف حرکت نموده و باعث کاهش سرعت خودرو می گردد و اگر ترمزگیری ادامه یابد خودرو متوقف خواهد شد. یک سیستم ترمز ضد قفل معمولی از سه بخش اصلی زیر تشکیل شده است:

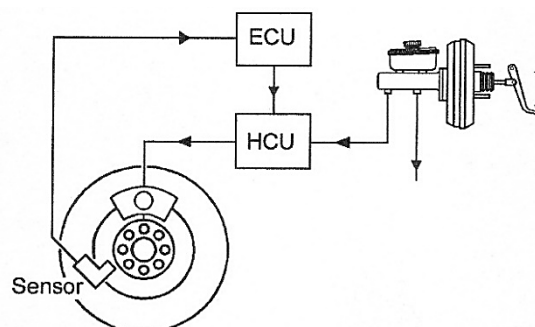
- واحد کنترل هیدرولیک
 - واحد کنترل الکترونیک
 - سنسورهای اندازه گیری سرعت دورانی چرخها.
- نمای کلی اجزای سیستم ترمز ضد قفل مطابق شکل (۳) است.



شکل (۱): تصویر شماتیک نیروهای وارد بر تایر [۱]



شکل (۲): نمایش شماتیک تغییرات مؤلفه طولی (نمودار ۱) و مؤلفه عرضی (نمودار ۲) نسبت به تغییرات لغزش طولی [۱]



شکل (۳): تصویر شماتیک ارتباط اجزا سیستم ترمز ضد قفل

باتوجه به نیروهای ارائه شده برای نیروهای اصطکاک طولی و عرضی، به طور کلی می توان گفت که افزایش لغزش طولی در ناحیه ناپایدار باعث کاهش نسبی مؤلفه طولی نیروی اصطکاک و افت شدید مؤلفه عرضی نیروی اصطکاک می گردد. به طوری که در لغزش طولی ۱۰۰٪ (حالت قفل شدگی کامل چرخ) نیروی اصطکاک عرضی تقریباً صفر می شود که در چنین شرایطی خودرو از کنترل خارج شده و دیگر فرمان پذیر نیست.

امروزه فناوری سیستم ترمز ضد قفل^۱ برای جلوگیری از قفل شدن چرخها و کنترل میزان لغزش طولی در راستای افزایش پایداری خودرو و کاهش فاصله توقف و بطور کلی بهبود پایداری و ایمنی خودرو هنگام ترمزگیری در شرایط آب و هوایی وجاده ای مورد استفاده قرار می گیرد. سیستم ترمز ضد قفل از طریق کنترل فشار هیدرولیک سیستم ترمز لغزش طولی ایجاد شده بین تایر و سطح جاده را در یک محدوده مجاز

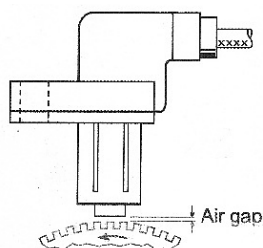
^۱ Antilock Brake Syatem (ABS)



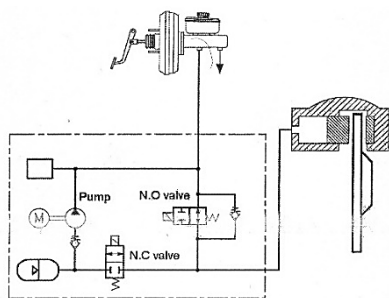
محفظه سیلندر چرخ حبس و ثلثت می‌کند. در این هنگام اگر راننده نیروی بیشتری را به پدال ترمز وارد نماید علیرغم افزایش فشار در سیلندر اصلی، فشار در سیلندر ترمز چرخ مورد نظر ثابت باقی می‌ماند.

۲-۱-۳- فاز کاهش فشار:

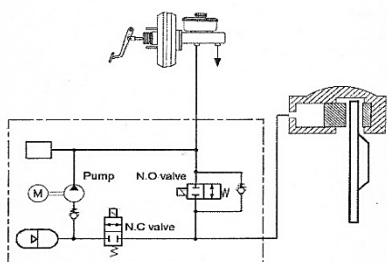
این فاز زمانی اتفاق می‌افتد که میزان لغزش در یکی از چرخ‌ها از مقدار مجاز محاسبه شده برای آن تجاوز نماید. در این هنگام واحد کنترل الکترونیک برای کاهش فشار هیدرولیک در سیلندر ترمز چرخ مربوطه با تحریک شیر قرار گرفته در مسیر تغذیه ارتباط آن چرخ را با سیلندر اصلی قطع کرده و با تحریک شیر قرار گرفته در مسیر تخلیه آن را باز و از این طریق فشار را در سیلندر ترمز به اندازه کافی کاهش می‌دهد. در این حالت روغن ابتدا داخل مخزن ذخیره شده و سپس پمپ با دریافت سیگنال ولتاژ ۱۲ ولت نسبت به تخلیه روغن از مخزن و ارسال آن به سیلندر اصلی ترمز اقدام می‌کند. پس از کاهش فشار و به دنبال آن، کاهش لغزش در چرخ مورد نظر، با توجه به شرایط جدید دوباره یکی از فازهای بالا توسط واحد کنترل الکترونیک اتخاذ می‌گردد. این نکته قابل ذکر است که تمام شیرهای برقی با تحریک جریان ۵ آمپر تغییر وضعیت می‌دهند و با قطع جریان به حالت طبیعی خود باز می‌گردند [۷-۹].



شکل (۴): تصویر شماتیک چگونگی عملکرد سنسور سرعت چرخ



شکل (۵): وضعیت شیرهای کنترل جهت و پمپ در فاز افزایش فشار



شکل (۶): وضعیت شیرهای کنترل جهت و پمپ در فاز تثبیت فشار

در سیستم ترمز ضد قفل برای کنترل فشار هیدرولیکی منتقل شده به چرخ‌ها از یک واحد کنترل هیدرولیک^۱ استفاده می‌شود. در داخل واحد کنترل هیدرولیک، تعدادی شیر کنترل برقی تعبیه شده که در صورت تحریک الکتریکی باز و بسته شده و می‌توانند مسیر حرکت سیال را کنترل نمایند. صدور فرامین کنترلی به واحد کنترل هیدرولیک توسط یک واحد کنترل الکترونیک^۲ صورت می‌گیرد. وظیفه این واحد پردازش اطلاعات رسیده از سنسورهای اندازه‌گیری سرعت دورانی چرخ‌ها و تخمین میزان لغزش و کنترل آن به وسیله باز و بسته کردن شیرهای الکتریکی تعبیه شده در واحد کنترل هیدرولیک است. سنسورهای سرعت نیز از نوع تحریک مغناطیسی بوده و شامل یک آهنربای دائمی و یک سیم‌پیچ هستند که دو انتهای سیم‌پیچ به واحد کنترل الکترونیک متصل است. در مقابل هر سنسور یک چرخ دندانه‌دار بر روی محور چرخ نصب شده است که سرعت دورانی آن همان سرعت دورانی چرخ‌ها است. به طور معمول چرخ دندانه‌دار در چرخ‌های جلو بر روی پلوس و در چرخ‌های عقب بر روی تویی نصب می‌گردند. دوران چرخ دندانه‌دار در میدان مغناطیسی ناشی از آهنربای سنسور، موجب تغییر فرم خطوط میدان شده و در نتیجه یک ولتاژ متناوب تولید و به واحد کنترل الکترونیک منتقل می‌گردد. واحد کنترل الکترونیک با استفاده از فرکانس این ولتاژ سرعت دورانی هر چرخ را محاسبه نموده و بر اساس آن سرعت خودرو را تخمین می‌زند. [۵-۶]. عملکرد این سنسور به صورت زیر شکل (۴) است.

۲-۱-۲- نحوه عملکرد سیستم ترمز ضد قفل:

بطور کلی سیستم ترمز ضد قفل دارای سه فاز عملکردی افزایش فشار، تثبیت فشار و کاهش فشار می‌باشد (شکل ۵-۷). در هنگام ترمزگیری برحسب شرایط یکی از این سه فاز توسط واحد کنترل الکترونیک انتخاب شده و توسط واحد کنترل هیدرولیک اجرا می‌شود. امروزه با بکارگیری شیرهای کنترل جهت هیدرولیکی با قابلیت کار در فرکانس‌های بالا، زمان لازم برای به اجرا در آمدن هریک از فازهای فوق به حدود ۷ میلی ثانیه کاهش پیدا کرده است.

۲-۱-۱- فاز افزایش فشار:

تا هنگامی که میزان لغزش ایجاد شده در چرخ‌ها از مقدار مجاز محاسبه شده تجاوز نکرده باشد، واحد کنترل الکترونیک هیچ فرمانی به واحد کنترل هیدرولیک ارسال نکرده و این اجازه را می‌دهد که در صورت تمایل راننده به فشردن بیشتر پدال ترمز، فشار روغن در سیلندر ترمز چرخ‌ها افزایش یابد. در این حالت سیستم ترمز ضد قفل غیرفعال است.

۲-۱-۲- فاز تثبیت فشار:

چنانچه میزان لغزش ایجاد شده در یک چرخ با مقدار مجاز محاسبه شده برای آن برابر گردد، واحد کنترل الکترونیک با تحریک شیر قرار گرفته در مسیر تغذیه آن را در وضعیت بسته نگه داشته و فشار را در

² Electronic Control Unit (ECU)

¹ Hydraulic Control Unit (HCU)

۲-۲- مدل سیستم ترمز خودرو:

هنگامی که خودرو در حال شتاب‌گیری یا توقف باشد، نیروی کشنده F_{tf} و F_{tr} که به وسیله تایر ایجاد می‌شود متناسب با نیروهای F_{zf} و F_{zr} است که به ترتیب عکس‌العمل‌های جاده روی چرخ می‌باشند و مطابق شکل (۸) است. این ضریب تناسب با μ نشان داده می‌شود و ضریب چسبیدگی جاده نامیده می‌شود که تغییرات آن متناسب با سطح جاده است و مطابق شکل (۹) است. لغزش چرخ که با λ نمایش داده می‌شود نسبت تفاضل سرعت خودرو و سرعت منتقل شده به چرخ‌ها بر سرعت خودرو است. هدف سیستم ترمز ضد قفل، نگه‌داشتن محدوده عملکرد هر چرخ در نزدیکی قله نمودار $\mu - \lambda$ برای همان چرخ می‌باشد. یعنی نحوه عملکرد این سیستم به شدت به شرایط سطح جاده بستگی دارد. بنابراین از سیستمی که برای آسفالت خشک یخی داشت. بنابراین اگر ما بتوانیم ضریب لغزش بهینه را برای سطح جاده مورد نظر شناسایی کنیم، می‌توانیم سیستم ترمز ضد قفل را با عملکرد بهتر برای شرایط مختلف و متنوع جاده ای بسازیم. در این پروژه، هدف ما طراحی یک کنترل‌کننده فازی جهت اعمال نیروی ترمزی مناسب به چرخ‌ها برای توقف خودرو در کمترین فاصله است. اولین قدم در پروسه طراحی کنترل‌کننده، به‌دست آوردن ساختار یک مدل واقعی از دینامیک فرآیندی است که می‌بایست کنترل شود. مدل واقعی یک مدل شبیه‌سازی شده است که تمام ویژگی‌های مربوط به فرآیند را شامل باشد. در واقع مدل طراحی می‌بایست تمام خصوصیات ضروری فرآیند را در بر داشته باشد [۱۰-۱۱].

ما مسیر ترمزگیری مستقیم را در نظر می‌گیریم و از اثر شیب و چرخش صرف‌نظر می‌کنیم. دیاگرام سیستم ترمز خودرو برای مسیر مستقیم به‌صورت شکل (۱۰) است. نیروهای کشنده جلو و عقب با F_{tf} و F_{tr} نمایش داده می‌شوند.

$$\begin{aligned} F_{tot} &= F_{tf} + F_{tr} \\ F_{tf} &= \mu(\lambda_f)F_{zf} \\ F_{tr} &= \mu(\lambda_r)F_{zr} \end{aligned} \quad (3)$$

در شکل (۱۱)، F_{zf} و F_{zr} نیروهای نرمال عمل‌کننده روی چرخ‌های جلو و عقب هستند و $\mu(\lambda)$ ضریب اصطکاک جاده است که تابعی از لغزش چرخ (λ) می‌باشد. برای چرخ جلو $\lambda = \lambda_f$ و برای چرخ عقب $\lambda = \lambda_r$ می‌باشد. لغزش هم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

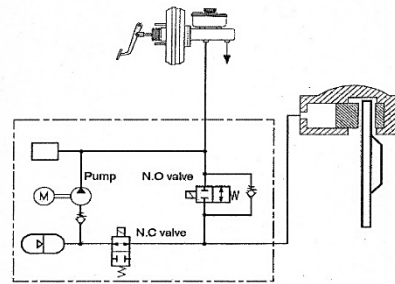
$$\lambda = \frac{V - \omega R_w}{V} = 1 - \frac{\omega R_w}{V} \quad (4)$$

V : سرعت خودرو

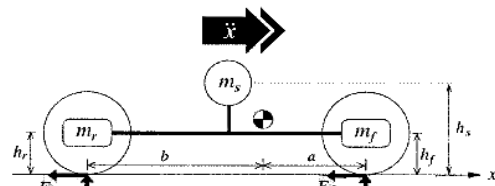
ω : سرعت زاویه‌ای تایر

R_w : شعاع تایر

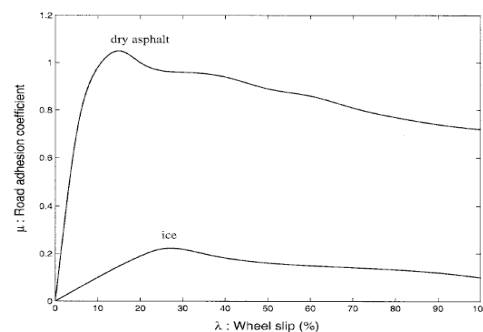
قابل توجه است که $0 < \lambda < 1$ است و مقدار λ را به‌صورت درصد بیان می‌کنند. قفل‌شدن چرخ‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که $\lambda = 100\%$ شود یا $\omega = 0$ باشد. هرچند همانطور که از شکل (۱۱) مشخص است، قفل‌شدگی چرخ‌ها در زمانی نیست که نیروی کشنده تابعی از نیروی نرمال باشد. در واقع دو جزء در نیروی نرمال وجود دارد. یک جزء مربوط به توزیع جرم است که به‌صورت زیر است:



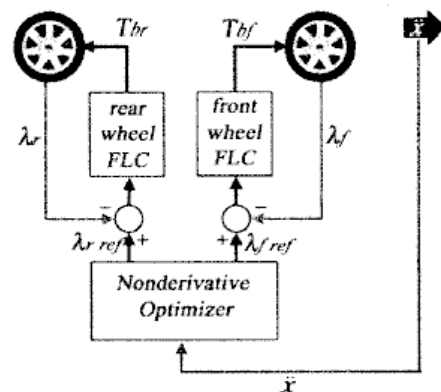
شکل (۷): وضعیت شیرهای کنترل جهت و پمپ در فاز کاهش فشار



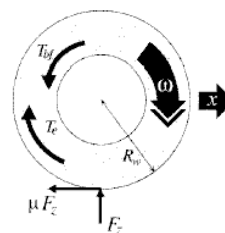
شکل (۸): وضعیت دینامیک چرخ‌های خودرو هنگام حرکت روی سطح جاده



شکل (۹): نمودار ضریب اصطکاک برای سطح جاده خشک و یخ زده



شکل (۱۰): نمودار سیستم ترمز خودرو برای مسیر مستقیم [۲]



شکل (۱۱): نمودار نیروهای عمل‌کننده روی چرخ‌ها [۲]



برای تایر جلو:

$$F_{zf1} = \frac{b}{a+b} m_{tot} g \quad (5)$$

برای تایر عقب:

$$F_{zf2} = \frac{a}{a+b} m_{tot} g \quad (6)$$

بقیه اجزای نیروی نرمال، انتقال وزن جغرافیایی است که با شتاب گیری یا ترمزگیری ایجاد می شود و به راحتی با استفاده از قانون حفظ گشتاور به دست می آید [۱۲-۱۴].

گشتاور نقطه تماس تایر عقب را در نظر بگیرید:

$$(a+b)F_{zf2} = (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \ddot{x} \quad (7)$$

که $\ddot{x}$ شتاب خودرو می باشد. با تقسیم کردن طرفین بر $a+b$ نیروی نرمال روی چرخ جلو که مربوط به انتقال وزن است بدست می آید:

$$F_{zf2} = (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (8)$$

با بکارگیری قانون حفظ گشتاور در مورد نقطه تماس تایر جلو خواهیم داشت:

$$F_{zf1} = -(m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (9)$$

بنابراین، نیروی نرمال کلی روی چرخ جلو برابر است با:

$$F_{zf} = F_{zf1} - F_{zf2} = \frac{b}{a+b} m_{tot} g + (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (10)$$

و نیروی نرمال کلی روی چرخ عقب برابر است با:

$$F_{zr} = F_{zf1} - F_{zf2} = \frac{a}{a+b} m_{tot} g + (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (11)$$

در نتیجه، برای نیروی نرمال روی چرخ جلو داریم:

$$F_{zf} = m_1 g - m_3 \ddot{x} \quad (12)$$

و برای چرخ عقب داریم:

$$F_{zr} = m_2 g - m_3 \ddot{x} \quad (13)$$

و نیروی کشنده کلی به صورت زیر است:

$$F_{tot} = \mu(\lambda_f) F_{zf} + \mu(\lambda_r) F_{zr} = \mu(\lambda_f)(m_1 g - m_3 \ddot{x}) + \mu(\lambda_r)(m_2 g - m_3 \ddot{x}) \quad (14)$$

با بکارگیری قانون دوم نیوتن خواهیم داشت:

$$m_{tot} \ddot{x} = -F_{tot} \quad (15)$$

با ترکیب دو معادله بالا داریم:

$$\ddot{x} = -g \frac{\mu(\lambda_f) m_1 + \mu(\lambda_r) m_3}{m_{tot} - \mu(\lambda_f) m_3 + \mu(\lambda_r) m_3} \quad (16)$$

فرض کنید T_e گشتاور موتور باشد که برای چرخ های جلو بکار گرفته شده است. با فرض اینکه ما با یک خودروی محور جلو سروکار داریم، T_{bf} گشتاور ترمز جلو است و T_{br} گشتاور ترمز عقب است و R_{ω} شعاع تایر می باشد [۱۵]. همچنین ω_f سرعت زاویه ای چرخ جلو و ω_r سرعت زاویه ای چرخ عقب می باشد. پس ما دینامیک های چرخ جلو و عقب را به صورت زیر مدل می کنیم:

$$2J_f \dot{\omega}_f = -T_{bf} + \mu(\lambda_f) F_{zf} R_{\omega} + T_e \quad (17)$$

$$2J_r \dot{\omega}_r = -T_{br} + \mu(\lambda_r) F_{zr} R_{\omega} \quad (18)$$

با بکارگیری معادلات بالا در (۱۰-۱۱) داریم:

$$\dot{\omega}_f = \frac{1}{2J_f} (-T_{bf} + \mu(\lambda_f) m_1 R_{\omega} g - \mu(\lambda_f) m_3 R_{\omega} \ddot{x} + T_e) \quad (19)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2J_r} (-T_{br} + \mu(\lambda_r) m_2 R_{\omega} g + \mu(\lambda_r) m_3 R_{\omega} \ddot{x}) \quad (20)$$

$0.2 < K_{br} < 0.6$ است و گشتاور ترمز عقب وابسته به گشتاور ترمز جلو با رابطه زیر بدست می آید:

$$T_{br} = K_{br} T_{bf} \quad (21)$$

که K_{br} ثابت نسبت جابجایی ترمز است و بیانگر نسبت بین گشتاور ترمزی چرخ عقب و چرخ جلو است. معمولاً K_{br} بین ۰.۲ تا ۰.۶ است. بنابراین گشتاور ترمزی عقب نسبتی از گشتاور ترمزی جلو می باشد. این امر از قفل شدن چرخ های عقب در زمانیکه چرخ های جلو قفل شده است جلوگیری می کند و در نتیجه توانایی مانور خودرو را حفظ می کند. از قراردادن (۲۱) در (۲۰) داریم:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2J_r} (-K_{br} T_{bf} + \mu(\lambda_r) m_2 R_{\omega} g + \mu(\lambda_r) m_3 R_{\omega} \ddot{x}) \quad (22)$$

در نتیجه مدل سیستم خودرو از معادلات (۱۶، ۱۹) بدست می آید. ما متغیرهای حالت را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$\begin{aligned} x_1 &= x \\ x_2 &= \dot{x} \\ x_3 &= \omega_f \\ x_4 &= \omega_r \end{aligned} \quad (23)$$

با بکارگیری متغیرهای حالت بالا، مدل سیستم ترمز خودرو در فضای حالت به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2 = -g \frac{\mu(\lambda_f) m_1 + \mu(\lambda_r) m_3}{m_{tot} - \mu(\lambda_f) m_3 + \mu(\lambda_r) m_3} \\ \dot{x}_3 &= f_3 = \frac{1}{2J_f} (-T_{bf} + \mu(\lambda_f) m_1 R_{\omega} g - \mu(\lambda_f) m_3 R_{\omega} \ddot{x}_2 + T_e) \\ \dot{x}_4 &= f_4 = \frac{1}{2J_r} (-K_{br} T_{bf} + \mu(\lambda_r) m_2 R_{\omega} g + \mu(\lambda_r) m_3 R_{\omega} \ddot{x}_2) \\ y &= [x_1 \ x_2 \ \lambda_f \ \lambda_r]^T = [x_1 \ x_2 \ 1 - \frac{R_{\omega} x_3}{x_2} \ 1 - \frac{R_{\omega} x_4}{x_2}]^T \end{aligned} \quad (24)$$

۳- نتایج تست مدل ترمز شبیه سازی شده

نتایج تست مدل سیستم ترمز خودرو در محیط Simulink نرم افزار MATLAB توسط شکل (۱۲-۱۸) زیر به نمایش درآمده است. پارامترهای در نظر گرفته شده جهت شبیه سازی و مدل سازی سیستم در جدول (۱) آمده است.

۴- طراحی کنترل کننده فازی

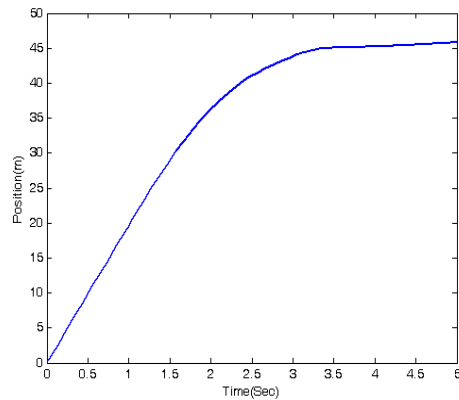
همان طور که می دانیم هر کنترل فازی از ۴ بخش تشکیل شده است

- فازی ساز^۱: تبدیل ورودی های سیستم به مقادیر فازی.

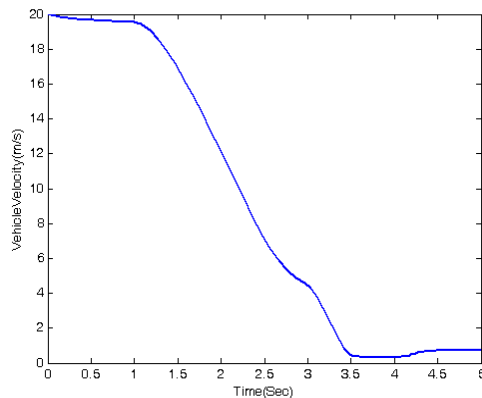
^۱ Fuzzifier

جدول (۱): مشخصات پارامترهای خودرو جهت مدلسازی [۱]

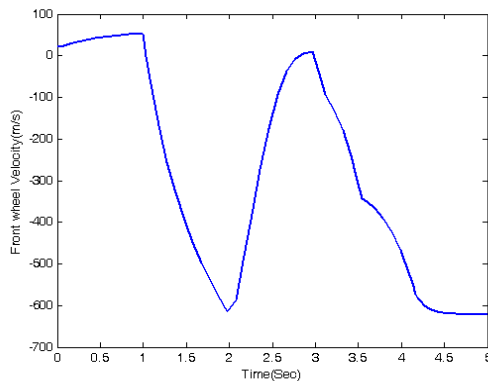
g	شتاب ثقل	9.81 m/s^2
a	فاصله از مرکز ثقل تا اکسل جلو	1.186 m
b	فاصله از مرکز ثقل تا اکسل عقب	1.285 m
h_s	ارتفاع جرم ارتجاعي	0.6 m
h_f	ارتفاع جرم غيرارتجاعي جلو	0.3 m
h_r	ارتفاع جرم غيرارتجاعي عقب	0.3 m
m_{tot}	جرم کل خودرو	1500 kg
m_s	جرم ارتجاعي خودرو	1285 kg
m_f	جرم غيرارتجاعي جلو	96 kg
m_r	جرم غيرارتجاعي عقب	119 kg
J_f	گشتاور سکون چرخ جلو	1.7 kgm^2
J_r	گشتاور سکون چرخ عقب	1.7 kgm^2
R_ω	شعاع تاپر	0.326 m
T_e	گشتاور موتور	0 Nm
K_{br}	ثابت تناسبی تغيير مکان ترمز	0.5



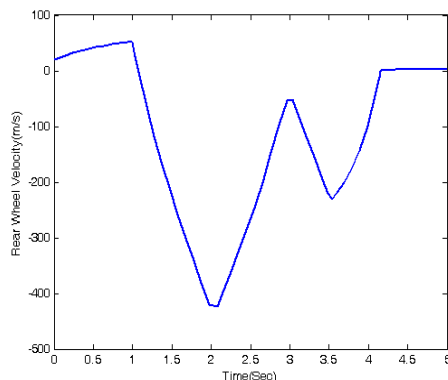
شکل (۱۵): نمایش تغییرات موقعیت خودرو



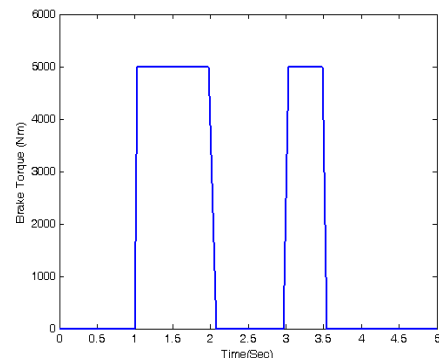
شکل (۱۶): نمایش تغییرات سرعت خودرو



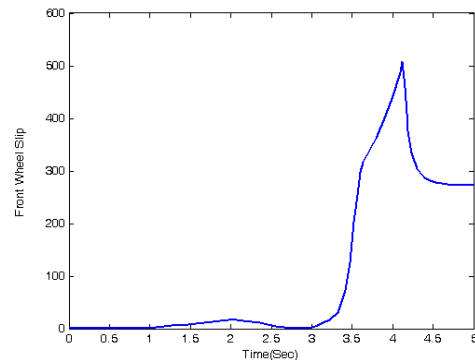
شکل (۱۷): نمایش سرعت چرخهای جلو



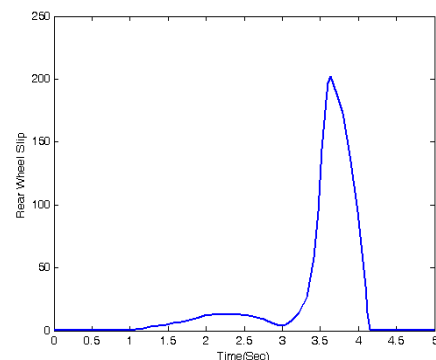
شکل (۱۸): نمایش سرعت چرخهای عقب



شکل (۱۲): گشتاور ترمزی اعمال شده به سیستم ترمز ضد قفل

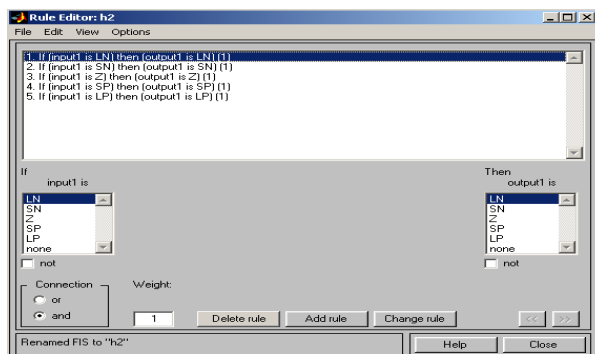


شکل (۱۳): گشتاور ترمزی اعمال شده به سیستم ترمز ضد قفل

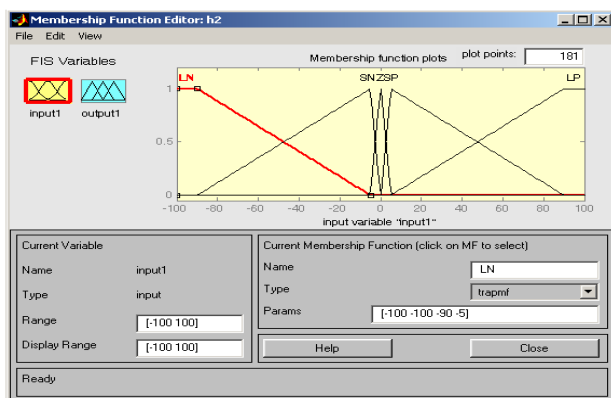


شکل (۱۴): نمایش لغزش چرخهای عقب

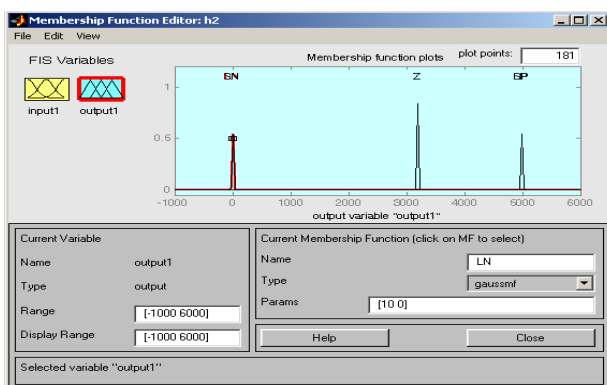




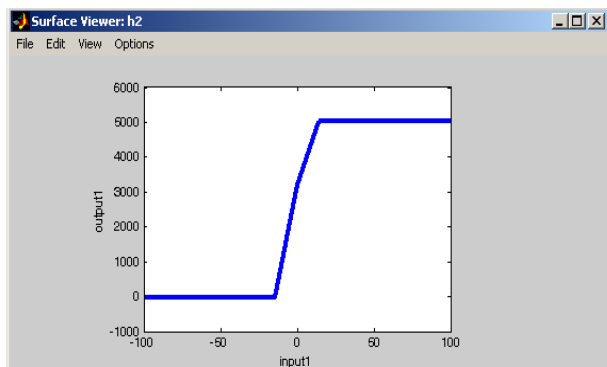
شکل (۲۰): قواعد^۳ فازی تعریف شده برای چرخ های جلو



شکل (۲۱): توابع عضویت فازی ساز برای چرخ های جلو



شکل (۲۲): توابع عضویت غیرفازی ساز برای چرخ های جلو



شکل (۲۳): نمایش پاسخ کنترلر فازی برای چرخهای جلو

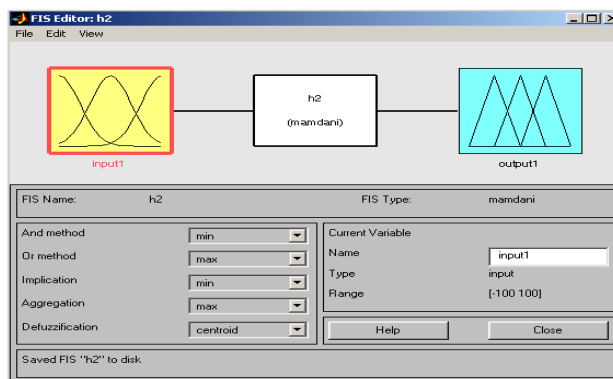
- موتور استنتاج فازی: پردازش ورودی‌ها و تعیین خروجی مناسب.
- پایگاه داده‌ها: شامل قوانین و توابع عضویت فازی.
- غیرفازی‌ساز^۱: تبدیل خروجی فازی به مقدار واقعی.

در این مقاله دو کنترل کننده فازی در نظر گرفته شده که یکی چرخ‌های جلوی خودرو و دیگری چرخ‌های عقب را کنترل می‌کند. هدف از این طراحی، قراردادن لغزش چرخ‌های جلو و عقب در محدوده مجاز و پایدار با ردیابی لغزش مرجعی است که ما به سیستم اعمال می‌کنیم. این عمل جهت جلوگیری از قفل شدن چرخ‌ها صورت می‌گیرد؛ بنابراین ورودی کنترل کننده فازی خطای ردیابی^۲ لغزش مرجع و خروجی آن گشتاوری است که باید متناسب با خطا به سیستم ترمزی اعمال شود [۱۹-۱۶]. در ابتدا فازی‌سازها را برای هر دو کنترل کننده به صورت مثلثی و با ۵ تابع عضویت منفی بزرگ (LN)، منفی کوچک (SN)، صفر (Z)، مثبت کوچک (SP) و مثبت بزرگ (LP) تعریف می‌کنیم. جدول (۲) نشان‌دهنده مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی است برای کنترل کننده چرخ‌های جلو به صورت است. نمایش روش استنتاج فازی به کارگیری شده، قواعد فازی تعریف شده و توابع عضویت فازی ساز و غیرفازی ساز که برای چرخ‌های جلو در جعبه ابزار فازی متلب تعریف شده در شکل (۱۹-۲۲) آمده است. همچنین پاسخ کنترلر فازی طراحی شده برای چرخ‌های جلو که بر حسب خطای ورودی و گشتاور خروجی است در شکل (۲۳) نمایش داده شده است.

جدول (۲): مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی

برای چرخهای جلو

Input (e)	LN	SN	Z	SP	LP
Output (T_{bf})	0	به کارگیری	3206	5000	5000



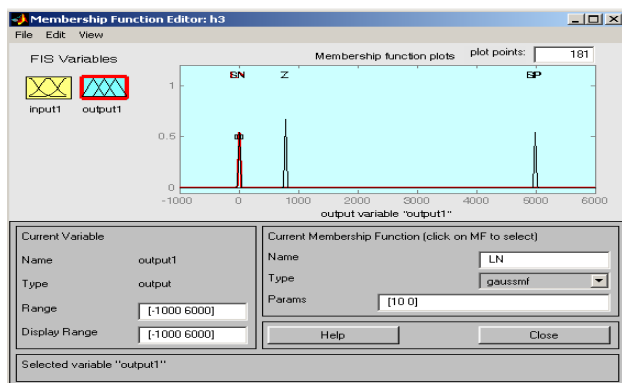
شکل (۱۹): روش استنتاج فازی انتخاب شده برای چرخ های جلو

³ Rule

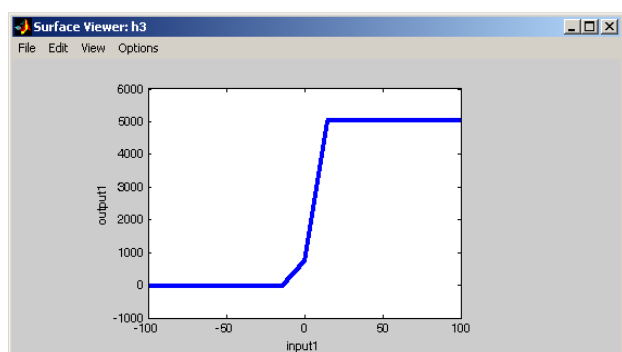
¹ Defuzzifier

² Tracking error





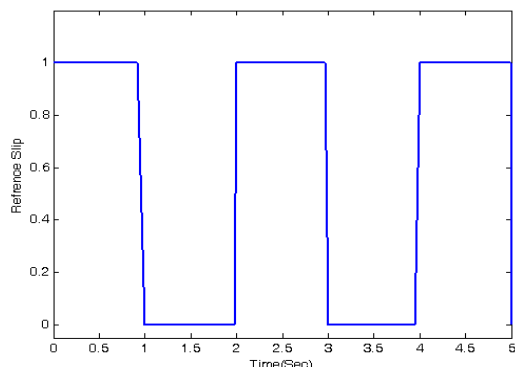
شکل (۲۷): توابع عضویت غیرفازی ساز برای چرخ های عقب



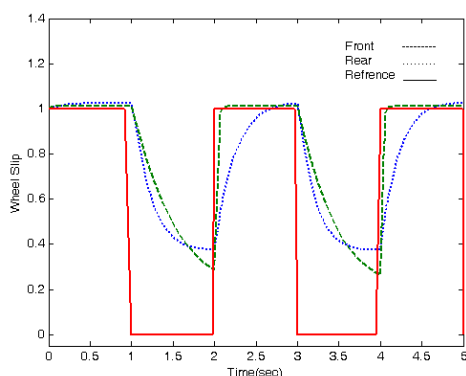
شکل (۲۸): نمایش پاسخ کنترلر فازی برای چرخهای عقب

۵- نتایج تست کنترل کننده فازی طراحی شده

نتایج طراحی کنترلر فازی جهت مدل شبیه سازی شده سیستم ترمز ضد قفل که به کمک جعبه ابزار Fuzzy نرم افزار Matlab انجام شده است در زیر نمایش داده شده است:



شکل (۲۹): نمایش لغزش مرجع اعمال شده به سیستم ترمز ضد قفل

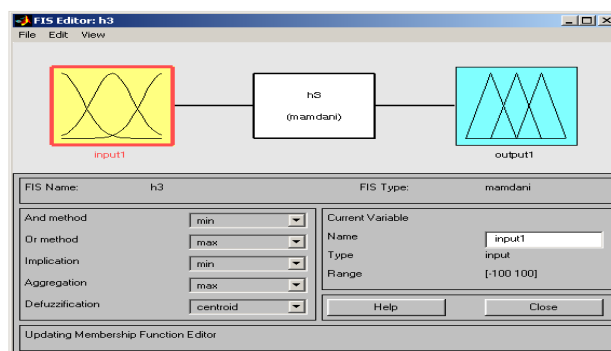


شکل (۳۰): نمایش لغزش چرخ های جلو، عقب و مرجع

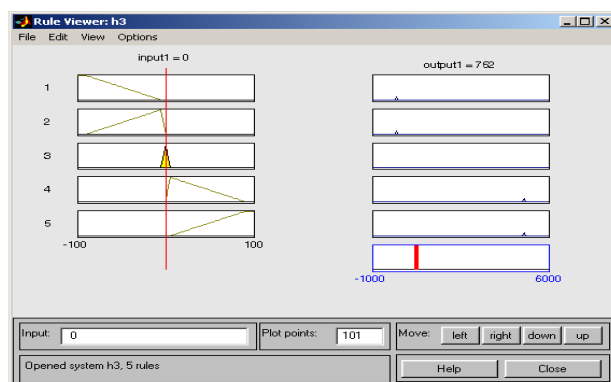
جدول (۳) نشان دهنده مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی است برای کنترل کننده چرخ های عقب است. همچنین نمایش روش استنتاج فازی به کارگیری شده، قواعد فازی تعریف شده و توابع عضویت فازی ساز و غیرفازی ساز که برای چرخ های عقب در جعبه ابزار فازی نرم افزار متلب تعریف شده است در شکل (۲۴-۲۷) و پاسخ کنترل کننده فازی طراحی شده برای چرخ های عقب که بر حسب خطای ورودی و گشتاور خروجی در شکل (۲۸) نشان داده شده است.

جدول (۳): مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی برای چرخ های عقب

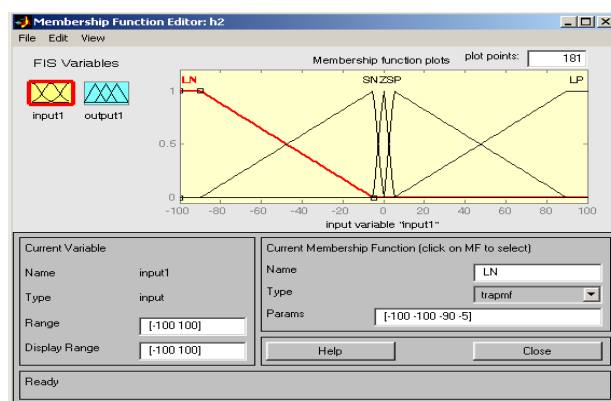
Input (e)	LN	SN	Z	SP	LP
Output (T_{br})	0	0	780	5000	5000



شکل (۲۴): روش استنتاج فازی انتخاب شده برای چرخ های عقب



شکل (۲۵): قواعد فازی تعریف شده برای چرخ های عقب



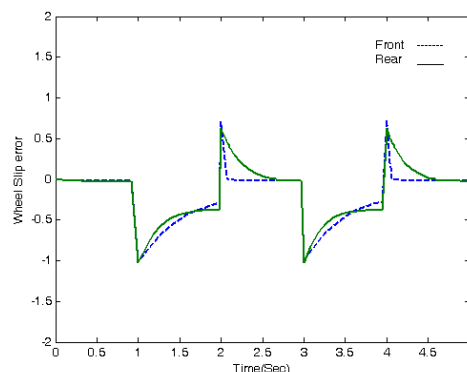
شکل (۲۶): توابع عضویت فازی ساز برای چرخ های عقب



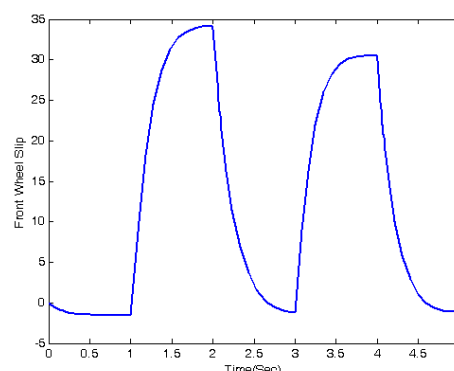
کنترل کننده برای سیستم ترمز ضد قفل طراحی شود که نتایج شبیه سازی ها نشان داد سیستم کنترل فازی به خوبی هدف را که همان کاهش سرعت چرخ ها و ردیابی کردن لغزش مرجع توسط چرخ های جلو و عقب است را محقق می نماید. البته لازم به ذکر است به دلیل دقیق نبودن مدل سیستم ترمز و غیرواقعی بودن مقادیر اجزای دینامیکی خودرو برخی از مقادیر نمایش های بالا تقریبی است و فقط بایستی در حد شبیه سازی به آنها اکتفا کرد.

مراجع

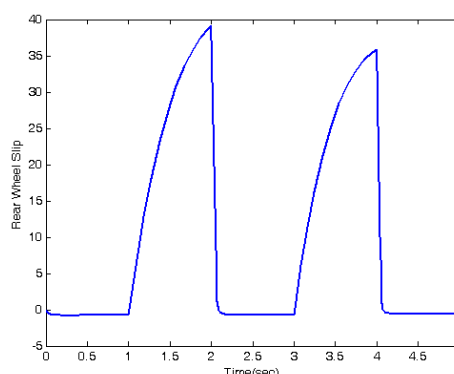
- [۱] مرکز تحقیقات ایران خودرو. (۱۳۹۰). معرفی سیستم ترمز ضدقفل خودروی سمند (واحد دینامیک خودرو، گروه ترمز).
- [۲] ایساکو. (۱۳۹۵). ترمز ضدقفل ABS. شرکت تهیه و توزیع قطعات و لوازم یدکی ایران خودرو.
- [۳] وانگ، لی (۱۳۷۸). سیستم های فازی و کنترل فازی (ترجمه دکتر محمد تشنه لب). دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [4] Sachenbacher, M., & Struss, P. (1997). Fault isolation in the hydraulic circuit of an ABS. *International Journal of Automation Technology*, 105-111.
- [5] Yu, F., Feng, J. Z., & Li, J. (2002). A fuzzy logic controller design for vehicle ABS with an online optimized target slip ratio. *International Journal of Automation Technology*, 165-170.
- [6] Lee, Y., & Zak, S. H. (2002). Designing a genetic neural fuzzy antilock brake system controller. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2).
- [7] Will, A. B., & Zak, S. H. (2000). Antilock brake system modeling and fuzzy control. *International Journal of Vehicle Design*, 24(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2000.001870>.
- [8] Yu, D. (2005). Antilock brake control system of electric vehicles. *Control Theory & Applications*. Available at: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTALKZLY200501027.htm.
- [9] Yu, Y. (2004). Study on fuzzy PID control algorithm for antilock brake system. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. Available at: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTALGLJK200407032.htm.
- [10] Sanchez-Torres, J. D., Loukianov, A. G., Galicia, M. I., & Rivera, J. (2011). A sliding mode regulator for antilock brake system. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 7187-7192. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03644>.
- [11] Lin, W.-C., Dobner, D. J., & Fruechte, R. D. (2014). Design and analysis of an antilock brake control system with electric brake actuator. *International Journal of Vehicle Design*. Available at: <https://trid.trb.org/view/383088>.
- [12] Liqun, Z., & Qingsong, L. (2018). Development prospects of ABS braking under the trend of high-end motorcycle manufacturing. *Motorcycle Technology*, 316(6), 40-46.
- [13] Tao, L. (2020). Design and research of automotive electronic mechanical braking system. *Internal Combustion Engine and Accessories*, 323(23), 32-33.
- [14] Jiantao, S., Lang, L., & Yang, C. (2020). The effect of automobile anti-lock braking system on braking distance. *Auto Parts*, 150(12), 73-75.
- [15] Shengli, Z. (2019). Design and analysis of automobile electromechanical brake actuator. *Mechanical Research and Application*, 32(5), 66-69.
- [16] Zhang, L., Wang, Y., & Chen, M. (2022). Robust wheel slip control in anti-lock braking systems using model predictive control. *Control Engineering Practice*, 235, Article 104897. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104897>.



شکل (۳۱): نمایش خطای ردیابی لغزش مرجع توسط چرخ های خودرو



شکل (۳۲): نمایش سرعت چرخ های جلو



شکل (۳۳): نمایش سرعت چرخ های عقب

۶- نتیجه

در سیستم ترمز خودرو، سنسورها اطلاعات دقیق سرعت چرخ و اطلاعات فشار را برای سیستم کنترل ترمز ارائه می دهند تا کنترل دقیق فشار ترمز را محقق کنند؛ بنابراین دقت اطلاعات خروجی سنسور مستقیماً بر صحت و اثربخشی دستورالعمل های کنترلی سیستم کنترل تأثیر می گذارد. هنگامی که یک خودرو به سرعت ترمز می کند، به راحتی چرخ ها قفل می شوند. در این زمان سیستم ترمز ضد قفل وارد حالت کار می شود و فشار ترمز هر چرخ به موقع و با دقت تنظیم می شود تا چرخ ها قفل نشوند. در هنگام ترمزگیری، این سیستم باید بتواند خود را با شرایط مختلف جاده ای وفق دهد، به طور مؤثر در برابر عوامل تداخل جاده ای مقاومت کند و در مدت زمان بسیار کوتاهی به سرعت پاسخ دهد. در این مقاله سعی شد تا با استفاده از سیستم کنترل فازی، یک

Mechatronics, 211, Article 2955432.
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2955432>.
[19] Wu, D., Liu, Y., & Huang, T. (2024). Adaptive neural network control for anti-lock braking systems with uncertain road conditions. *Neural Computing and Applications*.
<https://doi.org/10.1007/s00521-023-07654-2>.

[17] Lee, H., Park, J., & Kim, K. (2023). Fuzzy logic-based control strategy for anti-lock braking systems in autonomous vehicles. *IEEE Access*, 326, Article 3056789.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3056789>.
[18] Ahmadi, M., Khajepour, A., Chen, S., & Litkouhi, B. (2020). Nonlinear control and estimation of longitudinal tire slip for anti-lock braking systems. *IEEE/ASME Transactions on*



A new Approach to Epilepsy Diagnosis based on the Social Spider Algorithm and the Support Vector Machine

Bahram Dehghan^{1*}

¹ Department of Electrical Engineering, Sarvestan Branch, Islamic Azad University, Sarvestan, Iran
Bahramdehghan1@gmail.com

Abstract: Epilepsy can be defined as recurrent seizures caused by sudden electrical discharges in a group of human brain cells. Electroencephalogram (EEG) signals play a very important role in the diagnosis of this disease. EEG signal recordings, which are recorded by portable recording devices, produce very long data, and the detection of the epileptic zone requires a long time for the analysis of all the data by a specialist. Traditional analysis methods are tedious, so in recent years, a large number of automatic systems for epilepsy diagnosis have emerged. In this paper, a new approach based on the social spider optimization algorithm (SSO) is presented. First, the EEG signal is decomposed based on the discrete wavelet transform. Then, 132 statistical features, entropy and chaos features are extracted, and then the best features are selected by the SSO with the proposed objective function. Finally, the selected features are used to classify seizure and non-seizure EEG signals by support vector machine algorithm. Simulation results show that the proposed method has good accuracy and sensitivity on Bonn university dataset, and this method can effectively help doctors in diagnosing epilepsy, thus reducing their workload.

Keywords: Epileptic Seizure Detection, Features Selection, Electroencephalogram Signals, Social Spider Optimization algorithm.

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025
 Received: 2025-01-16

Online ISSN: 2981-1295
 Accepted: 2025-05-23

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>
 Published: 2025-06-21

CITATION

Dehghan, B., "A new Approach to Epilepsy Diagnosis based on the Social Spider Algorithm and the Support Vector Machine", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 13-22, 2025.
 DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Epilepsy is a chronic neurological disorder characterized by sudden, uncontrolled seizures and unpredictable patient behaviors. Accurate and timely diagnosis of epilepsy is essential for initiating antiepileptic drug therapy and reducing disease risk. Currently, epilepsy diagnosis relies on neurological examinations and auxiliary tests such as brain imaging and EEG, with EEG maintaining its position as the most widely used diagnostic approach. However, visual analysis of electroencephalogram (EEG) for epilepsy detection remains highly costly, time-consuming, and prone to errors. Therefore, it is crucial to develop an automated computer-aided diagnostic system to detect epileptic states from EEG signals automatically. Such a system would significantly assist specialists in achieving accurate and efficient diagnosis. Although extensive research has been conducted on epilepsy detection, challenges remain regarding the number of extracted features, which significantly impacts diagnostic accuracy. In this paper, EEG signals are first decomposed using the discrete wavelet transform (DWT) algorithm. Subsequently, 132 features including statistical, entropy, and chaos based features are extracted from the EEG signals to ensure comprehensive signal representation. To prevent overfitting and extract meaningful information, the social spider optimization (SSO) metaheuristic algorithm and a proposed objective function are employed for optimal feature selection. Finally, a support vector machine (SVM) classifier is implemented for EEG signal classification and epilepsy detection.

2- Methodology

This section outlines the theoretical framework of our proposed method for epilepsy detection. The diagnostic process, as illustrated in the accompanying flowchart, follows a structured sequence beginning with data preprocessing and segmentation, followed by discrete wavelet transform analysis. The methodology proceeds with comprehensive feature extraction encompassing statistical parameters, entropy measures, and chaos-based characteristics. Subsequent stages involve optimal feature selection through the social spider optimization metaheuristic algorithm, culminating in classification using a support vector machine architecture. The following discussion provides detailed technical specifications for each component of this systematic detection framework.

This paper uses the EEG database from the University of Bonn, Germany. The database consists of five groups (Z, O, N, F, S), each containing 100 EEG signal samples with a duration of 23.6 seconds and a sampling rate of 173.61 Hz. These signals belong to subjects aged between 6 and 43 years, and artifacts such as muscle movements and eye movements have been removed from these signals. Groups Z and O contain samples from healthy (non-

epileptic) individuals with eyes open and eyes closed, respectively. Groups N and F include samples from patients during interictal periods (between epileptic seizures). Group S consists of samples from patients during actual epileptic seizures. The database provides a standardized dataset with clean EEG signals that clearly differentiate between healthy states and various epileptic conditions, making it suitable for epilepsy detection research. The consistent sampling rate and recording duration across all samples allow for reliable comparative analysis of different epileptic states and normal brain activity.

3- Results and discussion

This section begins by examining the evaluation criteria for epilepsy detection methods before introducing the dataset employed in this study. The discussion then proceeds to present the experimental outcomes of our proposed detection approach, including comparative analyses with existing conventional methods. All computational experiments were implemented and executed using MATLAB software on a standard personal computer configuration.

The first experiment investigates the impact of varying EEG signal window sizes (4096, 2048, 1024, and 512 samples) on seizure detection performance. Results demonstrate that classification accuracy, sensitivity, and specificity all improve with increasing window length. Notably, the proposed model maintains acceptable performance even with shorter window sizes (512 samples), indicating its robustness across different signal durations.

The second experiment compares the proposed method with recent state-of-the-art approaches. Tabulated results show superior performance of our method in key classification metrics, confirming its effectiveness for epileptic seizure detection.

4- Conclusion

This paper presents a novel automated epilepsy detection system. The proposed methodology involves several key stages: First, noise removal and segmentation are performed on the raw EEG signals. The signals then undergo decomposition using discrete wavelet transform (DWT). Subsequently, 165 distinct features are extracted from both the raw and decomposed EEG signals. Since feature selection critically impacts epilepsy detection accuracy, the system employs an innovative approach combining the social spider optimization (SSO) metaheuristic algorithm with a custom objective function to identify the most discriminative features. Finally, a support vector machine (SVM) classifier distinguishes between ictal (seizure) and interictal (non-seizure) EEG patterns.

The developed system offers clinicians an efficient tool for rapid epilepsy diagnosis. Notably, the proposed framework shows potential for adaptation to other neurological disorders, including Alzheimer's disease detection, demonstrating its broader clinical applicability.





رویکرد جدید در تشخیص بیماری صرع مبتنی بر الگوریتم عنکبوت

اجتماعی و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

بهرام دهقان^{۱*}

۱- گروه مهندسی برق، واحد سروسن، دانشگاه آزاد اسلامی، سروسن، ایران (Bahramdehghan1@gmail.com)

چکیده: بیماری صرع را می توان به عنوان تشنج های عودکننده ناشی از تخلیه الکتریسته ناگهانی بر روی یک گروه از سلول های مغزی انسان تعریف کرد. سیگنال های الکتروانسفالوگرام (EEG) نقش بسیار مهمی در تشخیص این بیماری ایفا می کند. ثبت سیگنال های EEG که توسط دستگاه های ثبت سیار ضبط می شوند، اطلاعاتی با طول بسیار بالا تولید می کنند که تشخیص ناحیه صرعی، نیازمند مدت زمان طولانی برای تحلیل کل اطلاعات توسط شخص متخصص می باشد. به دلیل خسته کننده بودن روش های سنتی تحلیل، در سال های اخیر تعداد بسیار زیادی سیستم اتوماتیک برای تشخیص صرع به وجود آمده است. در این مقاله، رویکرد جدیدی مبتنی بر الگوریتم عنکبوت اجتماعی ارائه شده است. در ابتدا سیگنال EEG براساس تبدیل موجک گسسته تجزیه می شود. سپس، ۱۳۲ ویژگی آماری، آنتروپی و ویژگی های آشوب استخراج می شوند و بهترین ویژگی ها توسط الگوریتم عنکبوت اجتماعی با تابع هدف پیشنهادی انتخاب می شوند. در نهایت، ویژگی های انتخابی با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان جهت طبقه بندی سیگنال های EEG تشنج و غیرتشنج استفاده می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده های سیگنال EEG دانشگاه بُن به صحت و حساسیت خوبی برخوردار است و این روش می تواند به طور مؤثر به پزشکان در تشخیص صرع کمک کند، بنابراین بارکاری آنها کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: تشخیص بیماری صرع، انتخاب ویژگی ها، سیگنال های الکتروانسفالوگرام، الگوریتم بهینه سازی عنکبوت اجتماعی

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷

صرعی را از سیگنال EEG تشخیص دهد [۷]. این سیستم، به متخصصان جهت تشخیص دقیق و مؤثر بسیار کمک کننده می باشد. تشخیص بیماری صرع به طور کلی با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین از سه مرحله، پیش پردازش، شناسایی ویژگی و طبقه بندی تشکیل شده است که مرحله شناسایی ویژگی ها یکی از مهم ترین مراحل می باشد [۸، ۹]. مرحله شناسایی ویژگی ها را می توان به سه مرحله استخراج ویژگی ها، انتخاب ویژگی ها و تبدیل ویژگی ها تقسیم کرد که مراحل استخراج و انتخاب ویژگی ها در دقت تشخیص بیماری صرع بسیار حائز اهمیت می باشد [۱۰]. این امر سبب شده هر روزه توجه محققانی بیشتری را به خود جلب کند که در ادامه که به مرور مواردی از آنها پرداخته می شود.

در [۱۱] از آنتروپی طیفی، آنتروپی نمونه و آنتروپی فاز به عنوان ویژگی ها از سیگنال EEG برای تشخیص بیماری صرع استفاده شده است. در [۱۲] جهت استخراج ویژگی ها، از ویژگی های آماری استفاده شده است. در [۱۳] از ویژگی های توان شامل طیف توان نسبی، نسبت طیف توان و ضرایب همبستگی متقابل جهت تشخیص بیماری صرع

۱- مقدمه

صرع به عنوان یکی از مهمترین اختلالات عصبی در جهان محسوب می شود که می تواند در همه گروه های سنی تأثیر بگذارد [۱، ۲]. در حال حاضر حدود ۶۵ میلیون نفر در سراسر جهان از بیماری صرع رنج می برند [۳]. صرع یک اختلال عصبی پایدار است که در آن تشنج با اختلالات ناخواسته ناگهانی و رفتارهای غیرقابل پیش بینی بیماران مشخص می شود. تشخیص صحیح و به موقع صرع برای شروع استفاده از داروهای کنترل کننده صرع و کاهش ریسک ابتلا به این بیماری، امری ضروری است. در حال حاضر، تشخیص صرع با آزمایش های نورولوژی و آزمایش های کمکی مثل تصاویر مغزی و اسکن بصری الکتروانسفالوگرام (EEG)^۲ حاصل می شود که EEG جایگاه خود را به عنوان پرکاربردترین رویکرد تشخیصی حفظ کرده است [۴، ۵]. با این وجود، اسکن EEG برای تشخیص صرع هنوز هم بسیار پرهزینه، زمان بر و کاری نادرست است [۶]. بنابراین ضروری است سیستم خودکار تشخیص کامپیوتری طراحی شود تا به طور خودکار، حالت های

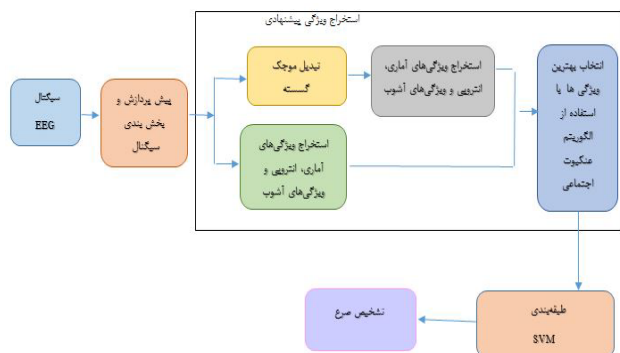
^{*} نویسنده مسئول² Electroencephalogram

زمینه‌های مختلف پردازش تصویر و پردازش سیگنال کاربرد دارد [۲۶-۲۸]. این الگوریتم برخلاف سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر همچون الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، الگوریتم جستجوی هارمونی، الگوریتم بهینه‌سازی شبکه اجتماعی و الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، از همگرایی زودرس به راه حل‌های بهینه محلی یا تعادل محدود بین اکتشاف و بهره‌برداری جلوگیری می‌کند [۲۷]. این مزایا انگیزه استفاده از الگوریتم عنکبوت اجتماعی برای انتخاب بهترین ویژگی‌ها را فراهم می‌کند.

در این مقاله، ابتدا سیگنال EEG توسط الگوریتم تبدیل موجک گسسته تجزیه و تحلیل می‌شود. سپس، ۱۳۲ ویژگی از جمله ویژگی‌های آماری، آنتروپی و ویژگی‌های آشوب، از سیگنال EEG استخراج می‌شود که بتواند اطلاعات کافی از این سیگنال حاصل شود. پس از آن، برای جلوگیری از سرریز و استخراج اطلاعات مفید توسط الگوریتم فرا ابتکاری عنکبوت اجتماعی و تابع هدف پیشنهادی جهت انتخاب بهترین ویژگی‌ها استفاده می‌شود. در نهایت، از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان جهت طبقه‌بندی سیگنال EEG و تشخیص صرع به کار گرفته می‌شود. سازمان‌دهی بقیه مقاله به این صورت است که در بخش دوم به شرح روش پیشنهادی جهت تشخیص بیماری صرع، در بخش‌های سوم و چهارم به ترتیب به نتایج و آزمایش‌ها و نتیجه‌گیری و پیشنهادها پرداخته می‌شود.

۲- روش پیشنهادی

در این بخش، به تئوری روش پیشنهادی تشخیص بیماری صرع پرداخته می‌شود. فرآیند تشخیص بیماری صرع پیشنهادی مطابق شکل (۱) شامل پنج مرحله اصلی، پیش‌پردازش و بخش‌بندی دیتا، تبدیل موجک گسسته، استخراج ویژگی‌های آماری، آنتروپی و ویژگی‌های آشوب، انتخاب بهترین ویژگی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری عنکبوت اجتماعی و در نهایت، طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان می‌باشد. در ادامه، به شرح جزئیات هر یک از مراحل پیشنهادی جهت تشخیص بیماری صرع پرداخته می‌شود.



شکل (۱). فلوچارت روش پیشنهادی

استفاده شده است. در [۱۴] از شبکه‌های یادگیری عمیق روی داده‌های EEG جهت استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۱۵] از تبدیل موجک و تحلیل غیرخطی RQA جهت استخراج ویژگی‌ها در تشخیص بیماری صرع استفاده شده است. در [۱۶] از تبدیل موجک و محاسبه انرژی ضرایب موجک به عنوان ویژگی‌ها جهت تشخیص بیماری صرع استفاده شده است. در [۱۷] از تبدیل موجک و الگوریتم K-means جهت استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۱۸] از روش‌های تخمین طیفی EV و MUSIC جهت استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۱۹] از روش تعمیم یافته تبدیل موجک و آنتروپی تقریبی جهت استخراج ویژگی‌ها و از الگوریتم ژنتیک جهت انتخاب ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۲۰] از الگوریتم جستجوی گرانشی باینری جهت انتخاب ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۲۱] از آنالیز خودرگرسیون^۱ جهت استخراج ویژگی‌ها از سیگنال EEG استفاده شده است. در [۲۲] از ترکیب روش‌های زمانی و فرکانسی جهت استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۲۳]، از الگوریتم گرگ خاکستری جهت انتخاب بهترین ویژگی‌ها و انتخاب مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. در [۲۴]، از ترکیب ویژگی‌های مبتنی بر زمان، مبتنی بر فرکانس و مبتنی بر فرکانس-زمان جهت استخراج اطلاعات کافی از سیگنال EEG استفاده شده است و سپس از شبکه سیامی جهت کاهش ابعاد ویژگی‌ها ارائه شده است. در [۲۵]، از الگوریتم فرا ابتکاری همچون الگوریتم جستجوی همزیستی ارگانیسم^۲، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ^۳، الگوریتم باوری زمین‌های کشاورزی^۴ جهت انتخاب بهترین ویژگی‌ها استفاده شده که انتخاب بهترین ویژگی‌ها با الگوریتم باروری زمین‌های کشاورزی از دقت بهتری برخوردار است.

اگرچه تحقیقات فراوانی جهت تشخیص بیماری صرع انجام شده است اما هنوز چالش‌های در تعداد ویژگی‌های استخراج شده می‌باشد که در دقت تشخیص بیماری صرع بسیار موثر می‌باشد. تعیین تعداد ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال EEG بسیار حائز اهمیت است، زیرا اگر از تعداد ویژگی‌های کمتری استفاده شود ممکن است اطلاعات کافی از سیگنال EEG جهت تشخیص بیماری صرع حاصل نشود و از طرف دیگر، اگر از تعداد ویژگی‌های زیادی استفاده شود منجر به سرریز^۵ می‌شود که سبب پیچیدگی محاسباتی در مراحل بعدی می‌شود. بنابراین، تعداد ویژگی‌ها باید به حد کافی باشد که از یک طرف، بتواند اطلاعات موثر از سیگنال EEG استخراج شود و از طرف دیگر منجر به سرریز نشود. این مستلزم پیشنهاد یک روش مناسب جهت استخراج و انتخاب ویژگی‌های مناسب از سیگنال EEG می‌باشد. الگوریتم‌های فرا ابتکاری مختلفی جهت انتخاب بهترین ویژگی‌ها می‌توان استفاده کرد اما انتخاب الگوریتم فرا ابتکاری مناسب در اسین زمینه بسیار حائز اهمیت است. الگوریتم عنکبوت اجتماعی یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد که به طور گسترده در

⁴ Farmland fertility algorithm (FFA)

⁵ Ccruse of Dimensional

¹ Autoregressive

² Symbiotic-Organism Search Algorithm (SOSA)

³ Grasshopper Optimisation Algorithm (GOA)



۱-۲- پیش پردازش و بخش بندی سیگنال

سیگنال الکتروآنسفالوگرافی شامل نویزهای از جمله، نویز برق شهر و نویز حاصل از چشمک زدن، حرکات چشمی و همچنین آرتیفکت های ماهیچه ای است که جهت استفاده از این سیگنال ها لازم است از روش فیلترینگ FIR استفاده کرد. فیلترینگ موردنظر در اینجا از دو فیلتر FIR تشکیل شده است. یک فیلتر میان نگذر با باند فرکانسی ۴۰-۵۰ هرتز که مربوط به فرکانس برق شهر، را رد می کند. دیگری یک فیلتر میان گذر که بازه فرکانسی ۵/۳۰- هرتز را عبور می دهد. بعد از حذف نویز، سیگنال EEG به بخش هایی با طول ثابت، تقسیم می شود. در این راستا، طول سیگنالی که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد: ۵۱۲ نمونه، ۱۰۲۴ نمونه، ۲۰۴۸ نمونه و کل طول (۴۰۹۷ نمونه) سیگنال EEG است.

۲-۲- تبدیل موجک گسسته

در این بخش، از روش تبدیل موجک گسسته برای تجزیه و تحلیل سیگنال EEG به باندهای فرکانسی مختلف استفاده شده است. توابع موجک گسسته توسط جفت فیلترهای بالاگذر و پایین گذر تعریف می شوند. این فیلترها اجزای فرکانس بالا و پایین سیگنال ورودی را جدا می کنند. در مرحله اول، خروجی فیلتر بالاگذر ضرایب جزئیات (D1) و خروجی فیلتر پایین گذر ضرایب تقریبی (A1) می باشد. ضرایب (A1) دوباره تجزیه شده و تا چهار مرحله ادامه می یابد.

۳-۲- استخراج ویژگی

روش های استخراج ویژگی به طور کلی به سه دسته، استخراج ویژگی های آماری، آنتروپی و ویژگی های آشوب، تقسیم می شوند که اخیرا تحقیقات نشان دهنده اینست که ترکیب هر سه روش جهت بهبود دقت تشخیص خودکار صرع بسیار موثرتر است [۲۹-۳۱]. در جدول (۱) لیستی از ترکیب هر سه روش ویژگی های استفاده شده در این مقاله معرفی شد. در نهایت، ((۲۲×(۱+۵)) ویژگی از هر دو سیگنال EEG خام و زیرباندهای تجزیه شده استخراج می شود. برخی از این ویژگی ها ممکن است زائد باشند که برای طبقه بندی مناسب نیستند. حذف ویژگی های زائد، امری بسیار ضروری است که در این مقاله، از الگوریتم فرا ابتکاری عنکبوت اجتماعی و تابع هدف پیشنهادی استفاده می شود.

جدول ۱: لیستی از ویژگی های استخراج شده

شماره	نوع ویژگی	روابط ویژگی ها
۱	میانگین	$\mu_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$
۲	انحراف استاندارد	$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N a_i - \mu_a ^2}$
۳	واریانس	$V_a = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N a_i - \mu_a ^2$
۴	انحراف	$S_a = \frac{R_3}{R_2 \sqrt{R_2}}, R_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i - \mu_a ^k$

۵	کورتوز	$K_a = \frac{R_4}{R_2 R_2}, R_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i - \mu_a ^k$
۶	طول خط	$L_a = \sum_{i=1}^{N-1} a_i - a_{i-1} $
۷	انرژی غیرخطی	$NE_a = \sum_{i=2}^{N-1} a_i^2 - a_{i+1} a_{i-1} $
۸	SampEn	$SEn(a, m, r) = \log \phi^m(r) - \log \phi^{m+1}(r)$ $\phi^m(r) = \sum_{j=0}^{N-m} \sum_{i=0}^{N-m} \Theta(r - \ a_i - a_j\)$ where $\Theta(\cdot)$ is Heaviside step function
۹	آنتروپی جایگشت	$PEn(a) = -\sum_{k=1}^{m-1} p(\pi_k) \log p(\pi_k)$ $p(\pi_k) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=0}^{N-m} \delta[a_i - \pi_k]$ where $\delta(\cdot)$ is Dirac function
۱۰	آنتروپی شانون	$ShEn(a) = -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i$
۱۱	آنتروپی طیفی	$SpEn(a) = -\sum_{f=1}^N p_f \log p_f$
۱۲	آنتروپی طیفی نرمالیزه شده	$NSE = \frac{1}{\log(N_f)} \sum_{f=f_1}^{f_2} S(f) (\log \frac{1}{S(f)})$
۱۳	آنتروپی بولتزمن	$Boltzmann_entropy = k \ln(W)$
۱۴	آنتروپی کولموگروف	$K = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{N-1} (S_{n+1} - S_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} [S_N - S_0]$
۱۵	تحرك	$M_a = \frac{\sigma_{a'}}{\sigma_a}, a'_i = a_{i+1} - a_i$
۱۶	پیچیدگی	$C_a = \frac{\sigma_{a''} / \sigma_{a'}}{\sigma_{a'} / \sigma_a}, a''_i = a'_{i+1} - a'_i$
۱۷	Number of zero-crossings	NZ_a
۱۸	تعداد اکسترمم محلی	NX_a
۱۹	ابعاد فراکتال کاتز	$katz = \frac{\log(L/a)}{\log(d/a)}$
۲۰	بزرگترین توان لیاپانوف	$LLE = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{ \Delta x(x_0, t) }{ \Delta x_0 }$
۲۱	بعد فراکتال پطروسیان	$PFD = \frac{\log N}{\log N + \log N + 0.4M}$
۲۲	اندازه گیری همبستگی پیچیده	$A(i) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1, y_1, 1, 1 \\ x_2, y_2, 1 \\ x_3, y_3, 1 \end{bmatrix}$ $C_n = \pi \times SD1 \times CCM(m) = \frac{1}{C_n(N-2)} \sum_{i=1}^{N-2} \ A(i)\ $



۲-۴- انتخاب بهترین ویژگی‌ها

انتخاب ویژگی‌ها، فرآیند شناسایی و حذف ویژگی‌های نامربوط، کم اهمیت و حذف ویژگی‌های زائد جهت انتخاب بهترین ورودی برای طبقه‌بندی و بهبود دقت تشخیص صرع می‌باشد. برای استخراج بهترین ویژگی‌ها، الگوریتم فراابتکاری عنکبوت اجتماعی پیشنهاد شده است. در ادامه به شرح جزئیات این الگوریتم پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱- الگوریتم عنکبوت اجتماعی

الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی توسط کائوس و همکاران در سال ۲۰۱۳ ارائه شده است [۳۲]. رفتار جستجوگر عنکبوت اجتماعی را می‌توان به عنوان جنبش جمعی عنکبوت‌ها به سمت محل منبع غذایی توصیف کرد. عنکبوت ارتعاشات منتشر شده در شبکه را برای تعیین جهت بالقوه یک منبع غذایی دریافت و تحلیل می‌کند. هر عنکبوت در وب دارای یک موقعیت و یک برازش است که نشان دهنده بالقوه یافتن منبع غذایی در آن موقعیت می‌باشد. عنکبوت می‌تواند آزادانه در وب حرکت کند، اما وب را نمی‌تواند ترک کند. هنگامی که یک عنکبوت به موقعیت جدیدی حرکت نماید، یک ارتعاش تولید می‌کند که در سراسر وب منتشر می‌شود. اعضای اجتماعی به جنس ماده و جنس نر تقسیم شده است که در آن تعداد جنس ماده بیشتر از جنس نر است، جنس ماده حدود ۹۰ درصد از جمعیت را تشکیل می‌دهد. در طول بهینه‌سازی، عنکبوت با ارتعاش رشته‌ها در وب ارتباط برقرار می‌کند. ارتعاش که یک عنکبوت جنس ماده دریافت می‌کند، با توجه به اندازه عنکبوت و فاصله‌ی عنکبوت‌ها از یکدیگر صرفنظر از جنس تعریف شده است. پاسخ جنس ماده به این ارتعاشات به صورت جاذبه یا دافعه است که یا به سمت آن ارتعاش جذب می‌شود و یا از آن دور می‌شود. مدل ریاضی که توسط کائوس و همکاران ارائه شده است در (۱) آمده است:

$$Vibsi = w_j e_{ij}^d \quad (1)$$

در این رابطه، w وزن عنکبوت z ام و d فاصله اقلیدوسی بین عنکبوت i ام و j ام است. فرض بر اینست که عنکبوت جنس ماده قادر به احساس سه ارتعاش از عنکبوت‌ها به شرح ذیل است: نزدیکترین عضو با وزن بالاتر ($Vibsi$)، پیش‌ترین عنکبوت در اجتماع ($Vibbi$)، نزدیکترین عنکبوت نر به عنکبوت ماده که برای آن مناسب‌تر است ($Vibfi$) [۳۳]. عنکبوت جنس ماده به سمت منشأ ارتعاشات جذب می‌شود و یا از آن دور می‌شود. حرکت جاذبه و یا دافعه بستگی به چند پدیده تصادفی دارد. یک عدد تصادفی ثابت در محدوده $\{0,1\}$ تولید می‌شود در صورتی که عدد کوچکتر از PF (حد آستانه) باشد جنبش جاذبه و در غیر اینصورت جنبش دافعه است (مطابق (۲)).

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \left(\alpha \cdot Vibci \cdot (S_c - X_i(t)) + \beta \cdot Vibbi \cdot (S_b - X_i(t)) + \delta(r - 0.5) \right) \quad (2)$$

که در آنها α, β, δ ارزش‌های تصادفی در بازه $\{0,1\}$ نزدیک‌ترین و بهترین همسایه و S_b عنکبوت پردازش شده می‌باشد. این فرمول زمانی قابل اجرا است که جنس ماده به سمت منشأ ارتعاشات جذب شود. در صورتی که از منشأ ارتعاشات دور شود از (۳) استفاده شده است.

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \left(\alpha \cdot Vibci \cdot (S_c - X_i(t)) + \beta \cdot Vibbi \cdot (S_b - X_i(t)) + \delta(r - 0.5) \right) \quad (3)$$

جنس نر به روش‌های مختلف موقعیت خود را بروزرسانی می‌کند. عنکبوت‌ها در ابتدا به دو گروه عنکبوت غالب و مغلوب تقسیم می‌شوند. عنکبوت غالب با وزن بالاتر و تناسب اندام بهتر است و عنکبوت جنس ماده تمایل بیشتری دارد به سمت ارتعاشات آن جذب شود. درحالی‌که دیگر عنکبوت تمایل دارد به سمت مرکز جمعیت حرکت کند و به عنوان یک استراژی به استفاده از منابع غذایی که توسط عنکبوت غالب هدر رفته می‌پردازد. این رفتار برگرفته شده از الگوی رفتاری عنکبوت برای پیدا کردن غذا است. بدین ترتیب وزن تمام عنکبوت نر در هر تکرار مشخص می‌شود. موقعیت عنکبوت غلب و مغلوب به ترتیب مطابق (۴ و ۵) به دست می‌آید.

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \left(\alpha \cdot Vibfi \cdot (S_f - X_i(t)) + \delta(r - 0.5) \right) \quad (4)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \left(\alpha \left(\frac{\sum_j^N m_j^k \cdot N_{f+j}}{\sum_j^N N_f} \right) - X_i(t) \right) \quad (5)$$

که در آنها S_f نزدیکترین جنس نر و α, β, δ ارزش‌های تصادفی در بازه $\{0,1\}$ می‌باشند. از اینرو عنکبوت غالب در یک شعاع خاص که متشکل از یک یا چند جنس نر و ماده است، شروع به جفت‌گیری می‌کند. بنابراین، یک مکانیسم چرخ‌گردان به طور تصادفی به انتخاب پدر و مادری متناسب با ارزش‌های خود می‌پردازد. عنکبوت جدید ساخته شده (ترکیبی از ژنها) برازش آنها در مقایسه با بدترین عنکبوت (کمترین وزن و اندام نامناسب) در جامعه محاسبه و مقایسه می‌شود. در صورتی که عنکبوت جدید بهترین باشد توسط بدترین عنکبوت تولید شده جایگزین می‌شود.

۲-۴-۲- انتخاب ویژگی توسط الگوریتم عنکبوت اجتماعی

در این بخش، ۲۲ ویژگی از سیگنال خام EEG و ۲۲ ویژگی از هر یک از زیر باندهای تبدیل موجک گسسته استخراج می‌شوند (مطابق شکل (۲)) که در مجموع ۱۳۲ ویژگی استخراج شده است. این مجموع ۱۳۲ ویژگی به الگوریتم عنکبوت اجتماعی وارد می‌شود و این الگوریتم با استفاده از تابع شایستگی پیشنهادی مطابق (۶) بهترین بردار ویژگی‌ها جهت طبقه‌بندی تشخیص صرع انتخاب می‌کند.

$$objectiv - function = precision + \frac{\max(numberfeatureremoved)}{numberfeature} \quad (6)$$



$$w(a) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} a_i a_j y_i y_j k(x_i, x_j) \quad (10)$$

اثر SVM بستگی به انتخاب هسته، پارامترهای هسته، دارد که در این مقاله از تابع هسته RBF برای SVM استفاده شده است چون تابع هسته RBF می‌تواند داده با ابعاد بالا را آنالیز کند.

۳- نتایج

در این بخش، ابتدا معیارهای ارزیابی روش‌های تشخیص بیماری صرع مورد بررسی قرار خواهد گرفت و پس از آن، دیتابیس مورد استفاده معرفی خواهد شد. در نهایت نتایج عملی تشخیص بیماری صرع با روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک آخرین زیربخش این قسمت خواهد بود. تمام آزمایشات بر روی کامپیوتر شخصی با نرم‌افزار متلب ۲۰۲۳ انجام شده است.

۳-۱- معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی کارایی روش‌های تشخیص بیماری صرع از معیارهای ارزیابی کلاسیک صحت مطابق (۱۱)، حساسیت و ویژگی‌ها مطابق (۱۲) و خصوصیت^۱ مطابق (۱۳) استفاده می‌شود. هر چه مقدار صحت، حساسیت و ویژگی‌ها، ویژگی بیشتر باشد مناسب‌تر است.

$$Acc(\%) = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (11)$$

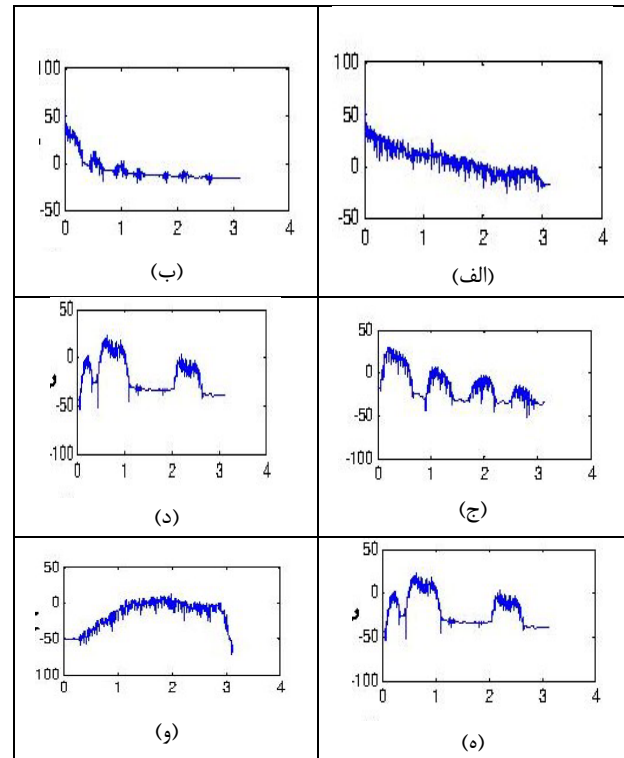
$$Se(\%) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

$$Sp(\%) = \frac{TN}{TN + FP} \quad (13)$$

در (۱۱-۱۳)، مثبت واقعی (TP) و منفی واقعی (TN) به ترتیب تعداد سیگنال‌های EEG به درستی شناسایی شده و تعداد سیگنال‌های EEG به درستی رد شده را برای هر کلاس نشان می‌دهند. همچنین، منفی کاذب (FN) و مثبت کاذب (FP) تعداد سیگنال‌های EEG اشتباه رد شده و سیگنال‌های EEG اشتباه تشخیص داده شده برای هر کلاس هستند.

۳-۲- پایگاه داده

در این مقاله از پایگاه داده دانشگاه بن آلمان استفاده شده است [۳۵]. این پایگاه داده شامل پنج گروه (Z, O, N, F, S) است. هر گروه داده، صد نمونه از سیگنال EEG با طول ۲۳/۶ ثانیه و با نرخ نمونه‌برداری ۱۷۳/۶۱ می‌باشد. این سیگنال‌ها متعلق به دامنه سنی ۶ تا ۴۳ ساله است و از این سیگنال‌ها، آرتیفکت‌هایی چون حرکت عضلات و چشم حذف شده است. گروه Z و O شامل نمونه‌های افراد سالم (غیر صرعی) به ترتیب با چشم‌های باز و چشم‌های بسته می‌باشد. گروه N و F نمونه‌های بیماران در فواصل حملات صرعی می‌باشد. گروه



شکل (۲). تجزیه EEG توسط تبدیل موجک گسسته. (الف) EEG، (ب) تا (و) تجزیه ۵ زیر باند EEG توسط تبدیل موجک گسسته

۲-۵- طبقه بندی

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که در این مقاله از آن برای طبقه‌بندی ویژگی‌های انتخابی استفاده می‌شود [۳۴]. مبنای کار طبقه‌بند SVM دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم داده‌ها سعی می‌شود، خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد. تابع جداساز برای SVM دو کلاس، عبارت است از:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n y_i a_i k(x, x_i) + b \quad (7)$$

در (۷)، n تعداد نمونه‌های آموزشی، x_i نمونه آموزشی i ام و y_i طبقه صحیح برای نمونه آموزشی i ام است. مقدار y_i برای یکی از کلاس‌ها ۱ و برای کلاس دیگری -۱ در نظر گرفته می‌شود و b مقدار بایاس تابع است. مقادیر a_i ضرایب طبقه‌بند هستند که به همراه b در حین آموزش تعیین می‌شوند. تابع $k(x_1, x_2)$ هسته است که دو نمونه از متوالترین هسته‌هایی که برای SVM استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از:

$$k(x_1, x_2, p) = (1 + x_2 \cdot x_1)^p \quad (8)$$

$$k(x_1, x_2, \sigma) = e^{-\frac{\|x_1 - x_2\|^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

در (۸-۹)، p و σ به ترتیب پارامترهای قابل تنظیم برای هسته‌های چندجمله‌ای و RBF هستند. ضرایب a_i در (۷)، با حل مسائل بهینه‌سازی زیر بدست می‌آیند:

¹ Specificity

S نمونه‌های بیماران در حین حملات صرع می‌باشد که در جدول (۲) مورد‌های متفاوت در نظر گرفته شده است.

۳-۳-نتایج و آزمایش‌ها

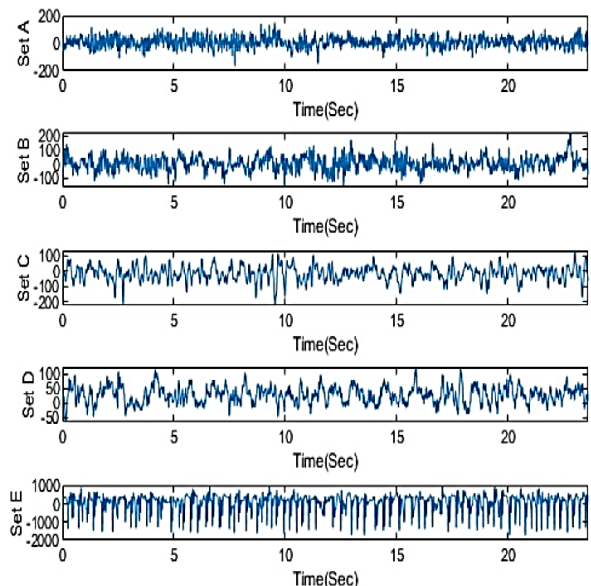
برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با روش [۳۷]، روش [۳۸]، روش [۳۹]، روش [۴۰] و روش [۴۱]، دو مجموعه آزمایش انجام می‌شود. در مجموعه آزمایش اول، به بررسی تاثیر طول‌های مختلف سیگنال EEG بر روی عملکرد روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. در مجموعه دوم، به بررسی عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های اخیر پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- تاثیر طول موج‌های مختلف سیگنال EEG

در این آزمایش، تاثیر طول‌های مختلف سیگنال EEG بر روی تشخیص تشنج بررسی می‌شود. طول پنجره به ترتیب ۴۰۹۶، ۲۰۴۸، ۱۰۲۴ و ۵۱۲ تعیین شد و برای هر پنجره، عملکرد روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول (۳)). همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش طول پنجره، صحت، حساسیت و خصوصیت افزایش می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که برای پنجره با طول کوتاه، عملکرد مدل پیشنهادی خوب و قابل قبول می‌باشد.

۳-۳-۲- مقایسه با کارهای اخیر انجام شده

در این بخش، عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌های کلاسیک مقایسه شد که در جدول (۴) نشان داده شده است که در آن، روش [۳۷] نسبت به روش‌های دیگر عملکرد بهتری دارد. روش [۴۰] نسبت به روش‌های [۳۷]، [۳۸]، [۳۹] و [۴۱] از صحت، حساسیت و خاصیت بهتری برخوردار است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب آن در تشخیص صرع می‌باشد اما روش پیشنهادی نسبت به روش [۴۰] و روش‌های دیگر عملکرد بهتری دارد. با توجه به عملکرد روش پیشنهادی پزشکان می‌توانند جهت تشخیص خودکار بیماری صرع از آن استفاده کنند.



شکل (۳): نمونه‌ای از سیگنال EEG به ترتیب مربوط گروه Z تا S

جدول (۲): مورد‌های متفاوت در نظر گرفته شده

مورد	کلاسها	توصیف	نوع
۱	S یا Z		
۲	S یا O	نمونه غیرصرعی و حین تشنج	دو کلاس
۳	S یا ZO		
۴	S یا N	نمونه فاصله بین و حین تشنج ها	دو کلاس
۵	S یا F		
۶	S یا NF		
۷	S یا NZO		دو کلاس
۸	S یا FZO		
۹	S یا ZONF	نمونه حین تشنج	
۱۰	S یا N یا Z		سه کلاس
۱۱	S یا NF یا ZO	نمونه غیرصرع، فاصله بین تشنج‌ها و حین تشنج	
۱۲	F یا N یا O یا Z یا S	کل نمونه ها	پنج کلاس

جدول (۳): ارزیابی روش پیشنهادی با طول متفاوت سیگنال EEG

پنجره	مورد	صحت	حساسیت	خصوصیت
۵۱۲	۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	۹	۹۹/۳۷	۹۸/۸۹	۹۹/۵۹
	۱۱	۹۹/۳۹	۹۸/۹۷	۹۹/۶۸
	۱۲	۹۸/۹۶	۹۷/۹۸	۹۹/۱۷
۱۰۲۴	۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	۹	۹۹/۴۵	۹۸/۸۰	۹۹/۶۱
	۱۱	۹۹/۹۱	۹۹/۹۷	۹۹/۸۱
	۱۲	۹۹/۱۲	۹۸/۸۶	۹۹/۳۰
۲۰۴۸	۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	۹	۹۹/۸۱	۹۹/۴۳	۹۹/۹۴
	۱۱	۹۹/۹۲	۹۹/۹۷	۹۹/۸۰
	۱۲	۹۹/۲۸	۹۹/۰۱	۹۹/۴۱
۴۰۹۶	۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	۹	۹۹/۷۲	۹۹/۴۲	۹۹/۹۱
	۱۱	۹۹/۹۷	۱۰۰	۹۹/۹۲
	۱۲	۹۹/۴۳	۹۹/۷۵	۹۹/۳۱

جدول (۴): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر

روش ها	صحت	حساسیت	خصوصیت
روش [۳۷]	۷۹/۸	۸۱/۵	۷۷/۲
روش [۳۸]	۹۳	۹۷	۹۲
روش [۳۹]	۹۸/۴۰	۹۸/۲۲	۹۸/۳۱
روش [۴۰]	۹۹/۳۰	۹۹/۶۴	۹۹/۱۲
روش [۴۱]	۹۶/۲	۹۵/۶۸	۹۸/۷۹
روش پیشنهادی	۹۹/۵۶	۹۹/۸۲	۹۹/۳۱



۴- جمع‌بندی

در این مقاله، سیستم جدیدی برای تشخیص خودکار صرع ارائه شده است. در ابتدا، نویز از سیگنال EEG حذف و سیگنال بخش‌بندی می‌شود. سپس، تبدیل موجک گسسته به تجزیه سیگنال می‌پردازد. پس از آن، ۱۶۵ ویژگی متفاوت از سیگنال EEG خام و سیگنال EEG تجزیه شده استخراج می‌شود. انتخاب بهترین ویژگی‌ها در دقت تشخیص بیماری صرع بسیار موثر می‌باشد، که در این سیستم جدید از الگوریتم فرا ابتکاری عنکبوت اجتماعی و تابع هدف پیشنهادی جهت انتخاب بهترین اطلاعات استفاده می‌شود. در نهایت، برای طبقه‌بندی سیگنال‌های EEG تشنج و غیر تشنج، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به کار گرفته می‌شود. سیستم جدید تشخیص خودکار صرع پیشنهادی را می‌توان پزشکان جهت تشخیص سریع بیماری صرع استفاده کنند. در مطالعات آتی تلاش می‌شود، از این سیستم جدید پیشنهادی در تشخیص آلزایمر به کار گرفته شود.

مراجع

- neural network," Scientific Reports, vol. 13, no. 1, p. 17710, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-44318-w
- [۹] M. Omidvar, A. Zahedi, and H. Bakhshi, "EEG signal processing for epilepsy seizure detection using 5-level Db4 discrete wavelet transform, GA-based feature selection and ANN/SVM classifiers," Journal of ambient intelligence and humanized computing, vol. 12, no. 11, pp. 10395-10403, 2021. DOI: 10.1007/s12652-020-02837-8.
- [۱۰] M. P. Kantipudi, N. P. Kumar, R. Aluvalu, S. Selvarajan, and K. Kotecha, "An improved GBSO-TAENN-based EEG signal classification model for epileptic seizure detection," Scientific Reports, vol. 14, no. 1, p. 843, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-51337-8
- [۱۱] U. R. Acharya, F. Molinari, S. V. Sree, S. Chattopadhyay, K.-H. Ng, and J. S. Suri, "Automated diagnosis of epileptic EEG using entropies," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 7, no. 4, pp. 401-408, 2012. DOI: 10.1016/j.bspc.2011.07.007
- [۱۲] D. S. T. Behara, A. Kumar, P. Swami, B. K. Panigrahi, and T. K. Gandhi, "Detection of epileptic seizure patterns in EEG through fragmented feature extraction," in 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2016: IEEE, pp. 2539-2542. DOI:10.1109/INDIACom.2016.7563001
- [۱۳] Z. Zhang and K. K. Parhi, "Seizure prediction using long-term fragmented intracranial canine and human EEG recordings," in 2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2016: IEEE, pp. 361-365. DOI: 10.1109/ACSSC.2016.7869060
- [۱۴] N. D. Truong, A. D. Nguyen, L. Kuhlmann, M. R. Bonyadi, J. Yang, and O. Kavehei, "A generalised seizure prediction with convolutional neural networks for intracranial and scalp electroencephalogram data analysis," arXiv preprint arXiv:1707.01976, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1707.01976
- [۱۵] M. Niknazar, S. Mousavi, B. V. Vahdat, and M. Sayyah, "A new framework based on recurrence quantification analysis for epileptic seizure detection," IEEE journal of biomedical and health informatics, vol. 17, no. 3, pp. 572-578, 2013. DOI:10.1109/JBHI.2013.2255132
- [۱۶] N. Sadati, H. R. Mohseni, and A. Maghsoudi, "Epileptic seizure detection using neural fuzzy networks," in 2006 IEEE international conference on fuzzy systems, 2006: IEEE, pp. 596-600, DOI: 10.1109/FUZZY.2006.1681772
- [۱۷] U. Orhan, M. Hekim, and M. Ozer, "EEG signals classification using the K-means clustering and a multilayer perceptron neural network model," Expert Systems with Applications, vol. 38, no. 10, pp. 13475-13481, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.04.149
- [۱۸] A. R. Naghsh-Nilchi and M. Aghashahi, "Epilepsy seizure detection using eigen-system spectral estimation and Multiple Layer Perceptron neural network," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 5, no. 2, pp. 147-157, 2010. DOI: 10.1016/j.bspc.2010.01.004
- [۱۹] H. Ocak, "Optimal classification of epileptic seizures in EEG using wavelet analysis and genetic algorithm," Signal processing, vol. 88, no. 7, pp. 1858-1867, 2008. DOI: 10.1016/j.sigpro.2008.01.026
- [۱] S. Mekruksavanich, W. Phaphan, and A. Jitpattanakul, "Epileptic seizure detection in EEG signals via an enhanced hybrid CNN with an integrated attention mechanism," Mathematical Biosciences and Engineering, vol. 22, no. 1, pp. 73-105, 2025, DOI: 10.3934/mbe.2025004
- [۲] M. Pouryosef, R. Abedini-Nassab, and S. M. R. Akrami, "A novel framework for epileptic seizure detection using electroencephalogram signals based on the bat feature selection algorithm," Neuroscience, vol. 541, pp. 35-49, 2024, DOI: 10.1016/j.neuroscience.2024.01.014
- [۳] X. Qiu, F. Yan, and H. Liu, "A difference attention ResNet-LSTM network for epileptic seizure detection using EEG signal," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 83, p. 104652, 2023, DOI: 10.1016/j.bspc.2023.104652
- [۴] M. Shen, P. Wen, B. Song, and Y. Li, "An EEG based real-time epilepsy seizure detection approach using discrete wavelet transform and machine learning methods," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 77, p. 103820, 2022, DOI: 10.1016/j.bspc.2022.103820
- [۵] J. Zhang, S. Zheng, W. Chen, G. Du, Q. Fu, and H. Jiang, "A scheme combining feature fusion and hybrid deep learning models for epileptic seizure detection and prediction," Scientific Reports, vol. 14, no. 1, p. 16916, 2024, DOI: 10.1038/s41598-024-67855-4
- [۶] H. Ocak, "Automatic detection of epileptic seizures in EEG using discrete wavelet transform and approximate entropy," Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 2, pp. 2027-2036, 2009, DOI: 10.1016/j.eswa.2007.12.065
- [۷] S. Jain, V. V. Gupta, A. S. Bist, M. Joshi, and A. Garg, "Automated Epileptic Seizure Detection of EEG Signals Using Machine Learning," in International Conference on Cognitive Computing and Cyber Physical Systems, 2025: Springer, pp. 349-357. DOI: 10.1007/978-981-97-7371-8_27
- [۸] G. Yogarajan et al., "EEG-based epileptic seizure detection using binary dragonfly algorithm and deep



techniques," in 2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET), 2016: IEEE, pp. 1-6 .

DOI:10.1109/ICET.2016.7813209

[۳۲] E. Cuevas, M. Cienfuegos, D. Zaldívar, and M. Pérez-Cisneros, "A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 16, pp. 6374-6384, 2013. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.05.041

[۳۳] E. Cuevas and M. Cienfuegos, "A new algorithm inspired in the behavior of the social-spider for constrained optimization," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 2, pp. 412-425, 2014. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.07.067

[۳۴] C. J. Burges, "A tutorial on support vector machines for pattern recognition," *Data mining and knowledge discovery*, vol. 2, no. 2, pp. 121-167, 1998. doi: 10.1023/A:1009715923555

[۳۵] M. K. Siddiqui, R. Morales-Menendez, X. Huang, and N. Hussain, "A review of epileptic seizure detection using machine learning classifiers," *Brain informatics*, vol. 7, no. 1, p. 5.۲۰۲۰, DOI:10.1186/s40708-020-00105-1

[۳۶] R. G. Andrzejak, K. Lehnertz, F. Mormann, C. Rieke, P. David, and C. E. Elger, "Indications of nonlinear deterministic and finite-dimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state," *Physical Review E*, vol. 64, no. 6, p. 061907, 2001. DOI: 10.1103/PhysRevE.64.061907

[۳۷] T. Zhang, W. Chen, and M. Li, "Generalized Stockwell transform and SVD-based epileptic seizure detection in EEG using random forest," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 519-534, 2018. DOI:10.1016/j.bbe.2018.03.007

[۳۸] M. Mahmud, M. S. Kaiser, A. Hussain, and S. Vassanelli, "Applications of deep learning and reinforcement learning to biological data," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 29, no. 6, pp. 2063-2079, 2018. DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2790388

[۳۹] E. Aydemir, T. Tuncer, and S. Dogan, "A Tunable-Q wavelet transform and quadruple symmetric pattern based EEG signal classification method," *Medical hypotheses*, vol. 134, p. 109519, 2020. DOI: 10.1016/j.mehy.2019.109519

[۴۰] T. Iloin, R. Barati, and H. Azad, "A New Approach in Epilepsy Diagnosis using Discrete Wavelet Transformation and Analysis of Variance," *Signal Processing and Renewable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1-11, 2023. <https://oiccpres.com/spre/article/view/7894>

[41] ف. قره‌داغی س. مشگینی, "تشخیص حمله‌های صرعی از روی ضرایب موجک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO)," *هوش محاسباتی در مهندسی برق*, vol. 10, no. 3, pp. 11-24, 2019, doi: 10.22108/isee.2019.116284.1207

[۲۰] A. Jain and D. Zongker, "Feature selection: Evaluation, application, and small sample performance," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 19, no. 2, pp. 153-158, 1997. DOI: 10.1109/34.574797

[۲۱] S. Mousavi, M. Niknazar, and B. V. Vahdat, "Epileptic seizure detection using AR model on EEG signals," in 2008 Cairo International Biomedical Engineering Conference, 2008: IEEE, pp. 1-4 . DOI:10.1109/CIBEC.2008.4786067

[۲۲] L. Wang et al., "Automatic epileptic seizure detection in EEG signals using multi-domain feature extraction and nonlinear analysis ", *Entropy*, vol. 19, no. 6, p. 222, 2017. DOI: 10.3390/e19060222

[۲۳] A. Hamad, E. H. Houssein, A. E. Hassanien, and A. A. Fahmy, "A hybrid EEG signals classification approach based on grey wolf optimizer enhanced SVMs for epileptic detection," in *Proceedings of the international conference on advanced intelligent systems and informatics 2017*, 2018: Springer, pp. 108-117 . DOI: 10.1007/978-3-319-64861-3_10

[۲۴] Z. Hossein-Nejad and M. Nasri, "Epileptic Seizure Detection based on Statistical and Wavelet Features and Siamese Network," in 2023 14th International Conference on Information and Knowledge Technology (IKT), 2023: IEEE, pp. 201-205 . DOI:10.1109/IKT62039.2023.10433025

[۲۵] P. Mallik, A. K. Nayak, S. K. Mohapatra, and K. Swain, "Effectiveness of SOSA, FFA and GOA Algorithms for Epileptic Seizure Detection Using DWT and SVM," in *Computing, Communication and Intelligence: CRC Press*, 2025, pp. 52-56. DOI:10.1201/9781003581215-11

[۲۶] Z. Hossein, "Social Spider Optimization Algorithm in Multimodal Medical Image Registration," *Journal of Optimization of Soft Computing (JOSC)*, vol. 1, no. 1, pp. 23-30, 2023. <https://www.researchgate.net/publication/375279624>

[۲۷] A. Luque-Chang, E. Cuevas, F. Fausto, D. Zaldívar, and M. Pérez, "Social spider optimization algorithm: modifications, applications, and perspectives," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, no. 1, p. 6843923, 2018. DOI: 10.1155/2018/6843923

[۲۸] R. Vijay and V. Priya, "Anti-islanding protection of distributed generation based on social spider optimization technique," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 4, no. 6, p. 237193, 2017. DOI: 10.22161/ijaers.4.6.5

[۲۹] U. R. Acharya et al., "Characterization of focal EEG signals :a review," *Future Generation Computer Systems*, vol. 91, pp. 290-299, 2019. DOI: 10.1016/j.future.2018.08.044

[۳۰] P. Boonyakitanont, A. Lek-Uthai, K. Chomtho, and J. Songsiri, "A review of feature extraction and performance evaluation in epileptic seizure detection using EEG," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 57, p. 101702, 2020. DOI: 10.1016/j.bspc.2019.101702

[۳۱] M. Ahmad, M. Saeed, S. Saleem, and A. M. Kamboh, "Seizure detection using EEG: A survey of different





Islamic Azad University , Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcdsa



Ultrasound waves, Characteristic and Applications

Asma Lak^{1*}, Fereshteh Safi²

¹ Department of Electrical Engineering, Bu.C, Islamic Azad University, Boushehr, Iran

asmalak@iau.ac.ir

² Department of Nuclear Engineering, Bu.C, Islamic Azad University, Boushehr, Iran

fereshteh.safi@iau.ac.ir

Abstract: The upper limit of human hearing frequency is considered to be 20 kHz and the frequency above 20KHz are called Ultrasound. The important and vital role of ultrasound in human life has been proven to everyone. Many applications of ultrasound in medical imaging, food industrial, military applications, water disinfection, insecticide and metal and plastic fusion and such applications, all show the importance of ultrasound. In this paper at first ultrasound is defined. The applications and advantages of it are explained in detail and the application of insecticide as a special application is described. The probable biological effects of ultrasound which reported by researchers is explained too. Thermal Index (TI) and Mechanical Index (MI) and thermal effects are defined. The condition of propagation of sound wave, the level of their energy and other characteristics of them are introduced.

Keywords: Ultrasound, Biological effects, Thermal and Nonthermal effects

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025

Received: 2024-09-30

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-11-20

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-06-21

CITATION

Lak, A., Safi, F., "Ultrasound waves, Characteristic and Applications", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 23-31, 2025.

DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Ultrasound refers to sound waves that have a frequency higher than the frequency range of human hearing. This range decreases with age, but usually the highest human hearing frequency is considered to be around 20 or 25 kHz. Sound is a longitudinal mechanical wave that propagates in the material environment by creating alternating contractions and expansions (creating alternating changes in the density of the surrounding material). This wave can be received and understood by the human hearing system in a certain frequency range. Just as "visible light" is a very small part of the entire spectrum of electromagnetic waves, "sound" (in the sense of what we hear) is also a very small part of the vast spectrum of sound waves. The auditory system of human babies is sensitive to the frequency range of 20 Hz to 20 kHz, but with age, the upper limit of this range decreases gradually, so that adults can hear sounds in the range of 20 Hz to 15 kHz and sometimes 18 kHz. In this paper the production, application and biological effects of ultrasound have been introduced and reviewed.

2- Methodology

Because of the properties of ultrasound such as 1- They are very energetic. 2- Similar to light waves, sound waves are also reflected, absorbed and scattered. 3- They cover long distances without much decrease in energy level. 4- It is possible to produce standing waves in a liquid with the help of ultrasound waves. In this situation, the liquid medium will act like a diffraction grating, which is called an acoustic grating. 5- When passing through an object, they create intense thermal effects. The extent of these effects depends on the intensity of the ultrasound wave and the type of tissue. 6- Sound waves do not propagate in a vacuum because there is no substance there that wants to vibrate or move. 7- In a homogeneous environment, the speed of sound remains constant. So the application of these waves from around 28 years ago have been studied.

3- Results and discussion

Depending on the frequency and range, ultrasound beams have many and varied applications in the medical, military and industrial communities. In industrial applications, low-power, high-frequency ultrasound is used to test and measure materials and reveal cracks, fractures, and movement of parts, etc. High power ultrasound (lower frequency and higher power) for cleaning, plastic welding and metals. Cutting and shaping, separation, combination is used. Industrial imaging to detect defects of parts is also one of the other applications of ultrasound in the industry.

Ultrasonic technology is used in the processing, cooling, and preservation of food products. It is also used as a method for the heat process in removing microorganisms and enzymes without nutrients in foods, homogenization, fruit drying, fruit ripening detection, vegetable oil extraction, fruit and other food quality measurement, determination of material compositions. food and particle size, improving the quality of fried products can be mentioned too. The special application of ultrasound is in insect and pest resellers. Although Ultrasonic pest control devices are made in two models. The type that is connected to the electrical outlet and the type that is desktop. The first model is less effective in not covering the entire space due to space limitations. Its desktop model is more successful in this regard because it can be moved and adjusted with the equipment and the environment. These devices have been marketed in Iran with the insect repellence approach and in America with the rodent repellence approach. But apparently, none of them have real functionality. The reason for the inefficiency of this system is assumed to be the normalization of these waves in the environment for animal pests. It means that even in the presence of waves, they give off pests. Because they have been able to get used to the waves.

4- Conclusion

In this article, ultrasound waves and their features and specifications were described. There are many different applications for ultrasound that were introduced in detail. So far, many studies have been conducted on the biological effects of waves on the human body. Ultrasonic waves have been investigated as a part of the spectrum of waves. Researches have not reported very bad effects in the field of medical applications yet, so this problem has caused ultrasound to be used as a low-risk medical diagnosis method. Currently, sufficient experimental data for the possibility of radiation risk in the use of ultrasound devices have not been clearly presented, but studies have been conducted on body organs, cellular and molecular levels, which indicate the possibility of a biological risk of ultrasound on the human body and organisms in general. In any case, it should be noted that especially considering that the use of this system in any environment such as home or workplace means that people are exposed to ultrasound radiation all the time or at least for long hours during the day. It is necessary to consider the possibility of any danger for different ages. Also, the results of the research conducted on the effect of ultrasound waves caused by repeated ultrasounds during pregnancy, on newborn babies and then children, it is necessary to study the intensity of ultrasound waves very carefully more.





بررسی امواج فراصوت، ویژگی ها و کاربردهای آن

اسماء لک^{۱*}، فرشته صافی^۲

۱- گروه مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران (asmalak@iau.ac.ir)

۲- دانشکده مهندسی هسته‌ای، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران (fereshteh.safi@iau.ac.ir)

چکیده: معمولاً حد بالای فرکانس شنوایی انسان حدود ۲۰ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود و اصوات با فرکانس بیش از ۲۰ کیلوهرتز فراصوت می‌نامند. نقش مهم و حیاتی فراصوت در زندگی انسان بر همگان اثبات شده است. کاربردهای فراوان آن در ابزارهای تصویربرداری پزشکی و سایر ادوات تشخیصی و درمانی پزشکی، صنایع غذایی، کاربردهای نظامی، گندزدایی آب و حشره‌کش‌ها و جوش فلز و پلاستیک و کاربردهای از این قبیل که در این مقاله ذکر شده است همگی بیان گر اهمیت فراصوت می‌باشد. در این مقاله در ابتدا فراصوت تعریف می‌شود. کاربردها و مزایای آن به تفصیل بیان گردیده و استفاده از فراصوت در حشره‌کش‌ها به عنوان کاربرد خاص مورد بررسی قرار گرفته است. اثرات بیولوژیکی احتمالی حاصل از فراصوت نیز که توسط محققین در منابع بررسی شده، تبیین شده است. شاخص گرمایی و شاخص مکانیکی و اثرات گرمایی معرفی شده است. همچنین شرایط انتشار امواج صوتی، میزان انرژی آنها و سایر ویژگی‌های آنها معرفی شده است.

واژه های کلیدی: فراصوت، اثرات بیولوژیکی، اثرات گرمایی و غیر گرمایی

DOI: 00.00000/0000

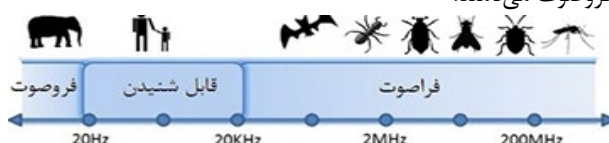
نوع مقاله: مروری

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹

حدود ۲۰ یا ۲۵ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود. صوت یک موج مکانیکی طولی است که با ایجاد انقباض و انبساط‌های متناوب (ایجاد تغییرات متناوب در چگالی ماده‌ی محیط) در محیط مادی منتشر می‌شود. این موج در محدوده خاص فرکانسی توسط سیستم شنوایی انسان قابل دریافت و درک است. همچنانکه "نور مرئی" بخش بسیار کوچکی از کل طیف امواج الکترومغناطیس است، "صوت" (به معنای آنچه که ما می‌شنویم) نیز بخش بسیار کوچکی از طیف وسیع امواج صوتی است. سیستم شنوایی نوزاد انسان به محدوده‌ی فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز حساس است اما رفته رفته، با بالا رفتن سن حد بالای این محدوده کمتر می‌شود؛ به طوری که افراد بالغ اصوات در محدوده ۲۰ هرتز تا ۱۵ کیلوهرتز و گاهی ۱۸ کیلوهرتز را حس می‌کنند [۱]. این محدوده برای جانداران مختلف متفاوت است. شکل (۱) این محدوده را برای بعضی جانداران مشخص می‌کند [۲]. اصوات با فرکانس بیش از ۲۰ کیلوهرتز فراصوت و اصوات با فرکانس کمتر از ۲۰ کیلوهرتز را اصوات فروصوت می‌نامند.



شکل (۱): آستانه شنوایی جانداران مختلف در مقایسه با انسان [۲]

۱- مقدمه

امروزه، استفاده از ابزاری که در آنها منابع تشعشع میدان‌های الکترومغناطیسی وجود دارد، نقش مهمی در زندگی بشر دارد. اما همزمان با پیشرفت تکنولوژی و استفاده از این ابزارها، نگرانی‌هایی نیز برای کاربران به جهت تأثیر این امواج بر سلامتی آنها به وجود آمده است. از حدود صد سال پیش ابتدا خطوط انتقال توان و سپس دستگاه‌های الکترونیکی پرکاربرد در منازل و محیط کار مانند بخاری برقی، تلویزیون، جاروبرقی، کامپیوتر و خشک‌کننده‌ها در فرکانس‌های ۵۰/۶۰ هرتز استفاده شده و کار می‌کنند. این فرکانس‌ها جزء طیف امواج فرکانس خیلی پایین^۲ (شکل (۱)) هستند. با گسترش صنعت برق اهمیت میدان‌های حاصل از این ابزار و سیستم‌ها در مقایسه با میدان‌های داخلی طبیعی بدن بیشتر شده است. اندام‌های بدن دارای جریان‌های داخلی و به تبع آن میدان‌های داخلی هستند که نقش کلیدی در مکانیزم‌های پیچیده کنترل فیزیکی، فعالیت‌های عصبی، رشد بافت‌ها و ترمیم آنها می‌باشد، لذا بررسی اثرات این میدان‌های خارجی باید بیشتر مطالعه شود. فراصوت یا اولتراسوند^۳ به امواج صوتی گفته می‌شود که دارای بسامدی بیشتر از بازه بسامدی شنوایی انسان هستند. با بالا رفتن سن این بازه کاهش می‌یابد، ولی معمولاً بالاترین فرکانس شنوایی انسان

* نویسنده مسئول

^۲ Extremely low frequency fields

^۳ Ultrasound



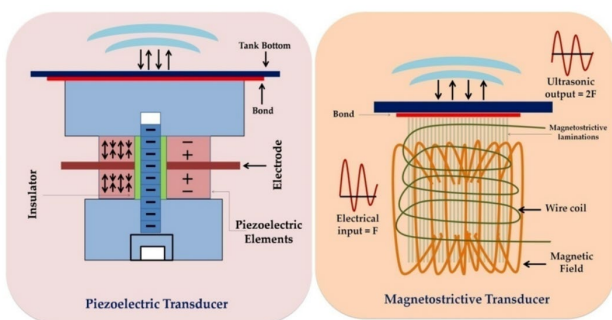
مغناطیسی^۳ -۲ مولد یا نوسانگر پیزوالکتریک [۱۱]. شکل (۲) مبدل‌های تولید فراصوت را نشان می‌دهد.

۳-۱- روش فشار مغناطیسی

هرگاه میله‌ای از یک ماده فروالکتریک - مانند آهن یا نیکل - در یک میدان مغناطیسی موازی با طول آن قرار می‌گیرد، تغییرات اندکی در طول میله ایجاد خواهد شد. این همان پدیده‌ی "فشار مغناطیسی" است. تغییر طول ایجاد شده به قدرت میدان مغناطیسی و طبیعت ماده (فروالکتریک) وابسته و از جهت میدان مستقل است. مطابق شکل، اطراف میله مورد نظر سیم پیچ‌هایی قرار داده می‌شود و میله از وسط محکم می‌شود. نوسانگر الکترونیکی میدان مغناطیسی را تولید می‌کند. خازن متغیر موجود C موازی با سیم پیچ L بسته می‌شود تا به این صورت مدار تشدید ساخته شود. فرکانس نوسانگر با کمک خازن متغیر تنظیم می‌شود. با اتصال به منبع تغذیه نوسان با فرکانس $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ نوسان خواهد کرد. با عبور این جریان از سیم پیچ، میدان مغناطیسی در طول میله ایجاد می‌شود. بدین ترتیب میله تحت تأثیر فشار مغناطیسی دچار لرزش خواهد شد. فرکانس این لرزش عبارت است از:

$$f = 1/2L \sqrt{(Y/\rho)} \quad (۱)$$

که در آن Y مدول یانگ ماده‌ی میله و ρ چگالی میله می‌باشند. اگر خازن C طوری تنظیم شود که این دو فرکانس با هم برابر باشند، تشدید رخ خواهد داد. در این حالت میله در امتداد طول خود با بیشترین دامنه دچار لرزش شده و از انتهای آن امواج فراصوت گسیل خواهد شد. مزایای این روش عبارتند از: سادگی مدار و هزینه پایین، و اینکه بدون نگرانی از تخریب مدار نوسانگر در فرکانس‌های پایین فراصوت می‌توان خروجی پر قدرت ایجاد کرد. از معایب این روش عدم توانایی تولید فرکانس بالاتر از ۳ مگاهرتز، وابسته بودن فرکانس نوسان به دما و همچنین افت انرژی به دلیل هیستریزس و جریان گردابی می‌باشد.



(ب)

(الف)

شکل (۲): مبدل‌هایی برای تولید فراصوت - الف: مبدل فشار مغناطیسی؛ ب: پیزوالکتریک [۱۱]

استفاده از امواج فراصوت در تشخیص هویت اهداف نامرئی، ابتکار بشر نیست. اسپازالونی^۱ در سال ۱۹۷۴ اظهار کرد خفاش در حال پرواز که در تاریکی می‌تواند از موانع دوری کند و صید خود را محدود کند از امواج فراصوت استفاده می‌کند. ضمن اینکه توانایی دیدن و شنیدن خفاش را بررسی کردند و متوجه شدند حتی خفاش اگر کور باشد بی‌شک می‌تواند در هوا پرواز کند [۳-۴]. پس از حادثه تایتانیک در سال ۱۹۱۲، تحقیقات برای آشکارسازی موانع زیر دریا افزایش یافت [۵]. اولین کاربرد فراصوت در جنگ جهانی اول برای شناسایی و ردیابی زیردریایی‌ها بود. بعد از آن فراصوت در محدوده وسیعی از کاربردهای پزشکی و غیر پزشکی استفاده شد [۶]. در جنگ جهانی دوم سیستم سونار^۲ برای یافتن موانع زیر دریا توسعه یافت. فراصوت انرژی است که با بافت‌های بدن برهمکنش دارد. بنابراین ممکن است به خصوص در اعضای حساس (مانند مغز، چشم، ریه و گوارش) و جنین اثرات بیولوژیکی خطرناک ایجاد کند. مکانیزم اساسی بر هم کنش شامل اثرات گرمایی و غیر گرمایی است [۷].

۲- خواص امواج فراصوت

مطالعات بسیاری بر روی اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی امواج فراصوت صورت گرفته است. خواص و ویژگی امواج فراصوت شامل موارد زیر است: ۱- بسیار پرنرژی هستند. ۲- مشابه امواج نوری، امواج صوتی نیز بازتاب، جذب و پراشیده می‌شوند. ۳- مسافت‌های طولانی را بدون کاهش چندانی در سطح انرژی طی می‌کنند. ۴- می‌توان با کمک امواج فراصوت در یک مایع موج ایستا تولید کرد. در این شرایط محیط مایع مثل یک شبکه‌ی پراش عمل خواهد کرد که آن را شبکه آکوستیکی نامیده می‌شود. ۵- هنگام عبور از یک جسم اثرات حرارتی شدید ایجاد می‌کنند. میزان این اثرات به شدت موج فراصوت و نوع بافت وابسته است. ۶- امواج صوتی در خلاء منتشر نمی‌شوند چون ماده‌ای در آنجا وجود ندارد که بخواهد ارتعاش کند یا جابجا شود. ۷- در یک محیط همگن، سرعت صوت ثابت می‌ماند [۸-۱۰].

۳- روش‌های تولید امواج فراصوت

یک موج صوتی وقتی ایجاد می‌شود که یک حرکت گذرا مانند شوک یا حرکت تکرارشونده مانند حرکت ارتعاشی به قسمتی از جسمی که قابلیت انتشار امواج را دارد اعمال می‌شود. امواج فراصوت را به دو صورت طبیعی و مصنوعی می‌توان تولید نمود. به صورت مصنوعی می‌توان با استفاده از مبدل‌های مغناطیسی و مبدل‌های الکتریکی و در روش طبیعی از مواد دارای این خاصیت، مانند کوارتز تولید نمود. دو روش متداول در تولید امواج فراصوت شناخته شده است. ۱- مولد یا نوسانگر فشار

^۱ Spazzaloni

^۲ تغییر در ابعاد یک جسم فرومغناطیس در هنگام قرار گرفتن جسم در

میدان مغناطیسی

^۳ Magneto-striction



۲-۳- روش مولد پیزوالکتریک



شکل (۳): نمودار خلاصه‌ی کاربردهای فراصوت



شکل (۴): دستگاه جوش پلاستیک فراصوت محصول شرکت فراصوت تجهیز ایرانیان (دانش بنیان)

عرصه دیگر به کارگیری فراصوت، زمینه زیست راکتور صوتی^۲ است که با استفاده از امواج صوتی، سودمندی سوخت و ساز میکروب‌ها، گیاهان و سلول‌های حیوانی را افزایش می‌دهد [۱۹]. زمینه‌های کاربردی دیگر برای فراصوت شامل حفاظت محیط زیست و روش‌های تکنولوژیک برای برآورده کردن تقاضای صنایع در مواردی مانند جلوگیری از آلودگی یا برطرف سازی آلودگی موجود، تصفیه آب و... می‌باشد [۲۰].

هرگاه دو وجه مقابل یک بلور مانند کوارتز تحت فشار مکانیکی قرار داده شود، بارهای الکتریکی مساوی و مخالف، در وجوه متقابل دیگر آن ظاهر می‌شود. این پدیده "اثر پیزوالکتریک" نام دارد. این پدیده به صورت معکوس هم رخ می‌دهد؛ یعنی هرگاه به دو وجه متقابل این بلور یک میدان الکتریکی اعمال کنیم، تغییراتی در ابعاد جفت وجوه متقابل دیگر ایجاد خواهد شد. این پدیده همان "اثر پیزوالکتریک معکوس" است. در این روش با اعمال باتری با توان بالا، نوسان ساز ولتاژ متناوبی با فرکانس بالایی برابر $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ با به صفحات منتقل می‌شود. در این حالت اثر پیزوالکتریک معکوس ظاهر شده و بلور متناوباً فشرده و باز می‌شود. در واقع لرزش مکانیکی اتفاق افتاده که فرکانس آن برابر است با:

$$f = \frac{P}{2L} \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (۲)$$

که در آن $P=1, 2, 3, \dots$ مدول یانگ بلور و ρ چگالی بلور است. در این حالت هم خازن متغیر به گونه ای تنظیم می‌شود که دو فرکانس فوق با هم مساوی شده و امکان تشدید فراهم گردد. بدین ترتیب بلور لرزنده امواج طولی فراصوت با دامنه‌ی بزرگتر تولید خواهد کرد. مزایای این روش عبارتند از: اول اینکه با این روش به فرکانس بالای ۵۰۰ مگاهرتز هم می‌توان رسید. دوم اینکه این سیستم از دما و رطوبت تاثیر نمی‌پذیرد. دو اشکال عمده این روش هزینه‌ی بالای تهیه بلور کوارتز پیزوالکتریک و برش و شکل‌دهی بسیار سخت کوارتز می‌باشد.

۴- کاربردهای فراصوت

برای پرتوهای فراصوت بسته به فرکانس و دامنه آنها کاربردهای زیاد و متنوعی در جامعه پزشکی، نظامی و صنعت می‌توان برشمرد. شکل (۳) به طور خلاصه برخی کاربردها را نشان می‌دهد. در کاربردهای صنعتی، فراصوت کم توان با فرکانس بالا برای تست و اندازه گیری مواد و آشکارسازی شکاف، شکستگی و حرکت قطعات و... به کار می‌رود. فراصوت توان بالا (فرکانس پایین تر و توان بیشتر) برای پاک کردن، جوش پلاستیک^۱ (شکل ۴) و فلزات، برش و فرم دهی، جدا سازی، ترکیب به کار می‌رود [۱۳-۱۲]. تصویربرداری صنعتی برای تشخیص عیوب قطعات نیز از دیگر کاربردهای فراصوت در صنعت است [۱۴].

در صنعت غذا، تکنولوژی فراصوت در پردازش، سردکردن، نگهداری تولیدات غذایی به کار می‌رود، چون روشی کارا و بدون آلودگی است. همچنین به عنوان روشی برای فرآیند گرمایی در حذف میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها بدون مواد مغذی در غذاها می‌باشد [۱۵]. همچنین هموژنیزاسیون، خشک کردن میوه، تشخیص رسیدگی میوه‌ها، تاثیرگذاری روی فعالیت برخی آنزیم‌ها، تولید نانومولسیون‌های غذایی، استخراج روغن های گیاهی، کیفیت سنجی میوه‌ها و سایر مواد غذایی، تعیین ترکیب‌های مواد غذایی و اندازه ذرات، بهبود کیفیت فرآورده‌های سوخاری را می‌توان نام برد [۱۸-۱۶].

² Sono bioreactor

¹ Ultrasonic Welding

مزایای اصلی فراصوت تشخیص در پزشکی، تشخیص بلادرنگ، عدم وجود تشعشع، قیمت پایین و قابل حمل بودن آن است. به علاوه روشی ایمن و موفق در نمونه برداری، آسپیراسیون سوزنی ظریف در بافت‌های اصلی مانند ریه، کلیه، کبد و گره‌های لنفاوی می‌باشد [۲۱]. از جمله می‌توان به تصویربرداری پزشکی یعنی سونوگرافی اشاره نمود [۲۲]. در دهه‌های اخیر رشد شگفت‌انگیزی در استفاده از تصاویر پزشکی، به عنوان ابزار تشخیصی در پزشکی است که منجر به تولید تجهیزات تشخیصی قوی و پیچیده با بهبود رزولوشن و کیفیت تصویر شده است [۲۳]. از فراصوت تشخیصی می‌توان برای ارزیابی بافت‌های عضلانی نرمال و بیمار استفاده نمود. برای مواردی مانند رگبهرگ شدن، کشیدگی و پارگی عضلات کاربردی است [۲۴]. شکل (۵) موارد کاربرد در سونوگرافی، ابزار جراحی و درمان تومور را نشان می‌دهد. ضمناً همزمان با کاربرد پزشکی فراصوت در پزشکی، به عنوان یک روش درمانی که در آن انرژی در بافت انتقال داده می‌شود تا اثرات مختلف بیولوژیکی را ایجاد کند - برای مثال در جراحی [۲۶] - مطرح بوده و هست. از بین بردن بافت‌های سرطانی از دیگر کاربردهای درمانی است [۲۷]. جراحی‌ها به دو نوع تهاجمی و غیر تهاجمی تقسیم می‌شوند؛ کاربردهای غیرتهاجمی مانند تصویربرداری و درمان سرطان و کاربردهای تهاجمی مانند چاقوی جراحی فراصوت در عمل‌های باز می‌باشد [۲۵]. ثابت شده که به امواج فراصوت کمک کننده به رشد استخوان هستند [۲۸].

فراصوت نفوذ عمیقی در بافت‌های نرم دارد و جهت به وجود آوردن گرمای عمقی در بافت‌های نرم بدن همچون عضلات و تاندون‌ها و لیگامان‌ها^۱ کاربرد دارد. دستگاه فراصوت یکی از مهمترین دستگاه‌های فیزیوتراپی در کاهش التهاب و کلاژن سازی است. از کاربردهای درمانی این امواج فراصوت می‌توان به ارسال امواج برای خرد کردن سنگ‌های داخل کلیه و داغ کردن و از بین بردن بافت‌های بیمار اشاره کرد [۳۰-۲۹]. در دندانپزشکی، ارتعاشات صوتی با فرکانس بالا برای فرو ریختن و از بین بردن جرم دندان و پلاک در پاکسازی دندان به کار می‌رود [۲۸]. از کاربردهای جالب فراصوت استفاده در عصای ناینبایان برای راهنمایی آنها می‌باشد [۳۱]. گندزدایی آب نیز توسط فراصوت انجام شده است. اثر حرارتی امواج فراصوت موجب آسیب به کلنی باکتری‌ها می‌شود و این خاصیت می‌تواند از آن برای گندزدایی آب استفاده شود. [۳۳-۳۲]. همچنین شواهدی در مورد تأثیر امواج فراصوت بر افزایش نرخ رشد گیاهان ارائه شده است [۳۴]. شکل (۶) عصای سفید طراحی شده توسط دانشجویان دانشگاه Texas A&M را نشان می‌دهد. یکی از کاربردهای خاص فراصوت، دستگاه دفع آفات با کمک فراصوت است. امواج فراصوت تأثیرات آزاردهنده‌ای بر برخی جانوران مانند موش و یا دیگر جوندگان و همچنین حشرات دارد به نحوی که می‌تواند باعث ترک محل از جانب آنها شود. بر این اساس دستگاه‌های دفع آفات با

کمک فراصوت ساخته شده است. یکی دستگاه‌های فراصوت دفع آفات در دو مدل ساخته می‌شوند. نوعی که به پریز برق متصل می‌شوند و نوعی که رومیزی است. مدل اول به خاطر محدودیت فضایی، در پوشش ندادن کل فضا کارآمدی کمتری دارد. مدل رومیزی آن چون قابلیت جابجایی و تنظیم با وسایل و محیط را دارد، از این نظر موفق‌تر عمل می‌کند. این دستگاه‌ها در ایران با رویکرد دفع حشرات و در آمریکا با رویکرد دفع جوندگان به بازار عرضه شده است. ولی ظاهراً هیچکدام کارایی واقعی را ندارند.

در سایت‌های فروش کالاها به صورت غیرحضوری (اینترنتی) انواع نظرات کاربران ناراضی و علت عدم رضایت آنها را می‌توان دید. اغلب این گلایه‌ها با این پاسخ فروشندگان مواجه است: گذشت زمان برای ظاهرشدن اثر امواج نیاز است و وجود نقاط کور و لزوم تعبیه چند دستگاه برای پوشش تمامی فضا. البته هیچ گسیلنده‌ای کل فضا را پوشش نمی‌دهد. چون امواج را به صورت مخروطی ۱۲۰ درجه در فضا می‌تاباند. علاوه بر آن این امواج، مشابه نور، در پشت اشیاء سایه ایجاد می‌کند. یعنی در پشت اشیاء موجود در محیط با نقاط کور سیستم دفع آفات مواجه هستیم. در نظریه دیگر علت ناکارآمدی این سیستم، عادی شدن وجود این امواج در محیط برای آفات جانوری فرض می‌شود. یعنی حتی در حضور امواج هم آفات جولان می‌دهند. چون توانسته‌اند به امواج عادت کنند. صداهای بلند و صداهای فراصوتی که حیوانات موزی قادر به شنیدن آن هستند، موجب به وحشت انداختن آنها برای چند دقیقه و بعضاً تا چند هفته می‌شود. از سوی دیگر برخی از این دفع‌کننده‌ها برای یک آفت خاص طراحی شده‌اند که این فرکانس منحصر به فرد بعد از مدتی موجب سازگاری موجود با آن فرکانس می‌شود؛ بنابراین می‌بایست از تجهیزاتی استفاده نمود که به صورت کاملاً خودکار فرکانس خروجی را تغییر داده و موجب دفع موش‌ها، جوندگان، حشرات و سایر آفات گردد [۳۵]. بر اساس هر کدام از نظریات فوق سیستمی طراحی شده است تا مشکل را حل کند [۳۶]. شکل (۷) دو نمونه از حشره کش‌ها را نشان می‌دهد.

۵- اثرات بیولوژیکی امواج فراصوت

امواج فراصوت قابلیت جذب در محیط و بافت‌های گیاهی، جانوری و انسانی را دارند و بر این اساس تأثیراتی را بر این بافت‌های زنده می‌گذارند. فراصوت اثرات بیولوژیکی را از طریق دو برهمکنش با بافت‌ها تولید می‌کند: گرمایی و حفره زایی. امواج فراصوت به کار رفته در تصویر برداری پزشکی بین ۱ مگاهرتز تا ۲۰ مگاهرتز هستند. امواج صوتی فرکانس پایین نسبت به فرکانس‌های بالاتر به صورت عمیق‌تر در بافت‌ها نفوذ می‌کنند. اثرات بیولوژیکی امواج فراصوت مستقیماً با شدت و توان صوت مرتبط است [۳۷]. در سال ۱۹۹۲ کنفرانسی در آمریکا برگزار گردید که در آن دو نوع شاخص استاندارد خطر حاصل از امواج فراصوت

^۱ رباط یا لیگامان - گروهی از بافت‌های فیبر مانند هستند که در محل مفاصل، استخوانی را به استخوان دیگر متصل می‌کنند.



در هنگام انتشار امواج فراصوت و برخورد آن با موادی مانند بافت‌های بدن با توجه به حرکت موج در بافت موجودات زنده که محیطی تلفاتی است دامنه آن کاهش می‌یابد که دلیل آن جذب موج در بافت‌ها یا پراکندگی^۱ آن است. جذب امواج فراصوتی در ساختارهای بیولوژیکی تبدیل به انرژی گرمایی می‌شود و بنابراین دمای بافت افزایش می‌یابد. اگر گرمای تولید شده در بافت با "Q"، شدت میدان فراصوت با "I" نشان داده شود ارتباط بین آنها به صورت زیر است:

$$Q = \alpha * I \quad (3)$$

که α ضریب جذب و وابسته به نوع ماده و بافت است. برای مثال α برای خون ۰/۱۵، برای قلب ۰/۵۲، برای کلیه ۱، برای استخوان ۱۵ و برای ریه ۴۰ می‌باشد. طبق (۳)، با افزایش شدت دامنه موج فراصوت میزان جذب گرمایی بیشتر می‌شود. گرمای ایجاد شده به طور خطی با جذب محیط افزایش می‌یابد. به طور کلی، غلظت پروتئین، میزان جذب فراصوت را افزایش می‌دهد. بنابراین بافت‌های با کلژن بالاتر، انرژی بیشتری را جذب می‌کنند [۴۰-۴۱]. به علاوه α تابع فرکانس "f" انرژی فراصوت است و از (۴) تعریف می‌شود:

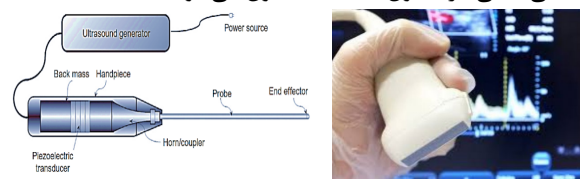
$$\alpha = af^b \quad (3)$$

که در آن a و b ثوابت ویژه بافت هستند
برای اثرات بیولوژیکی فراصوت تحقیقات گوناگون با شرایط مختلف انجام شده است. در ادامه به برخی اثرات موجود در تحقیقات اشاره می‌شود. یکی از تحقیقات بیانگر این است که فراصوت می‌تواند باعث ایجاد گونه‌های اکسیژن فعال شده و منجر به مرگ سلول شود [۴۲]. جوامع ملی و بین‌المللی در مورد استفاده از فراصوت در پزشکی زنان به خصوص در مورد احتمال اثرات گرمایی اخطار می‌دهند [۴۳]. مغز انسان ضریب گونه‌های اکسیژن فعال شده و منجر به مرگ سلول شود [۴۲]. جوامع ملی و بین‌المللی در مورد استفاده از فراصوت در پزشکی زنان به خصوص در مورد احتمال اثرات گرمایی اخطار می‌دهند [۴۳]. مغز انسان ضریب نفوذ کمی دارد. با این حال دمای مجامه حین پرتوگیری از فراصوت بالا می‌رود، دمای مغز در مجاورت مجامه از طریق مکانیزم رسانش افزایش می‌یابد. این پدیده در جنین به خصوص وقتی از فراصوت داپلر استفاده می‌شود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴۴]. همچنین ممکن است فراصوت موقتاً یادآوری شنیداری را محدود کند. آسیب به میلین-ها^۲ و آسیب‌های عصبی نیز می‌تواند ایجاد شود. اثر روی ریه، چشم، قلب و ماهیچه‌های بدن نیز گزارش شده است [۴۰]. امواج فراصوتی ناشی از سونوگرافی‌های مکرر در دوران بارداری، بر روی نوزادان تازه متولد شده و سپس کودکان، لازم است که بررسی‌های خیلی دقیق و بیشتری شدت امواج فراصوت سونوگرافی مورد مطالعه قرار گیرد.

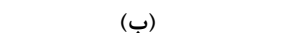
۶- نتیجه

در این مقاله امواج فراصوت و ویژگی‌ها و مشخصات آن بیان گردید. کاربردهای متنوع و مختلفی برای فراصوت وجود دارد که به تفصیل

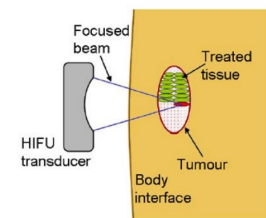
تعریف شد: ۱- شاخص گرمایی و ۲- شاخص مکانیکی [۳۸]. سازمان غذا و دارو آمریکا نیز خطوط راهنمایی برای استفاده از امواج فراصوت قابل قبول تهیه کردند [۳۹-۴۰]. در تحقیقات نشان داده شده که در انسان‌ها تماس با امواج فراصوت بر روی الگوی خواب تأثیر می‌گذارند و همچنین تغییرات تعادل الکترولیتی در بافت عصبی می‌شود. امواج با فرکانس‌های ۲۰ کیلوهرتز و با شدت ۱۴۰ تا ۱۵۰ دسیبل باعث تولید حرارت در سطح پوست و نیز ایجاد شکاف‌هایی بر سطح پوست می‌شوند. این امواج در انسان‌ها باعث تغییراتی در آستانه شنوایی شده و از لحاظ ذهنی، درد و رنج و خستگی غیرمعمول می‌شود و همچنین موجب ضایعاتی بافتی در گلبول‌های سفید خون می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵): الف- دستگاه سونوگرافی، ب- ابزار جراحی فراصوت، ج- نمایش درمان فراصوت شدت بالا بر روی یک تومور [۲۵].



شکل (۶): نمونه‌ای از عصای سفید که با فراصوت کار می‌کند (اختراع شده توسط دانشجویان دانشگاه Texas A&M)



شکل (۷): دستگاه دفع حشرات پریزی و رومیزی

- [9] CMI Quarato, D. Lacedonia, M. Salvemini, G. Tuccari, G. Mastrodonato, R. Villani, L.A. Fiore, G. Scioscia, A. Mirijello, A. Saponara, et al. "A Review on Biological Effects of Ultrasounds: Key Messages for Clinicians", *Diagnostics*. 2023; 13(5):855. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050855>.
- [10] Ali, "Local Sound Speed Estimation for Pulse-Echo Ultrasound in Layered Media," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 69, no. 2, pp. 500–511, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/tuffc.2021.3124479>.
- [11] D.B.Moyano, D.A. Paraiso, R.A. González-Lezcano, "Possible Effects on Health of Ultrasound Exposure, Risk Factors in the Work Environment and Occupational Safety Review". *Healthcare (Basel)*. 2022 Feb 24;10(3):423. doi: <https://doi.org/10.3390/healthcare10030423>.
- [۱۲] جعفری، مهدی، رودباری، ساره و جعفری، کبری، امواج فراصوت و تأثیر آن بر روی انسان و اثرات بیولوژیکی آن بر روی حیوانات، گیاهان و محیط، اولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی بهداشت محیط، سلامت و محیط زیست پایدار، همدان، ۱۳۹۴. <https://civilica.com/doc/440579/>.
- [13] F. Ahmad, Z.H. Mohammad, S. Zaidi and S. A Ibrahim, "A comprehensive review on the application of ultrasound for the preservation of fruits and vegetables", *Journal of food process engineering*, vol. 46, no. 6, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14291>.
- [14] C. Wiernicki, W.J. Karoly, "Ultrasound: Biological Effects and Industrial Hygiene Concerns", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 2010, 46, 488–496.
- [15] F. Villegas, "Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites", *Frontiers in Materials*, vol. 6, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00291>.
- [۱۶] طوسی‌ساندیز، حیدر، تصویربرداری از بتن با استفاده از امواج فراصوت و آلگوریتم SAFT با بکارگیری موجک، دومین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر، تهران
- [17] M. Gallo, L. Ferrara, D. Naviglio, "Application of Ultrasound in Food Science and Technology: A Perspective". *Foods* 2018, 7, 164. doi: <https://doi.org/10.3390/foods7100164>.
- [۱۸] فرقانی، معین الدین. بررسی عملکرد فناوری امواج فراصوت و کاربرد آن در صنایع غذایی، کنفرانس ملی دستاوردهای فن آوران علوم و صنایع غذایی ایران. SID. <https://sid.ir/paper/824244/fa>.
- [۱۹] یوسف زاده ثانی سپیده، مرتضوی سید علی، شیخ الاسلامی زهرا، کریمی مهدی، الهامی‌راد امیر حسین، ۱۳۹۶، کاربرد های امواج فراصوت در صنایع غذایی و نقش آن در بهبود کیفیت فرآورده های سوخاری، "مجله علمی صوت و ارتعاش، دوره ۱۲، صص ۱۰۵-۱۱۹، ۱۳۹۴.
- [۲۰] تاج الدین، بهجت، رفیعی، زهرا، استفاده از امواج فراصوتی در خشک کردن مواد غذایی (مطالعه موردی تولید چیپس سیب، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش، دوره ۷، شماره ۱۴، ۹۷-۹۰، ۱۳۹۷.
- [21] Y. Chisti, "Sonobioreactors: using ultrasound for enhanced microbial productivity," *Trends in Biotechnology*, vol. 21, no. 2, pp. 89–93, Feb. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/s0167-7799\(02\)00033-1](https://doi.org/10.1016/s0167-7799(02)00033-1).
- [22] T.D. Pham, R.A. Shrestha, J. Virkutyte, M. Sillanpää, "Recent studies in environmental applications of ultrasoundA paper", submitted to the *Journal of Environmental Engineering and Science*. *Can. J. Civ. Eng.* 2009, 36, 1849–1858. <https://doi.org/10.1139/L09-068>.
- [23] M.L. Oelze, "Quantitative ultrasound successes: Past, present and future", In Byram BC, Ruitter NV, editors, *Medical Imaging 2020: Ultrasonic Imaging and*
- معرفی شدند. تاکنون، مطالعات زیادی روی اثرات بیولوژیکی امواج بر روی بدن انسان انجام شده است. امواج فراصوت هم به عنوان یک بخش از طیف امواج مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات اثرات خیلی سوء در حوزه کاربردهای پزشکی را گزارش نکرده‌اند، بنابراین این مسأله موجب شده فراصوت به عنوان یک روش تشخیص پزشکی کم خطر مورد استفاده قرار گیرد [۴۵-۴۶]. اعلام کرده‌اند که مقادیر توان صوتی رایج استفاده شده در فراصوت تشخیصی ایمن هستند. در حال حاضر داده‌های تجربی کافی برای احتمال خطر پرتوگیری در استفاده از ادوات فراصوت بطور واضح ارائه نشده است، اما مطالعات روی اعضای بدن، سطوح سلولی و مولکولی انجام شده است که نشان دهنده احتمال خطر بیولوژیکی فراصوت روی بدن انسان و به طور کلی موجودات زنده را اثبات می‌کند. در کاربردهای حساس فراصوت مانند حشره کش‌ها و دستگاه دفع آفات جانوری با کمک فراصوت چند نکته قابل توجه و تأمل است: قطعاً دستگاه‌های موجود در بازار کارآمد نیستند، سیستم حشره کش مبتنی بر فرکانس متغیر به علت سودجستن از کریستال و نیز قطعات الکترونیکی ویژه دارای قیمت تمام شده ی بالایی خواهد بود لذا در طراحی‌ها باید مد نظر قرار گیرد. در هر حال باید دقت داشت که به خصوص با توجه به اینکه استفاده از این سیستم در هر محیطی مثل منزل یا محیط کار به معنای آن است که تمام مدت و یا حداقل برای ساعاتی طولانی در طول روز افراد در معرض تابش امواج فراصوت قرار می‌گیرند. لازم است امکان هر گونه خطر و آسیب برای اقشار و سنین مختلف، با تأمل بیشتری بررسی گردد. همچنین نتایج تحقیقات انجام شده بر روی اثر امواج فراصوتی ناشی از سونوگرافی‌های مکرر در دوران بارداری، بر روی نوزادان تازه متولد شده و سپس کودکان، لازم است که بررسی‌های خیلی دقیق و بیشتری شدت امواج فراصوت سونوگرافی مورد مطالعه قرار گیرد.

مراجع

- [1] M. Wereski, "The Threshold of Hearing", *The STEAM Journal*: Vol. 2: Iss. 1, Article 20, 2003.
- [2] <https://doi.org/10.5642/steam.20150201.20>.
- [۳] سیستم فراصوت چیست؟، ۱۳۹۸، برگرفته از سایت <https://www.irandh.ir/>
- [4] K.A. Kaproth-Joslin, R. Nicola and V. S. Dogra, "The History of US: From Bats and Boats to the Bedside and Beyond:RSNA Centennial Article". *RadioGraphics*, vol. 35, no. 3, pp. 960–970, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1148/rg.2015140300>.
- [5] R. Galambos and D. R. Griffin, "Obstacle avoidance by flying bats: The cries of bats" *Journal of Experimental Zoology*, vol. 89, no. 3, pp. 475–490, Apr. 1942, <https://doi.org/10.1002/jez.1400890308>.
- [6] A. van Dalen, "The Use of Ultrasounds in Military Traumatology". *Central Military Hospital & University Hospital Utrecht*, 1996.
- [7] A. van Dalen, "The Use of Ultrasounds in Military Traumatology". *Central Military Hospital & University Hospital Utrecht*, 1996.
- [8] P. G. Newman and G.S. Rozycki, "The History of Ultrasound," *Surgical Clinics of North America*, vol. 78, no. 2, pp. 179–195, Apr. 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/s0039-6109\(05\)70308-x](https://doi.org/10.1016/s0039-6109(05)70308-x).



- [۳۵] فخمی حور، فریبا، زارع، ناصر، اصغری، رسول، مهدی‌زاده، محمد و فیروزی، بهنام. تأثیر امواج فراصوت، دما، نور، کیتوسان و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی بر کالوسزایی زعفران (*Crocus sativus*) (L. زراعت و فناوری زعفران، ۳۷۵-۳۶۱، ۱۳۹۹). Doi: 10.22048/jsat.2020.215454.1376
- [36] M.I. Simeon, A.S. Mohammed and S.E Adebayo, "Development and preliminary testing of an electronic pest repeller with automatic frequency variation", *International Journal of Plasma*, 2013.
- [37] K. Nithiyananthan, N Pratap, P. Dhinakar, "Design and Development of Variable Frequency Ultrasonic Pest Repeller", *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2017, 12(1):22-34.
- [38] Kelsey C.A., Ph.H. Heintz, D.J. Sandoval, G. D. Chambers, N.L. Adolphi, K. S. Paffett, "Biological Effects of Ultrasound", 2014, *Radiation Biology of Medical Imaging*, 269-280. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118517154.ch16>.
- [39] AIUM/NEMA. Standard for Real-Time Display of Thermal and Mechanical Acoustic Output Indices on Diagnostic Ultrasound Equipment. American Institute of Ultrasound in Medicine and the National Electrical Manufacturers Association; Rockville, MD, USA: 2009.
- [40] CMI. Quarato, D. Lacedonia, M. Salvemini, G. Tuccari, G. Mastrodonato, R. Villani, L.A. Fiore, G. Scioscia, A. Mirijello, A. Saponara, et al. "A Review on Biological Effects of Ultrasounds: Key Messages for Clinicians". *Diagnostics*. 2023; 13(5):855. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050855>.
- [41] G. Basta, L. Venneri, G. Lazzerini, E. Pasanisi, M. Pianelli, N. Vesentini, S. Del Turco, C. Kusmic, E. Picano. "In vitro modulation of intracellular oxidative stress of endothelial cells by diagnostic cardiac ultrasound". *Cardiovasc. Res.* 2003, 58, 156-161. 10.1016/s0008-6363(02)00665-x
- [42] E. Vyskocil, S. Pfaffenberger, C. Kollmann, A. Gleiss, G. Nawratil, S. Kastl, E. Unger, K. Aumayr, O. Schuhfried, K. Huber, J. Wojta, M. Gottsauner-Wolf, "Thermal effects of diagnostic ultrasound in an anthropomorphic skull model", *Ultraschall Med.* 2012 Dec;33(7):E313-E320. doi: 10.1055/s-0032-1312924.
- [43] C. Kollmann, K.V. Jenderka, Moran, C.M. Draghi, Jimenez Diaz F., R. Sande, "EFSUMB Clinical Safety Statement for Diagnostic Ultrasound-(2019 revision)". *Ultraschall. Med.* 2020, 41, 387-389. DOI: 10.1055/a-1010-6018
- [44] AIUM. How to Interpret the Ultrasound Output Display Standard for Diagnostic Ultrasound Devices: Version 3. J. *Ultrasound Med.* 2019, 38, 3101-3105.
- Tomography, SPIE. 2020. 113190X. (Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE). doi: 10.1117/12.2557150.
- [۲۴] عزیزیان غلامرضا، سرکار سعید، ابوالحسنی محمدجواد، ایجاد تصویر سه بعدی با استفاده از سیستم های فراصوت دو بعدی معمولی. مجله پزشکی بالینی ابن سینا. ۹ (۲)، ۱۳۸۱.
- [25] S.B. Barnett, G.R. Ter Haar, M.C. Ziskin, H.D. Rott, F.A. Duck, K. Maeda, "International recommendations and guidelines for the safe use of diagnostic ultrasound in medicine". *Ultrasound Med. Biol.* 2000, 26, 355-366. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(00\)00204-0](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(00)00204-0).
- [26] A. Guermazi, F.W. Roemer, P. Robinson, J.L. Tol, R.R. Regatte, M.D. Crema, "Imaging of muscle injuries in sports medicine: Sports imaging series". *Radiology*, 2017. DOI: 10.1148/radiol.2017160267.
- [۲۷] عابدینی، رضوان، جهرمی، محمدصابر، مروری بر کاربردهای نوین فناوری فراصوت توان بالا در جراحی پزشکی، نشریه علمی صوت و ارتعاش / سالدوم / شماره بیستم / صفحات ۱۵۷-۱۷۳، ۱۴۰۰.
- [۲۸] علیان نژادی، مریم، و فائز، معصومه، درمان سرطان با امواج فراصوت متمرکز با شدت بالا (HIFU). علوم پزشکی رازی (مجله دانشگاه علوم پزشکی ایران)، ۲۴ (۱۶۲)، ۴۰-۵۳، ۱۳۹۶.
- [۲۹] حیدرنژاد اصل، مهران، بررسی تأثیر امواج فراصوت بر روند استخوان سازی، اولین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در علوم برق و کامپیوتر و علوم پزشکی، ۱۳۹۸.
- [۳۰] رقیب دوست، سینا و حاجی محمد باقر، سمانه، کاربردهای Ultrasound در پزشکی و صنایع، اولین کنفرانس بین المللی یافته های نوین در علوم پزشکی و بهداشت با رویکرد ارتقای سلامت، ایران، قزوین، ۱۴۰۱.
- [۳۱] مقیم نژاد سرحمامی، مهدی و شهیدیان، آزاده، کاربرد امواج فراصوتی در درمان سنگ کلیه. مجله مهندسی مکانیک ۵۶-۴۹ (۲)، ۲۷، ۱۳۹۷.
- [32] D.L. Miller, N.B. Smith, M.R. Bailey, G.J. Czarnota, K. Hynynen, I.R.S. Makin, "Overview of Therapeutic Ultrasound Applications and Safety Considerations". *J. Ultrasound Med.* 2012. doi: 10.7863/jum.2012.31.4.623.
- [۳۳] زمانی بابگهری، میلاد، رضانی فرد، مهدی، زمانی بابگهری، مهدی، طراحی و ساخت عصای سفید هوشمند به منظور هدایت و راهنمایی نابینایان و کم بینایان، سومین کنفرانس ملی دستاوردهای نوین در برق و کامپیوتر و صنایع، ۱۳۹۶.
- [۳۴] فائز، معصومه و حمیدی اصفهانی، زهره، ضد عفونی کردن آب و پساب با فراصوت، دومین کنگره بین المللی و بیست و پنجمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران، ساری، ۱۳۹۷.



Islamic Azad University , Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcdsa



Numerical analysis of midinfrared dual-side polished and double elliptical cut PCF-based SPR sensor for broad-range refractive index sensing applications

Seyed Hossein Moayed¹ , Mojtaba Sadeghi^{2*} , Zahra Adelpour³

¹ Department of Electrical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran
moayyed.electronic@gmail.com

² Department of Electrical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran
mojtaba.sadeghi@iau.ac.ir

³ Department of Electrical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran
zahra.adelpour@iau.ac.ir

Abstract: In this paper, a surface plasmon resonance nanosensor based on photonic crystal fiber is introduced, which is capable of detecting high refractive indices and at the same time has appropriate sensitivity. The proposed structure consists of an air hole ring and a hole ring made of gold and TiN. In order to increase the sensitivity and efficiency of the sensor, two elliptic-shaped grooves are created at the top and bottom of the structure and a thin layer of gold is placed on them. Also, the two sides of the structure are polished and a thin layer of ITO is placed on them. The combination of these materials and the designed geometry has caused the phase matching conditions to be established properly and to detect the desired refractive indices of the analyte. The finite element method has been used for numerical simulation, mode analysis, and investigation of the surface plasmon resonance characteristics of the photonic crystal fiber sensor. Numerical results show that the sensor has a very good wavelength sensitivity of 6000 nm/RIU, a resolution of 1.6×10^{-5} RIU, and a range sensitivity of 572 RIU⁻¹. The detectable refractive index range of the sensor is between 1.4 to 1.6, which is a high value. Based on the results obtained, the proposed sensor is an excellent option for medical and chemical diagnostic applications.

Keywords: nanosensor, photonic crystal fiber, surface plasmon resonance, finite element method.

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025

Received: 2025-03-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-05-06

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-06-21

CITATION

Moayed, S.H., et. al., "Numerical analysis of midinfrared dual-side polished and double elliptical cut PCF-based SPR sensor for broad-range refractive index sensing applications", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 32-43, 2025.
DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

The field of optical sensing has witnessed remarkable advancements in recent years, driven by the increasing demand for high-sensitivity, real-time, and label-free detection systems. Among the various optical sensing techniques, surface plasmon resonance (SPR)-based sensors have emerged as a powerful tool for refractive index (RI) sensing due to their exceptional sensitivity and ability to detect minute changes in the surrounding medium. SPR sensors leverage the excitation of surface plasmons—collective oscillations of free electrons at the interface between a metal and a dielectric—to achieve highly sensitive detection of analytes. The mid-infrared (mid-IR) region, spanning wavelengths from 2.5 to 25 μm , has garnered significant attention for SPR sensing applications due to its unique advantages, including deeper penetration depths, reduced scattering losses, and the presence of characteristic molecular absorption bands, which enable enhanced specificity in chemical and biological sensing. Photonic crystal fibers (PCFs) have revolutionized the design of SPR sensors by offering unparalleled flexibility in tailoring optical properties such as birefringence, dispersion, and mode confinement. The integration of SPR with PCFs has led to the development of compact, highly sensitive, and versatile sensing platforms. In particular, elliptical structures have gained prominence due to their ability to facilitate efficient coupling between the core-guided mode and the surface plasmon mode, thereby enhancing sensor performance. Additionally, the incorporation of dual-side polished in PCF designs has been shown to improve sensitivity and broaden the operational range of SPR sensors by optimizing the overlap between the evanescent field and the analyte. This paper presents a novel mid-IR dual-side polished and double elliptical cut PCF-based SPR sensor designed for broad-range refractive index sensing applications. The proposed sensor architecture leverages the unique properties of mid-IR light and the advanced structural features of PCFs to achieve high sensitivity and a wide detection range. The dual-side polishing technique ensures efficient light-matter interaction, while the double elliptical cut design enhances the sensor's ability to detect variations in the refractive index of the surrounding medium. By operating in the mid-IR region, the sensor capitalizes on the inherent advantages of this spectral range, including reduced background noise and enhanced molecular specificity. The primary objective of this study is to demonstrate the feasibility of the proposed sensor for broad-range RI sensing, with potential applications in environmental monitoring, biomedical diagnostics, and chemical analysis. Through numerical simulations and theoretical analysis, we evaluate the sensor's performance metrics, including sensitivity, resolution, and detection

range. The results highlight the potential of the proposed design to address the limitations of conventional SPR sensors and pave the way for the development of next-generation optical sensing platforms. This work contributes to the growing body of research on mid-IR SPR sensors and underscores the importance of innovative PCF designs in advancing the field of optical sensing.

2- Methodology

The proposed structure consists of two hexagonal rings, the outer ring containing a series of air holes and the inner ring containing four holes made of TiN and two holes made of gold. Also, in order to increase the efficiency of the sensor, two grooves coated with a thin layer of gold are created at the top and bottom of the structure. The two sides of the structure are polished and a thin layer of ITO is placed on them. The finite element method (FEM) has been used for numerical simulation, mode analysis, and investigation of the surface plasmon resonance characteristics of the photonic crystal fiber nano-sensor.

3- Results and discussion

In this study, we have investigated the effect of changing the structural parameters on the confinement loss step by step and have obtained the optimal values of the parameters according to the confinement loss. Numerical results show that the sensor has a very good wavelength sensitivity of 6000 nm/RIU, a resolution of 1.6×10^{-5} RIU, and a range sensitivity of 572 RIU^{-1} . The detectable refractive index range of the sensor is between 1.4 to 1.6, which is a broad range.

4- Conclusion

In this research, we present a refractive index sensor whose performance is enhanced by incorporating gold and TiN cavities, as well as two slits with thin gold layers, along with dual-side polishing of the structure and the deposition of an ITO layer. The primary advantage of our proposed sensor is its ability to detect a wide range of refractive indices (1.4 to 1.6) with suitable sensitivity. Another advantage of this sensor is its operation in the mid-infrared (MIR) wavelength range, which enhances its efficiency. To achieve an optimal and suitable structure, we systematically examined the key parameters of the design and analyzed the effects of their variations on the sensor's performance. Based on the calculated results, our proposed structure exhibits a high sensitivity of 6000 nm/RIU, a maximum figure of merit (FOM) of 67 RIU^{-1} , a resolution of 1.6×10^{-5} RIU, and an amplitude sensitivity of 572 RIU^{-1} . Given these parameters, our proposed sensor is highly suitable for diagnostic applications involving high-refractive-index chemical substances, such as industrial oils and petroleum products, as well as medical applications.





تجزیه و تحلیل عددی سنسور مادون قرمز تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر بلور فوتونی با برش طرفین و شکاف بیضوی برای تشخیص محدوده وسیع ضریب شکست

سید حسین مؤید^۱، مجتبی صادقی^۲، زهرا عادل پور^۳

۱- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (moayyed.electronic@gmail.com)

۲- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (mojtaba.adeghi@iau.ac.ir)

۳- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (zahra.adelpour@iau.ac.ir)

چکیده: در این مقاله یک نانوسنور تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر بلور فوتونی معرفی شده که قادر می باشد ضرایب شکست بالا را نیز تشخیص دهد و در عین حال دارای حساسیت مناسب باشد. ساختار پیشنهادی شامل یک حلقه حفره های هوا و یک حلقه حفره از جنس طلا و TiN می باشد. به منظور افزایش حساسیت و کارایی نانوسنور، دو شکاف بیضی شکل در بالا و پایین ساختار ایجاد شده و لایه نازکی از طلا بر روی آنها قرار گرفته است. همچنین دو طرف ساختار برش داده شده و لایه نازکی از ITO بر روی آنها قرار گرفته است. مجموعه این مواد و هندسه طراحی شده باعث شده است که شرایط تطبیق فاز به نحو مناسبی برقرار شده و ضرایب شکست دلخواه ماده آنالیت را تشخیص دهد. روش اجزای محدود به منظور شبیه سازی عددی، تجزیه و تحلیل مودی و بررسی ویژگی های تشدید پلاسمون سطحی نانوسنور فیبر بلور فوتونی استفاده شده است. نتایج عددی نشان می دهد که نانوسنور دارای حساسیت طول موج بسیار مناسب RIU / nm ۶۰۰۰، رزولوشن RIU $10^{-5} \times 1/6$ و حساسیت دامنه RIU^{-1} ۵۷۲ می باشد. محدوده ضریب شکست قابل تشخیص نانوسنور بین $1/4$ تا $1/6$ که مقدار بالایی است به دست آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده، سنسور پیشنهادی یک گزینه بسیار عالی برای کاربردهای تشخیص پزشکی و مواد شیمیایی می باشد.

واژه های کلیدی: نانوسنور، فیبر بلور فوتونی، تشدید پلاسمون سطحی، روش اجزای محدود.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

۱- مقدمه

خونی، تشخیص ویروس، تشخیص سلول های سرطانی در بدن انسان، آزمایش دارو، کنترل کیفیت غذا به منظور ایمنی، پایش محیط زیست، تشخیص مواد شیمیایی را دارند [۱۴-۱۶]. تشدید پلاسمون سطحی نوسان جمعی الکترون های آزاد در سطح مشترک فلز-دی الکتریک است که توسط فوتون های یک میدان نوری محو شده^۷ تحریک می شوند. این پدیده زمانی اتفاق می افتد که طول موج الکترون های آزاد و طول موج فوتون ها در سطح مشترک فلز-دی الکتریک با یکدیگر در حالت تشدید قرار بگیرند. با این حال، اثر پلاسمونیک به برهمکنش بین الکترون های آزاد و فوتون های میدان نوری محو شونده در سطح مشترک فلز-دی الکتریک اشاره دارد. هسته PCF نسبت به روکش ضریب شکست

در دهه های اخیر، حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی^۲ مبتنی بر فیبر کریستال فوتونی^۳ (PCF-SPR) [۷-۱۱] به دلیل ویژگی های برجسته شان مانند پراکندگی قابل کنترل، شکست دوگانه^۴، تلفات کم، حساسیت بالا، وضوح بسیار خوب، زمان پاسخ سریع، تشخیص بدون برچسب^۵، پایش بلادرنگ^۶، انعطاف عملکرد، ساختار ساده و کوچک و پارامترهای ساختاری قابل تنظیم برای بسیاری از محققان جذاب بوده اند [۸-۱۳]. حسگرهای PCF-SPR پتانسیل استفاده در زمینه های مختلفی مثل تشخیص بایومولکولی، تشخیص پزشکی، تشخیص گروه

* نویسنده مسئول

² Surface plasmon resonance (SPR)

³ Photonic crystal fibers (PCF)

⁴ birefringence

⁵ label-free detection

⁶ real-time monitoring

⁷ evanescent optical field



بالتری دارد که اجازه می‌دهد مقدار کمی نور به داخل ناحیه روکش نفوذ کند. این نور با ماده پلاسمونیک در سطح مشترک فلز-دی الکتریک برهمکنش می‌کند، الکترون‌های آزاد را تحریک و موج پلاسمون سطحی^۱ (SPW) را ایجاد می‌کند [۱۷]. SPW ها بیشترین شدت را در نقاط عبور فلز-دی الکتریک نشان می‌دهند و با عمق لایه دی الکتریک تخلیه می‌شوند.

امواج پلاسمون سطحی بیشترین شدت را در نقاط تلاقی فلز-دی الکتریک دارا هستند و با افزایش عمق لایه دی الکتریک به تدریج کاهش می‌یابند. وقتی طول موج میدان محو شونده با طول موج امواج پلاسمون سطحی مطابقت پیدا کند، پدیده‌ای به نام تشدید پلاسمون سطحی (SPR) رخ می‌دهد [۱۸]. این پدیده همچنین به عنوان شرایط تشدید یا شرایط تطابق فاز شناخته می‌شود، و طول موجی که در آن این اتفاق می‌افتد، طول موج تشدید نامیده می‌شود. در برخی موارد، یک پیک در منحنی تشدید مشاهده می‌شود که ناشی از انتقال بالاترین انرژی فوتون از مود هسته^۲ به مود پلاسمون پلاریتون سطحی^۳ است. این پیک برای هر آنالیت، منحصر به فرد است و برای تشخیص حضور و غلظت آنالیت استفاده می‌شود [۱۹]. بنابراین، با اندازه‌گیری پیک منحنی تلفات و طول موج تشدید، می‌توان نوع آنالیت موجود و یا غلظت آن را تعیین کرد. سه نوع اصلی از حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی وجود دارد: حسگرهای مبتنی بر منشور^۴ [۲۰]، حسگرهای مبتنی بر خراشیدگی فیبر نوری^۵ [۲۱]، و حسگرهای مبتنی بر فیبر بلور فوتونی. حسگرهای مبتنی بر منشور حجیم هستند و اجزای آنها شامل یک لایه دی الکتریک، زیرلایه فیلم فلزی، مایع و ماده پلاسمونیک می‌شود. حسگرهای مبتنی بر خراشیدگی فیبر نوری، یک گزینه میانی هستند که حساسیت کمتری ارائه می‌دهند و منحنی تلفات پهن‌تری دارند و این موضوع شناسایی آنالیت‌های ناشناخته را دشوار می‌کند. در مقابل، حسگرهای PCF-SPR دارای منحنی تلفات تیز، عملکرد حسگری بسیار خوب، ابعاد کوچک و قابلیت ساخت آسان هستند.

یکی از پارامترهای مهم در عملکرد حسگرهای PCF-SPR نوع ماده پلاسمونیک و جنس ماده پس زمینه است. معمولاً سیلیکای ذوب‌شده^۶ به عنوان ماده زمینه انتخاب می‌شود، زیرا مقرون به صرفه است و به فرآیندهای ساخت پیچیده نیاز ندارد. مس، نقره و طلا شناخته‌ترین مواد پلاسمونیک هستند که در این میان، طلا به دلیل پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر اکسیداسیون در محیط‌های نامساعد و همچنین عملکرد حسگری پایدار و قابل اطمینان در طول زمان به ماده‌ای مطلوب برای حسگرهای پلاسمونیک تبدیل شده است. در مقابل، موادی مانند مس و نقره از نظر شیمیایی پایدار نیستند و به راحتی اکسید می‌شوند، که این امر منجر به کاهش عملکرد حسگری آن‌ها در طول زمان می‌شود. از طرفی فلزات معمولی دارای چالش‌های ساخت در ابعاد نانو می‌باشند.

سطحی که بصورت بسیار نازک پوشش داده شده باشد دارای مورفولوژی‌های متفاوتی نسبت به فلز حجیم است که بر پاسخ نوری تأثیر می‌گذارد. موضوع دیگر مرتبط با فلزات نجیب این است که این فلزات با فرآیند تولید سیلیکون استاندارد سازگار نیستند. اکسید رسانای شفاف^۷ (TCO) و فلز واسطه نیتريد^۸ (TMN) بهترین مواد پلاسمونیک هستند که خواص فلزی را نشان می‌دهند و ویژگی‌های منحصربه فردی برای تشکیل قطعات، ساخت گسترده، یکپارچه‌سازی و قابلیت تنظیم نوری دارند [۲۲]. دو نمونه از بهترین این مواد، TiN و ITO^۹ هستند. این مواد دارای ضریب شکست بالایی هستند که به محصور کردن کارآمد نور و هدایت آن در ساختار فیبر بلور فوتونی کمک می‌کند و در نتیجه باعث افزایش حساسیت سنسور می‌شود. از دیگر مزایای مواد فوق می‌توان به تلفات کم، پایداری شیمیایی و سازگاری با سیستم‌های بیولوژیکی اشاره نمود که باعث می‌شود برای کاربردهای زیست پزشکی که در آن تعامل بین سنسور و نمونه‌های بیولوژیکی ضروری است مناسب باشند.

دو رویکرد برای سیستم‌های حسگری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی وجود دارد: تشخیص داخلی [۲۳] و تشخیص خارجی [۲۴]. در سیستم‌های تشخیص داخلی، ماده پلاسمونیک بر روی دیواره خارجی حفره‌های هوایی پوشش‌دهی می‌شود و آنالیت به داخل این حفره‌های هوا تزریق می‌شود. با این حال، این رویکرد با چالش‌های متعددی مواجه است، از جمله تلفات انتشار بالا، پیچیدگی در تزریق آنالیت به حفره‌های هوای کوچک، و پیچیدگی ساخت در ایجاد پوشش‌های فلزی یکسان بر روی دیواره خارجی حفره‌های هوایی کوچک. در مقابل، سیستم‌های تشخیصی خارجی مزایای متعددی نسبت به سیستم‌های تشخیصی داخلی ارائه می‌دهند. در این روش، ماده آنالیت در خارج از ساختار فیبر بلور فوتونی قرار می‌گیرد و آنالیت‌ها به راحتی می‌توانند با استفاده از یک پمپ برنامه‌پذیر در آن جریان یابند. این روش چالش‌های سیستم‌های تشخیص داخلی، مانند تزریق آنالیت به سوراخ‌های هوای کوچک و پیچیدگی ساخت، را از بین می‌برد. در اکثر تحقیقات گزارش شده سنسورهای PCF-SPR، محدوده تشخیص برای اندازه‌گیری ضریب شکست عموماً محدود است و معمولاً کمتر از ۱/۵ می‌باشد، که این امر امکان تشخیص ضریب شکست بالا را فراهم نمی‌کند. با این حال، برخی از محلول‌ها دارای ضریب شکست نسبتاً بالایی هستند، مانند بنزن، نیتروبنزن و فنیل آمین. بنابراین، افزایش حد بالایی تشخیص ضریب شکست ضروری است. علاوه بر این، محدوده کاری این حسگرها عمدتاً در محدوده نور مرئی یا باند مخابراتی است.

سنسورهای NIR^{۱۱} و MIR^{۱۲} می‌توانند از آسیب‌های نوری و تغییر ساختار مواد بیولوژیکی جلوگیری کنند [۲۵، ۲۶]. در طیف MIR در برخی طول‌موج‌ها برهمکنش قوی‌ای بین نور و ماده وجود دارد، که این

⁷ transparent conducting oxide

⁸ transition metal nitride

⁹ Titanium Nitride

¹⁰ Indium tin oxide

¹¹ Near-infrared

¹² Mid-infrared

¹ Surface plasmon wave

² core mode

³ SPP mode

⁴ prism-based

⁵ fiber grating-based

⁶ Fused silica



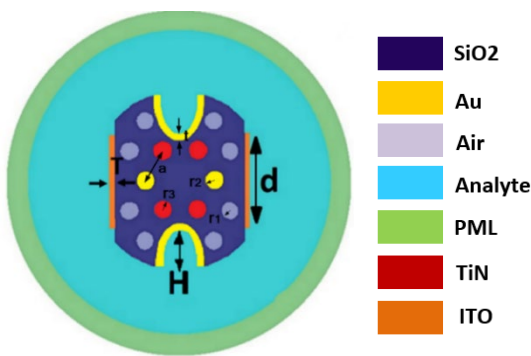
تشخیص آنالیت مورد نظر در محدوده مناسبی قرار گیرد. سپس اثر تغییرات پارامترهای هندسی بررسی و به طور جامع مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و در نهایت سنسوری که کارایی و حساسیت بالایی را در محدوده ضرایب شکست مورد نظر ارائه می‌دهد به عنوان ساختار بهینه معرفی می‌شود.

پس زمینه ساختار از جنس سیلیکا می‌باشد. ضریب شکست سیلیکا با استفاده از معادله سلمیر قابل محاسبه است [۳۰]:

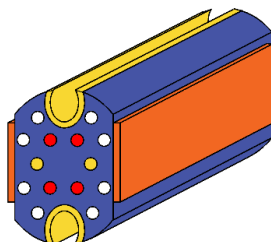
$$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3^2} \quad (1)$$

در (۱)، n ضریب شکست ماده و λ طول موج نور فرودی است. ضرایب $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ به ترتیب برابرند با $0.6991663, 0.91896161, 0.4079426, 0.01162414, 0.0684043, 0.897479, 0.004079426$. استفاده از طلا در سنسورهای ضریب شکستی مبتنی بر فوتونیک کریستال به دلیل ویژگی‌ها و مزایای منحصر به فرد آن صورت می‌گیرد. طلا دارای خواص نوری عالی در ناحیه قابل رؤیت و مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی می‌باشد. ضریب خاموشی مولی بالای طلا باعث برهم کنش کارآمد با نور می‌شود. این ویژگی برای دستیابی به حساسیت بالا در سنسورهای فوتونیک کریستالی بسیار مهم است. همچنین طلا به عنوان فلزی شناخته می‌شود که قابلیت بالایی در پشتیبانی از SPR ها را دارد. تحریک SPR ها منجر به افزایش میدان‌های الکترومغناطیسی در نزدیکی سطح طلا می‌شود که در نتیجه حساسیت تشخیص در کاربردهای حسگری افزایش می‌یابد. رابطه پراکندگی برای طلا با استفاده از مدل درود-لورنتز به صورت زیر است [۳۱]:

$$\varepsilon_{Au} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + i\gamma_D)} - \frac{\Delta\varepsilon \cdot \Omega_L^2}{\omega^2 - \Omega_L^2 + i\Gamma_L \omega} \quad (2)$$



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) سطح مقطع سنسور پیشنهادی (ب) شماتیک سه بعدی

امر امکان تشخیص با انتخاب‌پذیری و حساسیت بالا را فراهم می‌کند [۲۷، ۲۸]. در عین حال، عمق نفوذ موج محوشونده متناسب با طول موج کاری است. در مقایسه با نور مرئی، موج محوشونده در باندهای NIR و MIR دارای عمق نفوذ بیشتری است. بنابراین، تقاضا برای حسگرهایی که دارای محدوده تشخیص گسترده‌تری از ضریب شکست هستند و همچنین در باندهای MIR کار می‌کنند، به طور قابل توجهی افزایش یافته است [۲۹]. در این تحقیق ما یک سنسور پلاسمونیک مبتنی بر فیبر بلور فوتونی با ساختاری جدید معرفی نموده‌ایم که قادر است در محدوده MIR کار کرده و محدوده وسیعی از ضرایب شکست را تشخیص دهد (۱/۴ تا ۱/۶). به منظور افزایش حساسیت سنسور، از حفره‌هایی شامل طلا و TiN استفاده شده است. همچنین به منظور افزایش کارایی سنسور دو شکاف U شکل در بالا و پایین ساختار ایجاد شده و لایه‌های نازکی از طلا بر روی آنها قرار گرفته است. برای افزایش محدوده تشخیص ضریب شکست، دو طرف ساختار برش داده شده و لایه نازکی از ماده ITO بر روی آنها قرار داده شده است. ساختار به صورت عددی و به روش المان محدود^۱ توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics تحلیل و شبیه‌سازی شده است. همچنین از یک لایه PML برای به حداقل رساندن بازتاب نور و کاهش تلفات پراکندگی در مرز ساختار استفاده شده است. در ادامه، ارزیابی پارامترهای هندسی ساختار انجام گردیده، تأثیر تغییرات این پارامترها بر کارایی سنسور بررسی شده است و در نهایت مقادیر بهینه ارائه شده‌اند.

۲- طراحی سنسور و تئوری

سطح مقطع سنسور SPR-PCF طراحی شده به همراه شماتیک سه بعدی آن در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. ساختار پیشنهادی از دو حلقه به صورت شش ضلعی تشکیل شده است که حلقه بیرونی شامل یک سری حفره‌های هوایی و حلقه درونی شامل چهار حفره از جنس TiN و دو حفره از جنس طلا می‌باشد. همچنین به منظور افزایش کارایی سنسور، دو شکاف با روکشی از لایه نازک طلا در بالا و پایین ساختار ایجاد شده است. در کنار این‌ها، دو طرف ساختار برش داده شده و لایه نازک ITO بر روی آنها قرار داده شده است. مقادیر پارامترهای هندسی ساختار که در ادامه آورده می‌شوند، اندازه‌های اولیه هستند که در قسمت بعدی، مرحله به مرحله مقدار بهینه و نهایی آنها به دست خواهد آمد. شعاع حفره‌های هوایی (r_1)، شعاع حفره‌های طلا (r_2) و شعاع حفره‌های TiN (r_3) برابر با 0.5 میکرومتر در نظر گرفته شده است. فاصله تناوبی بین حفره‌ها (a) برابر با 2.5 میکرومتر، عمق شکاف ایجاد شده (H) برابر با 2.5 میکرومتر و ضخامت لایه نازک طلا (t) برابر با 110 نانومتر انتخاب شده‌اند. همچنین مقادیر اولیه طول لایه ITO (d) و ضخامت آن (T) به ترتیب برابر با 4 میکرومتر و 50 نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای هندسی و اجزای ساختار طول موج کاری و محدوده ضریب شکست قابل تشخیص آنالیت را تعیین می‌کنند. از این رو، مقادیر اولیه طراحی PCF به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که طول موج کاری و قابلیت

¹ Finite element method (FEM)



بوجود می‌آید. بنابراین، برای طراحی سنسورهای SPR مبتنی بر فیبر بلور فوتون، می‌توان منشور را با هسته فیبر جایگزین کرد. میدان محوشونده، پلاسمون‌های سطحی را در سطح مشترک لایه فلز و ماده آنالیت تحریک می‌کند. کوپلینگ این میدان‌ها به شدت به طول موج، پارامترهای هندسی و مواد استفاده شده بستگی دارد. در سنسورهای پلاسمونیک مبتنی بر PCF، شرایط تطبیق فاز در نقطه تقاطع موده‌های مؤثر هسته و SPP اتفاق می‌افتد. در طول موج تشدید، قسمت‌های حقیقی ضرایب شکست مؤثر هسته و SPP ها با هم برابر می‌شوند. علاوه بر این، منحنی تلفات محدودشوندگی^۱ به عنوان تابعی از قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر، در طول موج تشدید مربوط به تحریک پلاسمون‌های سطحی، به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد و یک پیک را نشان می‌دهد. به منظور بررسی کارایی سنسور، برخی از پارامترها باید محاسبه شوند. یکی از این پارامترها تلفات محدود شوندگی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۴]:

$$\alpha(dB/cm) = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda(\mu m)} \times Im(n_{eff}) \quad (V)$$

که در آن λ طول موج کاری و $Im(n_{eff})$ قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر مربوط به مود اصلی هسته است. با استفاده از روش بررسی طول موجی، یکی دیگر از پارامترهای مهم برای ارزیابی سنسور به نام حساسیت طول موج بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۴]:

$$S_{\lambda}(nm/RIU) = \frac{\Delta\lambda_{res}}{\Delta n_g} \quad (\lambda)$$

در (۸)، $\Delta\lambda_{res}$ تغییرات طول موج تشدید و Δn_a تغییرات ضریب شکست آنالیت‌های مجاور می‌باشند. وضوح سنسور به عنوان حداقل تغییر کمیتی که قابل شناسایی باشد از (۹) به دست می‌آید [۳۵]:

$$R(RIU) = \Delta n_a \times \frac{\Delta \lambda_{min}}{\Delta \lambda_{res}} \quad (9)$$

که $\Delta\lambda_{min}$ را معمولاً با توجه به قدرت تشخیص دستگاه تحلیلگر طیف نوری (OSA) برابر با 0.1 نانومتر در نظر می‌گیرند. از آنجایی که حساسیت طول موج و پهنای طیف هر دو نقش اساسی در بهبود محدودیت‌های تشخیص و افزایش عملکرد سنسور دارند، مفهوم عدد شایستگی (FOM) می‌تواند مفید باشد [۳۶]:

$$FOM(RIU^{-1}) = \frac{S_\lambda}{FWHM} \quad (1 \cdot)$$

که $FWHM$ مقدار پهنا در نصف مقدار ماکزیمم می‌باشد. پارامتر دیگری که در برخی موارد می‌تواند به عنوان یک معیار ارزیابی برای کارایی سنسور مورد توجه قرار گیرد، حساسیت دامنه است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۳۶]:

$$S_A(RIU^{-1}) = -\frac{1}{\alpha(\lambda, n_a)} \left(\frac{\partial \alpha(\lambda, n_a)}{\partial n_a} \right) \quad (11)$$

که در آن، α ثابت تضعیف بوده و به معنای تلفات در یک طول موج مشخص و به ازای ضریب شکست آنالیت n_a است. تغییرات بین دو طیف تلفات (معمولاً مجاور) با $\partial\alpha(\lambda, n_a)$ و تغییرات در ضریب شکست آنالیت با ∂n_a بیان شده‌اند.

در (۲) ε_{Au} ثابت دی الکتریک طلا، ε_{∞} ثابت دی الکتریک فرکانس بالا برابر با $\Delta\varepsilon$ پارامتر وزنی معادله و برابر با 0.109 ، ω فرکانس زاویه‌ای موج منتشره، ω_D و γ_D به ترتیب فرکانس پلاسما و فرکانس میرایی و برابر با $2113/6 \text{ rad/s}$ و $15/92 \text{ rad/s}$ هستند. Γ_L و Ω_L به عنوان فرکانس و پهنای طیف اسيلاتور لورنتز شناخته می‌شوند که به ترتیب برابر با 650.07 rad/s و $86/10.4 \text{ rad/s}$ می‌باشند. ماده دیگری که در ساختار پیشنهادی استفاده شده، TiN است که به واسطه خصوصیات مناسبی همچون ضریب شکست بالا، تلفات کم، پایداری شیمیایی، زیست سازگاری و فرآیند ساخت مناسب در سنسورهای پلاسمونیک مورد توجه قرار گرفته است. برای محاسبه ثابت دی الکتریک TiN از (۲) استفاده می‌کنیم. در این حالت مقادیر پارامترهای ε_{∞} ، $\Delta\varepsilon$ ، ω_D ، γ_D ، Ω_L و Γ_L به ترتیب عبارتند از [۳۲]: $2/4852 \text{ eV}$ ، $2/4852 \text{ eV}$ ، $5/953 \text{ eV}$ ، $0/142 \text{ eV}$ ، $3/9545 \text{ eV}$ و $2/4852 \text{ eV}$. نوسانات چگالی الکترون جمعی محدود شده در سطح مشترک فلز- دی الکتریک به عنوان پلاسمون‌های سطحی (SP) نامیده می‌شوند که به دلیل برهم کنش بین یک موج الکترومغناطیسی برخوردی و الکترون‌های آزاد فلز ایجاد می‌شوند. برای تحریک پلاسمون‌های سطحی، بردار موج نور فرودی باید با بردار موج پلاسمون‌های سطحی مطابقت داشته باشد. در این شرایط، تمام یا قسمتی از توان نور فرودی به پلاسمون‌ها منتقل می‌شود. ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی (K_{SP}) که در امتداد سطح مشترک فلز-دی الکتریک منتشر می‌شوند با معادله زیر بیان می‌شود [۳۳]:

$$K_{SP} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (3)$$

که در آن ϵ_m و ϵ_s ، به ترتیب ثابت های دی الکتریک فلز و محیط دی الکتریک هستند. همچنین ω فرکانس نور فرودی و C سرعت نور در خلأ می باشد. ثابت انتشار نور فرودی برابر است با:

$$K_i = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_s} \quad (4)$$

معمولاً برای تحریک پلاسمون‌های سطحی از یک منشور با ثابت دی‌الکتریک بالا برای به دست آوردن موج محو شونده استفاده می‌شود. بردار موج این موج محوشونده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$K_{ev} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta \quad (\Delta)$$

که در آن، ϵ_p ثابت دی‌الکتریک منشور و θ زاویه برخورد نور است. تحریک زمانی اتفاق می‌افتد که بردار موج محوشونده با ثابت انتشار SPW مطابقت داشته باشد. بنابراین، شرط تشدید برای تشدید پلاسمون سطحی به شرح زیر می‌شود:

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_p} \sin \theta_{res} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s} \right)^{1/2} \quad (6)$$

برقراری این شرط تطبیق فاز منجر به انتقال انرژی از فوتون‌ها به SPW می‌شود که به شدت به ضریب شکست آنالیت وابسته است. علاوه بر این، در مورد سنسورهای SPR مبتنی بر فیبر نوری، به دلیل انعکاس کلی داخلی، مود هسته، موج محو شونده در سطح مشترک روکش و هسته

¹ confinement loss

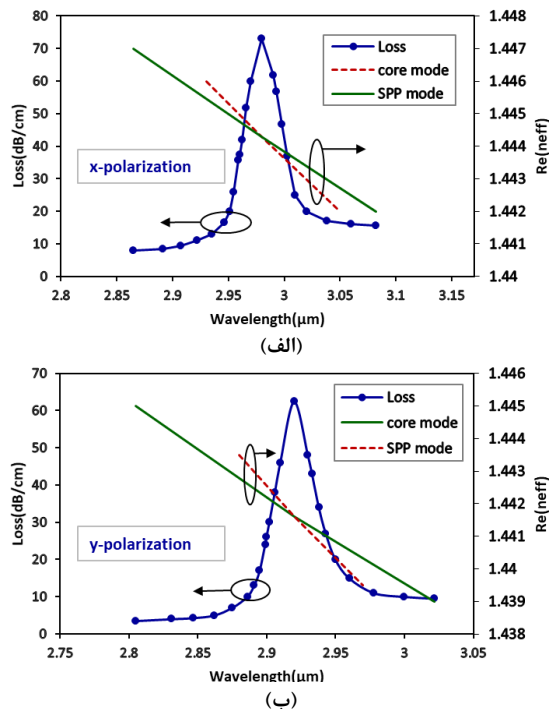
۳- نتایج و توضیحات

۳-۱- تحلیل فیزیکی

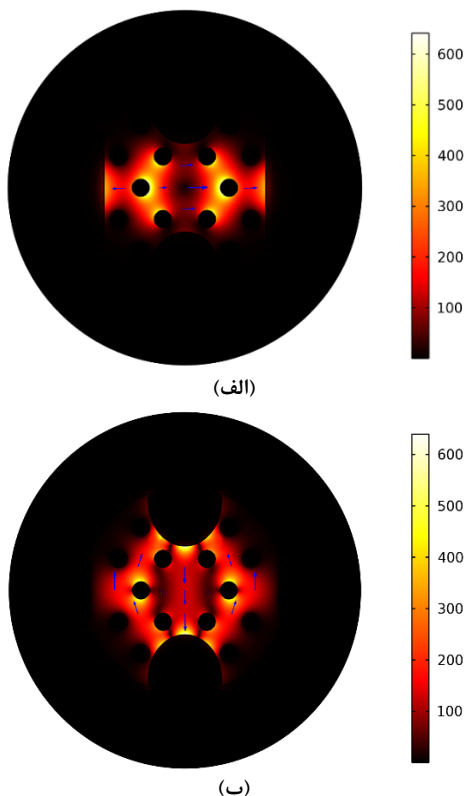
هنگامی که شرایط تطبیق فاز بین مود هسته و مود *SPP* برقرار شود، نور منتشر شده در هسته می تواند با پلاسمون های سطحی برهمکنش داشته باشند. در این حالت، ماکزیمم انرژی از مود هسته به مود *SPP* منتقل می شود و حالت تشدید بوجود می آید. شکل (۲) نمودار پراکندگی را به ازای ضریب شکست آنالیت ۱/۴ برای دو حالت قطبش در جهت *x* و جهت *y* نشان می دهد. خط سبز رنگ مربوط به قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود هسته و خط چین قرمز رنگ قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود *SPP* می باشد. منحنی آبی رنگ نیز نمودار تلفات محدود شونده است که رابطه مستقیم با قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر دارد. همانگونه که قابل مشاهده است شرط تطبیق فاز یا همان تشدید در نقطه تقاطع دو خط سبز و قرمز رنگ یعنی جایی که قسمت حقیقی ضرایب شکست مؤثر مود هسته و مود *SPP* با هم برابر می شوند، رخ می دهد. در این طول موج تشدید نمودار تلفات به مقدار ماکزیمم خود می رسد. در واقع در این طول موج، ماکزیمم انرژی از مود هسته به مود *SPP* منتقل شده و تشدید رخ خواهد داد. همانگونه که می بینیم، در حالت قطبش در جهت *x* ماکزیمم تلفات برابر با dB/cm در طول موج تشدید $2/98$ میکرومتر رخ داده است و در حالت قطبش *y*، این مقدار برابر با $62/4$ dB/cm با طول موج تشدید $2/92$ میکرومتر شده است. بنابراین ما در ادامه، بررسی ساختار را در حالت قطبش *x* در نظر خواهیم گرفت. همچنین توزیع میدان الکتریکی در حالت تشدید در دو حالت قطبش در جهت *x* و جهت *y* در شکل (۳) نمایش داده شده است.

۳-۲- تأثیر تغییر پارامترهای ساختار

در ابتدا اثر تغییر شعاع حفره های هوایی (r_1) را بررسی می کنیم و آن را از $0/4$ تا $0/5$ میکرومتر تغییر می دهیم. نمودار تلفات محدود شونده بر حسب طول موج به ازای مقادیر مختلف r_1 در شکل (۴) رسم شده است. مشاهده می کنیم که با افزایش شعاع، مقدار تلفات زیاد می شود و از 60 dB/cm به 73 dB/cm می رسد. همچنین طول موج تشدید از $2/98$ تا $3/09$ میکرومتر تغییر می کند. دلیل این اتفاق این است که با افزایش r_1 ضریب شکست مؤثر پوسته کاهش می یابد و در نتیجه تفاوت بین ضریب شکست هسته و پوسته افزایش یافته و پدیده بازتاب کلی داخلی، بهتر صورت می پذیرد که باعث کوپلینگ بهتر و افزایش تلفات خواهد شد. همچنین به دلیل تغییر شرایط تطبیق فاز، طول موج تشدید هم تغییر می کند. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار بهینه r_1 را $0/5$ میکرومتر در نظر می گیریم. در مرحله بعد، اثر تغییر فاصله حفره ها از هم (a) را بررسی می کنیم. اثر تغییر a بر تلفات در شکل (۵) نشان داده شده است. قابل مشاهده است که با افزایش a از $2/5$ میکرومتر تا $3/5$ میکرومتر ابتدا تلفات افزایش یافته و سپس کم می شود.

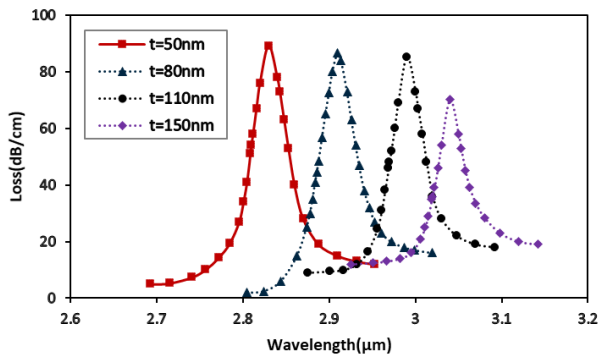


شکل (۲): نمودار پراکندگی در حالت (الف) قطبش *x* و (ب) قطبش *y*. منحنی آبی رنگ بیانگر تلفات محدود شونده، خط سبز رنگ قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود هسته و خط چین قرمز رنگ قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود *SPP* است. در این بررسی، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu m$ ، $r_2 = 0.5 \mu m$ ، $r_1 = 0.5 \mu m$ ، $a = 2.5 \mu m$ ، $T = 50 nm$ و $d = 4 \mu m$ ، $H = 2.5 \mu m$ ، $t = 110 nm$ است.



شکل (۳): توزیع میدان الکتریکی در حالت تشدید برای (الف) قطبش *x* و (ب) قطبش *y*. در شکل (الف) طول موج تشدید برابر با $2/98$ میکرومتر و در شکل (ب) طول موج تشدید $2/92$ میکرومتر می باشد.

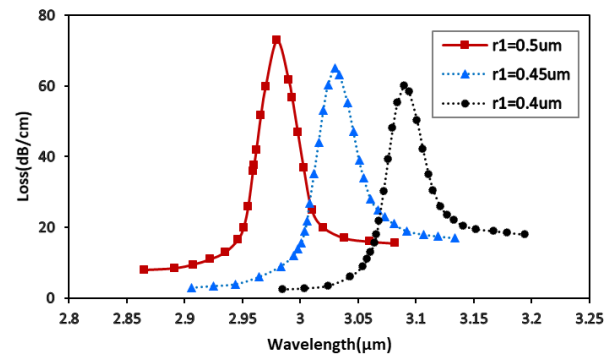




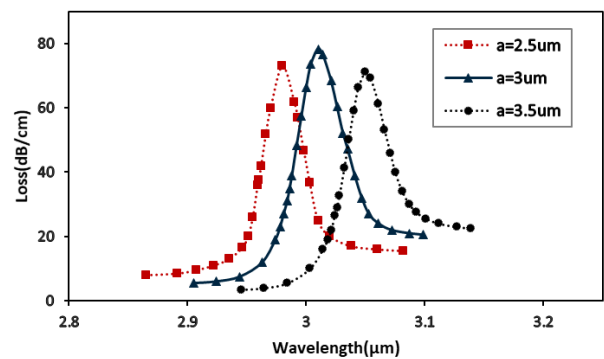
شکل (۷): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییر ضخامت لایه طلا (t). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = a = 3\mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $H = 3\mu\text{m}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

با افزایش a فاصله بین حفره ها افزایش یافته و باعث می شود که انرژی مود هسته بهتر به مود SPP برسد و در نتیجه برهمکنش بین ماده آنالیت و لایه طلا بهتر انجام شده و تلفات افزایش یابد. اما با افزایش a از 3 به $3/5$ میکرومتر، قسمتی از انرژی مود هسته در ساختار به صورت نشتی تلف می شود و باعث کاهش تلفات خواهد شد. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار بهینه a برابر با 3 میکرومتر در نظر گرفته می شود. در این حالت مقدار ماکزیمم تلفات 78 dB/cm و طول موج تشدید $3/01$ میکرومتر خواهد بود. شکل (۶) اثر تغییر عمق شکاف H را نشان می دهد. می بینیم که با افزایش H مقدار تلفات زیاد شده و سپس کم می شود. در واقع با افزایش H ، ماده آنالیت به هسته نزدیکتر شده و انرژی بیشتری از هسته می تواند به ماده آنالیت برسد و بر همکنش بهتری را پدید آورد و در نتیجه تلفات افزایش یابد. اما با افزایش بیشتر H از 3 میکرومتر، به دلیل تداخل با حفره های TiN انتقال انرژی به درستی صورت نگرفته و تلفات کاهش می یابد. با توجه به موارد گفته شده مقدار بهینه H برابر با 3 میکرومتر انتخاب می شود. تلفات ماکزیمم در این حالت 85 dB/cm و طول موج تشدید به دلیل اینکه شرایط تطبیق فاز تغییر کرده است $2/99$ میکرومتر شده است.

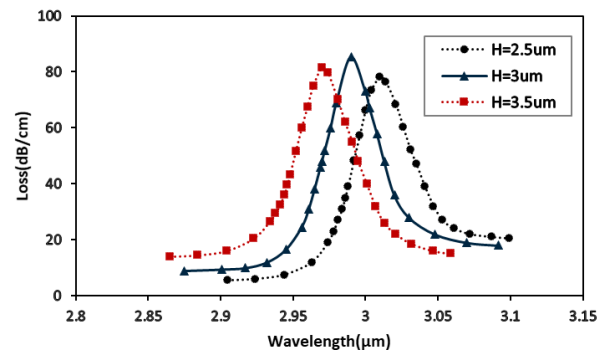
پارامتر مهم بعدی ضخامت لایه نازک طلا (t) است. شکل (۷) نتایج محاسبات مربوط به تغییر t را نمایش می دهد. ضخامت لایه طلا را از 50 نانومتر تا 150 نانومتر تغییر داده ایم و می بینیم که با افزایش ضخامت، تلفات محدود شوندگی کاهش می یابد و از 78 dB/cm به $2/83$ می یابد. همچنین طول موج تشدید نیز از $3/04$ میکرومتر منتقل می شود. این اتفاق به این دلیل است که هرچه ضخامت لایه طلا بیشتر شود انرژی موج محو شونده که از مود هسته به لایه طلا می رسد به دلیل پدیده میرایی، کمتر شده و برهمکنش آن با آنالیت ضعیفتر خواهد شد [۳۷]. در نتیجه تلفات کاهش می یابد. همچنین با تغییر ضخامت لایه طلا، ضریب شکست مؤثر کلی تغییر می کند و در نتیجه شرایط تشدید عوض می شود (معادله ۶) و بنابراین طول موج تشدید هم جابجا خواهد شد. در نهایت مقدار بهینه t را برابر با 50 نانومتر در نظر می گیریم.



شکل (۴): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییرات شعاع حفره های هوایی r_1 . برای بدست آوردن نمودار، $a = 2.5\mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $H = 2.5\mu\text{m}$ ، $t = 110\text{nm}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

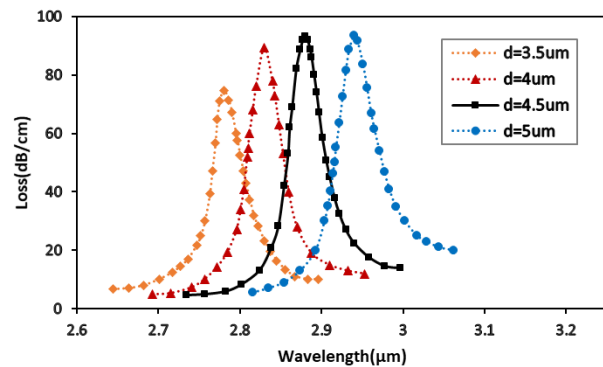


شکل (۵): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییرات فاصله بین حفره ها (a). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = a$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $H = 2.5\mu\text{m}$ ، $t = 110\text{nm}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

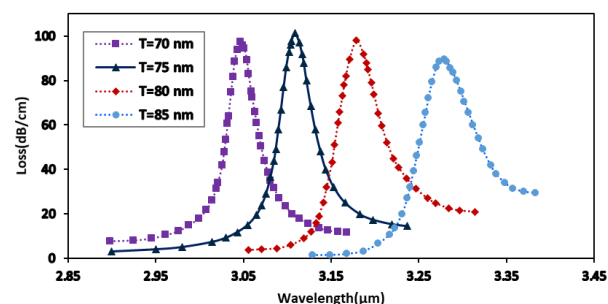


شکل (۶): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییر عمق شکاف (H). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = a = 3\mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $t = 110\text{nm}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

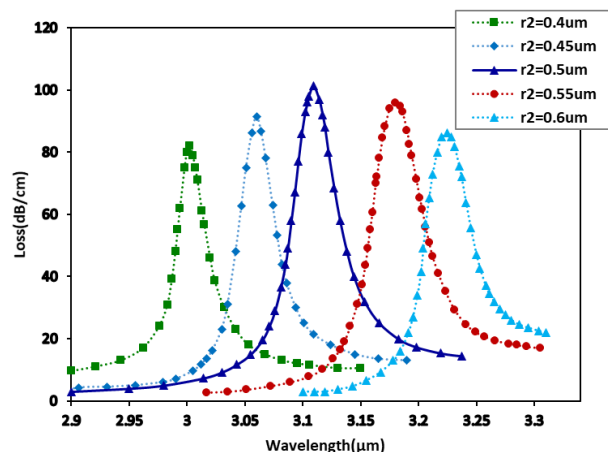
پلاسمونیک افزایش یافته و سطح برهمکنش بین نور و ماده *ITO* بیشتر خواهد شد و در نتیجه تلفات زیاد می‌شود. با افزایش بیشتر از مقدار $4/5$ میکرومتر، به دلیل همپوشانی حفره‌ها با لایه *ITO*، نور کمتری به سطح آن خواهد رسید و تلفات تقریباً ثابت خواهد ماند. مقدار بهینه d را برابر با $4/5$ میکرومتر در نظر می‌گیریم که در این حالت ماکزیمم تلفات و طول موج تشدید به ترتیب برابر با 93 dB/cm و $2/88$ میکرومتر هستند. شکل (۹) تغییرات تلفات را به ازای مقادیر مختلف ضخامت لایه *ITO* یعنی T نشان می‌دهد. در ابتدا با افزایش T تلفات زیاد شده و سپس کم می‌شود. دلیل این رفتار به ماهیت تشکیل میدان بر می‌گردد. در واقع در ابتدا به دلیل کم بودن ضخامت *ITO* میدان به درستی در آن تشکیل نمی‌شود، برهمکنش نور و ماده آنالیت به خوبی انجام نمی‌گیرد و در نتیجه تلفات کم می‌شود اما با افزایش ضخامت، میدان و موج محو شونده به خوبی تشکیل می‌شوند. با افزایش بیشتر ضخامت *ITO* از 75 نانومتر، به دلیل پدیده میرایی مشابه آنچه برای لایه طلا ذکر شد، تلفات کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۹) مقدار بهینه برای T ، 75 نانومتر در نظر گرفته شده که در این حالت ماکزیمم تلفات و طول موج تشدید به ترتیب برابر با $101/3 \text{ dB/cm}$ و $3/1$ میکرومتر خواهند شد. دو پارامتر دیگر، شعاع حفره‌های طلا (r_2) و شعاع حفره‌های *TiN* (r_3) است که اثر تغییرات آنها در شکل (۱۰-۱۱) نشان داده شده است. با افزایش r_2 به دلیل افزایش سطح مؤثر طلا، برهمکنش بین طلا و انرژی مود هسته زیاد و در نتیجه تلفات بیشتر خواهد شد. اما سپس با افزایش بیشتر شعاع، کاهش اندکی در تلفات مشاهده می‌شود که ناشی از ورود حفره طلا به ناحیه مودال هسته است و باعث می‌شود که انرژی مود هسته به خوبی به حفره طلا منتقل نشود. با توجه به شکل (۱۰)، مقدار بهینه r_2 را برابر با $0/5$ میکرومتر در نظر می‌گیریم که معادل تلفات ماکزیمم $101/3 \text{ dB/cm}$ در طول موج تشدید $3/1$ میکرومتر است. همچنین از شکل (۱۱) قابل مشاهده است که با افزایش r_3 شاهد افزایش کمی در تلفات و سپس کاهش آن هستیم. این به این دلیل است که در ابتدا با افزایش r_3 سطح مؤثر پلاسمونیک افزایش یافته و برهمکنش نور و ماده *TiN* قویتر و در نتیجه تلفات بیشتر می‌شود. اما با افزایش شعاع r_3 از مقدار $0/45$ میکرومتر، کانال ارتباطی که انرژی مود هسته از طریق آن به آنالیت می‌رسد تنگتر شده و انرژی کمتری به مود *SPP* مربوط به لایه‌های طلا و *ITO* رسیده و در نتیجه برهمکنش نور با آنها ضعیف‌تر شده و تلفات کم می‌شود. با توجه به شکل (۱۱)، برای r_3 مقدار $0/45$ میکرومتر در نظر گرفته شده است. در این حالت مقدار ماکزیمم تلفات محدودشوندگی $103/6 \text{ dB/cm}$ و طول موج تشدید $3/05$ میکرومتر می‌شود. نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای مقادیر مختلف ضریب شکست ماده آنالیت در شکل (۱۲) نشان داده شده است. محدوده قابل تشخیص سنسور پیشنهادی ضرایب شکست بین $1/4$ تا $1/6$ است. همچنین خطی بودن سنسور در شکل (۱۳) بررسی شده که گویای کارکرد مناسب و خطی ساختار پیشنهادی است.



شکل (۸): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر طول لایه *ITO* (d). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ و $T = 50 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده‌اند.



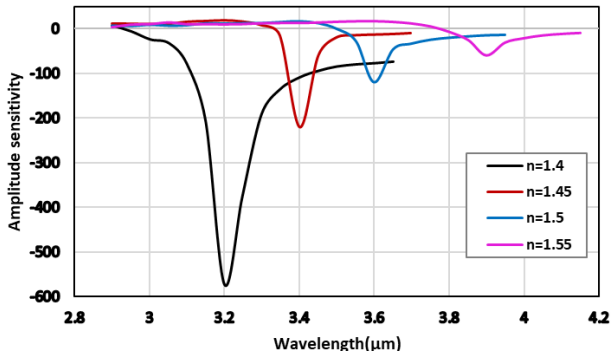
شکل (۹): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر ضخامت لایه *ITO* (T). برای بدست آوردن نمودارها، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ و $d = 4.5 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱۰): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر شعاع حفره طلا (r_2). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ و $d = 4.5 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده‌اند.

در مرحله بعد، اثر لایه *ITO* را با تغییر طول (d) و ضخامت (T) آن بررسی می‌کنیم. همانطور که در شکل (۸) می‌بینیم، با افزایش مقدار d از $3/5$ تا 5 میکرومتر ابتدا شاهد افزایش تلفات و سپس تقریباً ثابت بودن تلفات هستیم. دلیل این رفتار این است که با افزایش d سطح مؤثر



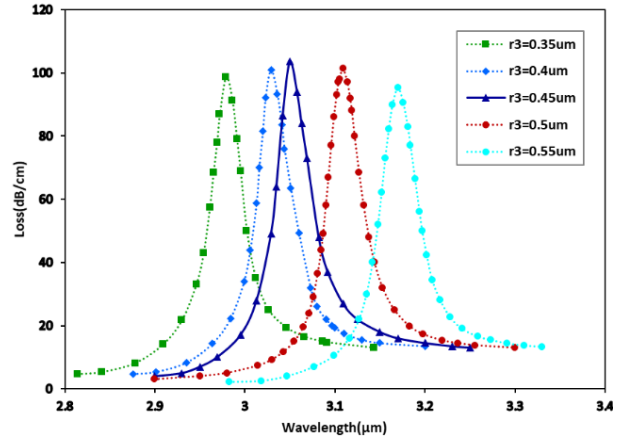


شکل (۱۴): نمودار حساسیت دامنه بر حسب طول موج به ازای ضرایب شکست متفاوت ماده آنالیت.

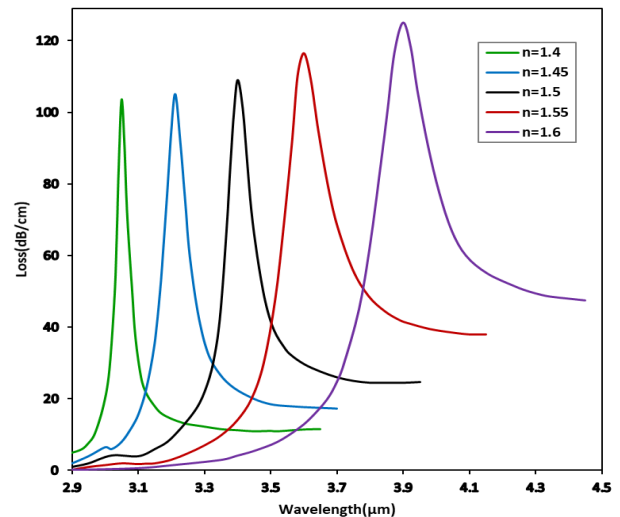
در جدول (۱) محاسبات مربوط به پارامترهای ارزیابی سنسور پیشنهادی آورده شده‌اند. محدوده تشخیص سنسور، ضرایب شکست $1/4$ تا $1/6$ می‌باشد که محدوده بسیار گسترده‌ای است. ماکزیم حساسیت سنسور برابر با $6000 \text{ nm}/RIU$ ، مقدار ماکزیم FOM ساختار برابر با 67 RIU^{-1} و رزولوشن آن برابر با $1.6 \times 10^{-5} \text{ RIU}$ شده است که همگی بیانگر کارایی بالای سنسور پیشنهادی و مناسب برای کاربردهای تشخیصی پزشکی و مواد شیمیایی می‌باشد. در انتها، مقایسه بین سنسور پیشنهاد شده در این تحقیق با برخی از کارهای مشابه انجام شده در جدول (۲) آورده شده است.

۴- نتیجه

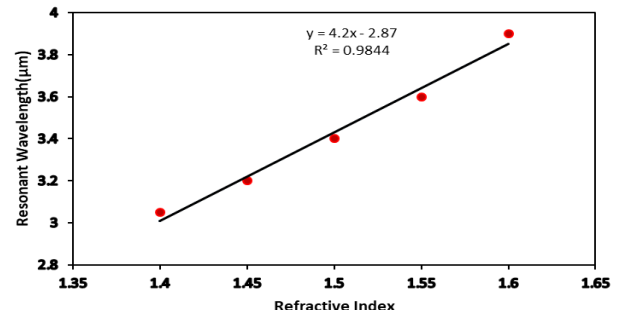
سنسورهای پلاسمونیک مبتنی بر فیبر بلور فوتونی به دلیل خصوصیات منحصر به فردی که دارند نقش بسیار مهمی در نانو فوتونیک و کاربردهای تشخیصی پیدا کرده‌اند. ما در این تحقیق یک سنسور تشخیص ضریب شکست ارائه دادیم که برای بهبود عملکرد آن از حفره‌های طلا و TiN و همچنین دو شکاف با لایه‌های نازک طلا، به اضافه برش دو طرف ساختار و نشان دادن لایه ITO استفاده نمودیم. مزیت اصلی سنسور پیشنهادی ما قابلیت تشخیص محدوده گسترده‌ای از ضرایب شکست ($1/4$ تا $1/6$) می‌باشد که با حساسیت مناسبی همراه شده است. یکی دیگر از مزیت‌های این سنسور، کار در محدوده طول موجی MIR است که کارایی سنسور را بالا می‌برد. ویژگی‌های تشخیصی سنسور پیشنهادی با استفاده از روش المان محدود بررسی شدند. به منظور رسیدن به یک ساختار بهینه و مناسب، مرحله به مرحله پارامترهای مهم ساختار را بررسی و اثر تغییرات آنها بر عملکرد سنسور را آنالیز نمودیم. با توجه به نتایج محاسبه شده، ساختار پیشنهادی ما دارای حساسیت زیاد $6000 \text{ nm}/RIU$ ، مقدار ماکزیم FOM برابر با 67 RIU^{-1} ، رزولوشن $1.6 \times 10^{-5} \text{ RIU}$ و حساسیت دامنه 572 RIU^{-1} می‌باشد. با توجه به این پارامترها، سنسور پیشنهادی ما برای کاربردهای تشخیصی مواد شیمیایی با ضریب شکست بالا مثل روغن‌های صنعتی و مواد نفتی و همچنین کاربردهای پزشکی بسیار مناسب می‌باشد.



شکل (۱۱): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر شعاع حفره TiN (r_3) برای بدست آوردن نمودارها، $n_a = 1.4$ ، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $d = 4.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ و $T = 75 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱۲): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای ضرایب شکست مختلف ماده آنالیت. برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_3 = 0.45 \mu\text{m}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $d = 4.5 \mu\text{m}$ و $T = 75 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱۳): بررسی خطی بودن سنسور پیشنهادی. نمودار ضرایب شکست مختلف ماده آنالیت بر حسب طول موج های تشدید.

نمودار حساسیت دامنه به ازای ضرایب شکست مختلف در شکل (۱۴) رسم شده است و طبق این شکل می‌بینیم که حداکثر حساسیت دامنه برابر با 572 RIU^{-1} بدست آمده است.

جدول (۱): پارامترهای ارزیابی سنسور پیشنهادی

ضریب شکست RI	فرکانس تشدید (μm)	پیک تلفات (dB/cm)	جابجایی پیک (μm)	FWHM (nm)	S_A (nm/RIU)	FOM (RIU^{-1})	Resolution (RIU)	S_A (RIU^{-1})
1.4	3.05	103.6	0.15	45	3000	67	3.3×10^{-5}	572
1.45	3.2	105	0.2	100	4000	40	2.5×10^{-5}	220
1.5	3.4	109	0.2	110	4000	37	2.5×10^{-5}	120
1.55	3.6	116.5	0.3	210	6000	29	1.6×10^{-5}	62
1.6	3.9	125	N/A	270	N/A	N/A	N/A	N/A

جدول (۲): مقایسه سنسور پیشنهادی با برخی از کارهای مشابه گزارش شده

ساختار سنسور	محدوده ضریب شکست	حساسیت (nm/RIU)	Resolution (RIU)	مرجع/سال
PCF based plasmonic (silver)	1.38-1.41	4100	2.44×10^{-5}	2022/[38]
D-type PCF-based plasmonic (gold)	1.35-1.40	5100	—	2022/[39]
D-type PCF-based plasmonic (graphene-TiO ₂ -silver)	1.34-1.348	4250	2.35×10^{-5}	2022[40]
Optical fiber SPR sensor(Hematite)	1.33-1.38	4800	—	2023[41]
dual D-type PCF (gold)	1.31-1.41	6000	5×10^{-5}	2024/[42]
PCF-based plasmonic (u-groove gold- TiO ₂)	1.39-1.44	2000	5×10^{-5}	2024[43]
Our work	1.4-1.6	6000	1.6×10^{-5}	

مراجع

- [8] Tong L, Wei H, Zhang S, Xu H. "Recent advances in plasmonic sensors. Sensors", vol. 14, no. 5, pp. 7959-73, May 2014. <https://doi.org/10.3390/s140507959>
- [9] Kaur V, Singh S. "Design approach of solid-core photonic crystal fiber sensor with sensing ring for blood component detection", *Journal of Nanophotonics*. vol 13, no. 2, pp. 026011, Apr 2019. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.13.026011>
- [10] Akter S, Abdullah H. "High sensitivity gold-coated photonic crystal fiber sensor for blood component detection", *Plasmonics*, vol. 1, pp. 1-12, Oct 2024. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02599-5>
- [11] Yadav S, Singh S, Lohia P, Umar A, Dwivedi DK. "Delineation of profoundly birefringent nonlinear photonic crystal fiber in terahertz frequency regime", *Journal of Optical Communications*, vol. 46, no. 1, pp. 41-9, Jan 2025. <https://doi.org/10.1515/joc-2022-0143>
- [12] Li Z, Qu Y, Wang X, Wang Y, Wang D, Guo X, Xin C, Qiu Q, Rao L, Yuan J. "Simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature based on the birefringence response of a water-filled D-shaped photonic crystal fiber", *Measurement*. vol. 242, pp. 116217, Jan 2025. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116217>
- [13] Yadav S, Lohia P, Dwivedi DK. "Numerical modelling of highly efficient PCF based sensor for edible oil detection", *Journal of Optics*, pp. 1-7, Jan 2025. <https://doi.org/10.1007/s12596-025-02458-4>
- [14] Ashrafi TM, Mohanty G. "Surface Plasmon Resonance Sensors: A Critical Review of Recent Advances, Market Analysis, and Future Directions". *Plasmonics*, pp. 1-21, Jan 2025. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02740-4>
- [15] Han B, Zhang YN, Siyu E, Wang X, Yang D, Wang T, Lu K, Wang F. "Simultaneous measurement of temperature and strain based on dual SPR effect in PCF", *Optics & Laser Technology*, vol. 113, pp. 46-51, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.010>
- [16] Zhang H, Chen Y, Feng X, Xiong X, Hu S, Jiang Z, Dong J, Zhu W, Qiu W, Guan H, Lu H. "Long-range surface plasmon resonance sensor based on side-polished fiber for biosensing applications", *IEEE Journal of*
- [1] Chau YF, Yeh HH, Tsai DP. "Surface plasmon resonances effects on different patterns of solid-silver and silver-shell nanocylindrical pairs", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. vol. 24, no. 8, pp. 1005-14, Jan 2010. <https://doi.org/10.1163/156939310791586098>
- [2] Kaziz S, Echouchene F, Gazzah MH. "Optimizing PCF-SPR sensor design through Taguchi approach, machine learning, and genetic algorithms", *Scientific reports*, vol. 14, no. 1, pp. 7837, Apr 2024, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55817-9>
- [3] Das S, Sen R. "Design and numerical analysis of a pcfspr sensor for early-stage malaria detection. Plasmonics", vol. 19, no. 5, pp. 2565-80, Oct 2024. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02193-9>
- [4] Liu J, Dong J, Liu Q, "Hou S, Wu G, Yan Z. High-performance gold-nanowires-coated PCF-SPR sensor for refractive index detection", *Plasmonics*, vol. 1, pp. 1-10, Oct 2024. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02582-0>
- [5] Malakar T, Nurain Amina MN, Hassan MF. "Performance Analysis of a D-Shaped Butterfly-Core PCF-SPR Sensor for Dual Polarization Guided by Optimal Au-Ta₂O₅ Coating", *Plasmonics*, vol. 1, pp. 1-8, Feb 2025. <https://doi.org/10.1007/s11468-025-02817-8>
- [6] Jiao S, Gao Z. "Analysis of a photonic crystal fiber SPR sensor based on dual polarization direction and two different metal layers", *Optical Materials Express*, vol. 15, no. 3, pp. 541-54, Feb 2025. <https://doi.org/10.1364/OME.554436>
- [7] Romeiro AF, Cardoso MP, Miranda CC, Silva AO, Costa JC, Giraldo MT, Santos JL, Baptista JM, Guerreiro A. "Analysis of a D-Shaped Photonic Crystal Fiber Sensor with Multiple Conducting Layers", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 24, no. 1, pp. 2025288716, Feb 2025. <https://doi.org/10.1590/2179-10742025v24i1288716>



- with metal wires into cladding air holes”, *Optics express*, vol. 19, no. 4, pp.3799-3808, Feb. 2011. <https://doi.org/10.1364/OE.19.003799>
- [32] Khalil AE, El-Saeed AH, Farag MA, Hashish ME, Roshdi M, Hameed MF, Azab MY, Obayya SS. “Highly sensitive photonic crystal fiber biosensor based on alternative plasmonic material”, *In Nanophotonics VII*, . vol. 10672, pp. 102-108, SPIE. May 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2306300>
- [33] Gupta, B.D. and Verma, R.K., “Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: principle, probe designs, and some applications”, *Journal of sensors*, p. 979761, Aug. 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/979761>
- [34] Das A, Huraiya MA, Tabata H, Ramaraj SG. “Ultra-sensitive refractive index detection with gold-coated PCF-based SPR sensor”, *Talanta Open*. vol. 10, pp. 100384, 2024 Dec 2024. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2024.100384>
- [35] Majeed MF, Ahmad AK. “Design and analysis of a high sensitivity open microchannel PCF-based surface plasmon resonance refractometric sensor”, *Optical Materials*. vol. 147, pp. 147:114617, Jan 2024. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114617>
- [36] Hassan AA, Nafiz AA, Mahmud RR, Nayan MF, Salimullah SM. “Investigation of dual plasmonic material integrated wrench-shaped PCF sensor with broadband resonance for cancer cell & chemical detection”, *Optik*. vol. 318, pp. 318:172092, Dec 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jileo.2024.172092>
- [37] Gangwar, R. K., & Singh, V. K. “Highly sensitive surface plasmon resonance based D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor”, *Plasmonics*. vol. 12, pp. 1367-1372, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11468-016-0395-y>
- [38] Bahloul, L., Ferhat, M. L., Haddouche, I., & Cherbi, L. “A high-resolution refractive index sensor of partially cleaved PCF based on surface plasmon resonance”. *Journal of Optics*. pp. 1-9, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12596-021-00795-8>
- [39] Meng, F., Wang, H., & Fang, D. “Research on D-shape open-loop PCF temperature refractive index sensor based on SPR effect”. *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-5, Apr. 2022. [doi: 10.1109/JPHOT.2022.3166822](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3166822)
- [40] Sorathiya, V., Lavadiya, S., Faragallah, O. S., Eid, M. M., & Rashed, A. N. Z. “D shaped dual core photonics crystal based refractive index sensor using graphene-titanium-silver materials for infrared frequency spectrum”, *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 290, May 2022. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03700-0>
- [41] Zhang KK, Wang YY, Wang Q, Wang HY, Qian YZ, Zhang DY, Xue YY, Li S, Zhang L. “Sensitive monitoring of refractive index by surface plasmon resonance (SPR) with a gold α -iron (III) oxide thin film. Instrumentation Science & Technology”, vol. 51, no. 5, pp. 558-573, Sep 2023. <https://doi.org/10.1080/10739149.2023.2180030>
- [42] Divya J, Selvendran S, Raja AS, Borra V. “A Novel Plasmonic Sensor Based on Dual-Channel D-Shaped Photonic Crystal Fiber for Enhanced Sensitivity in Simultaneous Detection of Different Analytes”, *IEEE Transactions on NanoBioscience*. vol. 23, no. 1, pp. 127-139, Jul 2023. [doi: 10.1109/TNB.2023.3294330](https://doi.org/10.1109/TNB.2023.3294330)
- [43] Mittal S, Saharia A, Ismail Y, Petruccione F, Bourdine AV, Morozov OG, Demidov VV, Yin J, Singh G, Tiwari M, Kumar S. “Design and performance analysis of a novel hoop-cut SPR-PCF sensor for high sensitivity and broad range sensing applications”, *IEEE Sensors Journal*. vol. 24, no. 3, pp. 2697-2704, Feb. 2024. [doi: 10.1109/JSEN.2023.3339813](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3339813)
- Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 1-9, Sep 2018. [doi: 10.1109/JSTOE.2018.2868159](https://doi.org/10.1109/JSTOE.2018.2868159)
- [17] Yasli A, Ademgil H, Haxha S, Aggoun A. “Multi-channel photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor for multi-analyte sensing”, *IEEE Photonics Journal*. vol. 12, no. 1, pp. 1-5, Dec 2019. [doi: 10.1109/JPHOT.2019.2961110](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2961110)
- [18] Peng TC, Lin WC, Chen CW, Tsai DP, Chiang HP. “Enhanced sensitivity of surface plasmon resonance phase-interrogation biosensor by using silver nanoparticles”, *Plasmonics*, vol. 6, pp. 29-34, Mar 2011. <https://doi.org/10.1007/s11468-010-9165-4>
- [19] Xie Q, Chen Y, Li X, Yin Z, Wang L, Geng Y, Hong X. “Characteristics of D-shaped photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensors with different side-polished lengths”, *Applied Optics*. Vol. 56, no. 5, pp. 1550-5, Feb 2017. <https://doi.org/10.1364/AO.56.001550>
- [20] Hossain B, Paul AK, Islam MA, Hossain MF, Rahman MM. “Design and analysis of highly sensitive prism based surface plasmon resonance optical salinity sensor”, *Results in Optics*. vol. 7, pp. 100217, May 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100217>
- [21] Francesco C, Francesco B, Sara T, Cosimo T, Ambra G. “Biosensing with optical fiber gratings”, *Nanophotonics*. vol. 6, no. 4, pp. 663-79, Jul 2017. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2016-0178>
- [22] Naik, G. V., Kim, J., & Boltasseva, A. “Oxides and nitrides as alternative plasmonic materials in the optical range”, *Optical materials express*, vol. 1 no. 6, pp. 1090-1099, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1364/OME.1.001090>
- [23] Yan X, Wang Y, Cheng T, Li S. “Photonic crystal fiber SPR liquid sensor based on elliptical detective channel. Micromachines”, vol. 12, no. 4, pp. 408, Apr 2021. <https://doi.org/10.3390/mi12040408>
- [24] Liu C, Su W, Liu Q, Lu X, Wang F, Sun T, Chu PK. “Symmetrical dual D-shape photonic crystal fibers for surface plasmon resonance sensing”, *Optics express*, vol. 26, no. 7, pp. 9039-49, Mar 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.009039>
- [25] Golosovsky M, Lirtsman V, Yashunsky V, Davidov D, Aroeti B. “Midinfrared surface-plasmon resonance: A novel biophysical tool for studying living cells”, *Journal of Applied Physics*. vol. 107, no. 2, pp. 029901, Jan. 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3284955>
- [26] Bai Y, Wang B, Ma X. “Versatile infrared refractive-index sensor based on surface plasmon resonance in graphene sheet”, *Optical Engineering*, vol. 57, no. 3, pp. 037107, Mar 2018. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.3.037107>
- [27] Sachet E, Losego MD, Guske J, Franzen S, Maria JP. “Mid-infrared surface plasmon resonance in zinc oxide semiconductor thin films”, *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 5, Feb 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4791700>
- [28] Homola J. “Present and future of surface plasmon resonance biosensors”, *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 377, no. 3, pp. 528-39, Oct 2003. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2101-0>
- [29] Wang F, Wei Y, Han Y. “High sensitivity and wide range refractive index sensor based on surface plasmon resonance photonic crystal fiber”, *Sensors*. vol. 23, no. 14, pp. 6617, Jul 2023. <https://doi.org/10.3390/s23146617>
- [30] Mukhopadhyay AK, Sarkar S, Mukherjee S, Das NR. “Optimization and characterization of a PCF-based SPR sensor for enhanced sensitivity and reliability in diverse chemical and biological applications”, *Journal of the Optical Society of America B*. vol. 42, no. 1, pp. 97-104, Dec 2024. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.537519>
- [31] Nagasaki, A., Saitoh, K. and Koshiba, M., “Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled



The classification of selected facial expressions using single-channel electromyographic signals through artificial neural networks and decision trees

Niloofar Shojaeian^{1*}, Babak Rezaee Afshar²

¹ Department of Biomedical Engineering Group, Bioelectronics, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran
niloofar.shojaeian@iau.ir

² Orthotics and Prosthetics, Faculty of Rehabilitation Sciences, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
babak.rezaee@srbiau.ac.ir

Abstract: This study examines various facial expressions using single-channel electromyography with minimal computational complexity for real-time applications. The electromyography data of facial muscles is derived from the electrical potential generated by different facial expressions, which can have varying values for each expression. In this study, electromyography data were recorded from the facial muscles of six female participants with a mean age of 25 ± 5 years. After applying a fourth-order Butterworth filter, the data were divided into 10-second windows, and 12 features were extracted in both time and frequency domains. To reduce computational load, Principal Component Analysis (PCA) was utilized for feature reduction, while classification of the data was performed using artificial neural networks and decision trees. After applying the filters and extracting features, the data were classified using multilayer perceptron classifiers with an accuracy of 73.57%, decision trees with an accuracy of 95.16%, MPL-PCA with an accuracy of 65.20%, and DT-PCA with an accuracy of 96.33%. Challenges in this study include the small number of participants and the single-channel nature of the data. Future studies could combine facial muscle data.

Keywords: Facial expressions, electromyography, artificial neural network, decision tree, principal component analysis

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025
 Received: 2025-01-22

Online ISSN: 2981-1295
 Accepted: 2025-05-06

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>
 Published: 2025-06-21

CITATION

Shojaeian, N., Rezaee Afshar, B., "The classification of selected facial expressions using single-channel electromyographic signals through artificial neural networks and decision trees", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 44-53, 2025.
 DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Electromyography (EMG) is a medical technique that records and analyzes the electrical activity of muscles. This method uses electrodes to capture the electrical signals generated by the muscles. According to recent articles, the main applications of electromyography include analyzing emotions from facial muscles in identifying and differentiating various emotions such as happiness, sadness, anger, etc. [1], as well as clinical diagnosis in identifying movement disorders and other medical conditions, such as swallowing difficulties in stroke patients [2], and controlling prosthetic devices in human-machine interfaces (HMI) [3], as well as biometric research on physiological states like muscle fatigue [1].

Facial muscles play a vital role in conveying emotional states. Facial expressions are a source of information that help in understanding an individual's emotional condition; thus, recognizing facial expressions is essential for effective communication and social interactions. Moreover, facial emotional disorders can be an early indicator of various medical conditions. For instance, stroke patients may experience swallowing difficulties as an early sign that can be detected through changes in facial expressions. This highlights the importance of facial expression recognition in clinical diagnosis and monitoring health conditions.

In this study, we will examine the relationship between electromyography and facial expressions and the differentiation of states through machine learning methods. It seems that machine learning methods, combined with signal processing algorithms, can effectively differentiate data related to single-channel electromyography.

2- Methodology

In this study, four female participants with an average age of 25 ± 2 years and a body mass index of 23.2 ± 2 kg/m² were present. All participants were healthy adults with no history of neuromuscular disease. These individuals participated voluntarily and with full awareness of the study's implementation process. To obtain facial data, it is necessary to place two electrodes connected to the input terminals (orange and red) at a maximum distance of 4 centimeters on the cheeks and a reference electrode (green) on the forehead bone or behind the ear. In this case, the electromyographic signal related to the face will be easily identifiable through the signal amplitude. Additionally, the seniam electrode placement method was used differentially. Data for each class of facial movements was recorded over a period of 10 seconds. Each individual repeated each movement 15 times in each class. Six classes of different facial movements (natural expression, yawning, laughing, studying, and chewing gum) were performed by each individual as shown in

Figure (2), and the corresponding data was recorded as per the sample in Figure (3). After this step, 12 features in the time and frequency domains that had the most variance among the selected features were extracted for data analysis from the windows. Initially, 24 features were chosen as effective features based on preliminary studies, which were ultimately narrowed down to 12 selected features after the feature extraction and variance analysis of the data. After the feature extraction phase and considering the numerous features extracted from the data, there is a need to reduce the computational burden. In the data classification stage, the use of machine learning methods is essential. For this purpose, the artificial neural network (ANN) is a computational model inspired by the structure of the human brain that is capable of learning and solving complex problems.

3- Results and discussion

The display of the data by two selected features in the time and frequency domain, namely RMS and MDF features, shows a good condition as indicated in Figure X. Based on this figure, which is for the third sample data, it has been determined that MDF is scattered between 90 to 155 units and RMS between 0.75 to 9, indicating that the densities reflect the validity of performance during the data acquisition period. According to the results obtained after extracting 12 features from the time and frequency domains, various classifiers with different accuracies, precision, features, and sensitivities were applied, including a multilayer perceptron with an accuracy of 73.57%, a decision tree with an accuracy of 95.16%, an MLP-PCA combination with an accuracy of 65.20%, and a DT-PCA combination with an accuracy of 96.33% for the purpose of detecting different states based on facial muscles; therefore, the highest classification accuracy was achieved when the decision tree was combined with principal component analysis. The results indicate that the classifications have various levels of accuracy, precision, and sensitivity. Ultimately, we concluded that the decision tree has higher accuracy and precision compared to the other classifiers.

4- Conclusion

Considering the results obtained, EMG has been a powerful tool, applicable in various fields, and has provided extensive capabilities to researchers and specialists. According to this study, EMG is used for emotion analysis and recognition tasks, and the decision tree performs very effectively in this process, providing results with a high percentage of accuracy. Combining it with principal component analysis improves performance. One of the limitations of this study is the use of single-channel signals. In other words, in this research, the human body is assumed to be symmetrical, disregarding the differences in individuals' physical characteristics.





طبقه بندی حالات منتخب صورت از طریق سیگنال الکترومایوگرافی

تک کاناله به وسیله شبکه عصبی مصنوعی و درخت تصمیم

نیلوفر شجاعیان^{۱*}، بابک رضایی افشار^۲

۱- گروه مهندسی پزشکی بیوالکتریک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران (niloofar.shojacian@iau.ir)

۲- گروه ارتز و پروتز، دانشکده توان بخشی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران (babak.rezace@srbiau.ac.ir)

چکیده: این مطالعه، به بررسی حالات مختلف صورت از طریق الکترومایوگرافی تک کاناله با حداقل پیچیدگی محاسباتی به منظور استفاده در کاربردهای واقعی به صورت بلادرنگ می پردازد. داده های الکترومایوگرافی عضلات صورت نشأت گرفته از پتانسیل الکتریکی اجرای حالات مختلف صورت است که به ازای حالات مختلف می تواند مقادیر متفاوتی را داشته باشد. در این مطالعه، داده های الکترومایوگرافی از حالات های مختلف عضلات صورت ۶ نفر از شرکت کنندگان زن با میانگین سنی 25 ± 5 سال ثبت گردید و پس از اعمال فیلتر باترورت مرتبه چهار، داده ها در پنجره های ۱۰ ثانیه ای تقسیم بندی شد و سپس ۱۲ ویژگی در حوزه زمان و فرکانس از آن استخراج گردید. برای کاهش حجم محاسباتی از روش کاهش ویژگی *PCA* و برای طبقه بندی داده ها از شبکه عصبی مصنوعی و درخت تصمیم استفاده شد. پس از اعمال فیلترها و استخراج ویژگی، داده ها توسط طبقه بندی های پرسپترون چندلایه با صحت ۷۳.۵۷ درصدی، درخت تصمیم با صحت ۹۵.۱۶ درصدی، *MPL-PCA* با صحت ۶۵.۲۰ درصدی و *DT-PCA* با صحت ۹۶.۳۳ درصدی مورد طبقه بندی قرار گرفتند. از چالش های این مطالعه می توان به تعداد کم افراد شرکت کننده و تک کاناله بودن اشاره کرد. همچنین در مطالعات آینده می توان داده های عضلات صورت را به صورت ترکیبی استفاده کرد.

واژه های کلیدی: حالات صورت، الکترومایوگرافی، شبکه عصبی مصنوعی، درخت تصمیم، تحلیل مؤلفه های اساسی

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

۱- مقدمه

است. همچنین اختلالات عاطفی صورت می توانند نشانگر اولیه انواع شرایط پزشکی باشند. به عنوان مثال، بیماران سکتة مغزی ممکن است مشکلات بلع را به عنوان یک علامت اولیه تجربه کنند که از طریق تغییرات در حالات صورت قابل تشخیص است. این امر اهمیت تشخیص حالات صورت را در تشخیص بالینی و پایش شرایط سلامتی نشان می دهد [۱]. پردازش دقیق اطلاعات عاطفی از طریق تحلیل فعالیت عضلات صورت می تواند به عنوان ابزاری برای بازخورد در زمان واقعی در سیستم های هوش مصنوعی و فناوری های نوین، از جمله رابط های انسان و ماشین به کار رود [۴]. در برخی مطالعات از سیگنال های اخذ شده از سنسورها برای بررسی حالات صورت بهره برده اند. به طور مثال در مطالعه ژانگ و همکاران از یک سیستم پوشیدنی مبتنی بر حسگر ToF و یادگیری عمیق بهره برداری شده که قادر به تشخیص هفت حالت چهره اصلی بوده است. این سیستم به گونه ای طراحی شده است که در دستگاه های کم مصرف و با استفاده از یک MCU (STM32F476) قابل اجرا باشد [۵]. در مطالعه اسیف حسین و همکاران از روشی نوآورانه

الکترومایوگرافی^۲ (EMG) یک تکنیک پزشکی است که به ثبت و تحلیل فعالیت الکتریکی عضلات می پردازد. این روش با استفاده از الکترودها، سیگنال های الکتریکی تولید شده توسط عضلات را ضبط می کند. مطابق مقالات اخیر کاربردهای اصلی الکترومایوگرافی، تحلیل احساسات از عضلات صورت در شناسایی و تفکیک انواع احساسات نظیر شادی، غم، عصبانیت و غیره [۱]، همچنین تشخیص بالینی در شناسایی اختلالات حرکتی و دیگر شرایط پزشکی، مانند مشکلات بلع در بیماران سکتة مغزی [۲] و نیز کنترل دستگاه های پروتزی در رابط های انسان و ماشین (HMI)^۳ [۳] و تحقیقات بیومتریک در مورد وضعیت های فیزیولوژیکی مانند خستگی عضلانی ارائه دهند [۱]. عضلات صورت نقش حیاتی در انتقال حالات عاطفی دارند. حالات صورت منبعی از اطلاعات هستند که به درک وضعیت عاطفی یک فرد کمک می کنند؛ بنابراین، تشخیص حالات صورت برای برقراری ارتباط مؤثر و تعاملات اجتماعی ضروری

* نویسنده مسئول

² Electromyography³ Human-machine interfaces

عصبی - عضلانی نداشتند. این افراد به صورت داوطلبانه و با آگاهی کامل از روند اجرای مطالعه در آن شرکت کردند. فرایند انجام مطالعه مطابق با شکل (۱) پیاده سازی شد. همچنین در این پژوهش، برای جمع آوری داده ها از دستگاه الکترومایوگرافی تک کاناله مدل *sEMG* شرکت ساب تل استفاده شد. این دستگاه دارای امپدانس ورودی ۲ گیگا اهم و نسبت رد مد مشترک (*CMRR*)^۳ برابر با ۱۲۰ دسی بل است. این مازول به منظور دریافت و تقویت سیگنال های حیاتی، بهویژه الکتروکاردیوگرام، به کار گرفته شد. مازول مذکور با بهره ۸۸۰ و فرکانس بالاگذر ۴۰۰ هرتز و فیلتر پایین گذر ۲۰ هرتز با ولتاژ ۵ ولت جریان مستقیم تغذیه می شود. قبل از انجام الکتروگذاری، لازم است از دستیابی امپدانس پوست به سطح قابل قبول اطمینان حاصل شود. پروسه آماده سازی پوست باید به گونه ای انجام شود که با استفاده از پد الکلی یا پنبه ای مرطوب، سطح پوست به آرامی سابیده شود تا مقاومت پوست به حداقل برسد. هرچند ممکن است بخشی از پوست در اثر سابیدن قرمز شود، اما نباید آسیبی جدی به آن وارد گردد. با انجام صحیح آماده سازی پوست، الکترودها ارتباط بهتری با بدن خواهند داشت. الکترودهای مورد استفاده به صورت چسبی و از جنس نقره یا نقره کلرید ساخته شده اند.

برای دریافت داده های مربوط به صورت، لازم است دو الکترو متصل به پایه های ورودی (نارنجی و قرمز) با فاصله حداکثر ۴ سانتی متر بر روی گونه ها قرار گیرند و یک الکترو مرجع (سبزرنگ) روی استخوان پیشانی یا پشت گوش قرار گیرد. در این حالت، سیگنال الکترومایوگرافی مرتبط با صورت به آسانی از طریق دامنه سیگنال قابل شناسایی خواهد بود. همچنین از روش الکتروگذاری *seniam* به صورت تفاضلی استفاده گردید. علاوه بر آن در زمان ثبت سیگنال، باید در وضعیت کاملاً آرام و ریلکس باشید؛ زیرا فعالیت های عضلانی می تواند به عنوان نویز بر روی سیگنال مغزی تأثیر بگذارد. لازم است به این نکته توجه شود که الکترودها باید به میزان کافی ژل داشته باشند. این ژل برای ایجاد اتصال صحیح ضروری است و موجب تسهیل رسانایی جریان می شود. در صورتی که مقدار ژل به اندازه کافی نباشد، می توان با خیس کردن پوست با آب، این کمبود را جبران کرد. قابل توجه است که ابزار باید از هرگونه سیستم متصل به برق شهری فاصله داشته باشد تا با نویز ۵۰ یا ۶۰ هرتز برق شهر مواجه نشود. در این پژوهش به جهت کاهش نویز مربوط به برق شهر، تا حد ممکن فضا ایزوله گردید. در شکل (۲) نحوه قرارگیری الکترودهای *EMG* نشان داده شده است. برای مشاهده و ذخیره سیگنال *EMG* بر روی نمایشگر رایانه، از برد آردوینو مدل *UNO* و نرم افزار *Serial Oscilloscope* به عنوان رابط سخت افزاری و نرم افزاری استفاده می کنیم. در این سیستم، آردوینو به عنوان مبدل آنالوگ به دیجیتال عمل می کند و داده های آنالوگ با دامنه بین ۰ تا ۵ ولت را به داده های دیجیتال باینری تبدیل می نماید. برد آردوینو *UNO* دارای رزولوشن ۱۰ بیت و ۱۰۲۴ سطح مجزا است. همچنین، نرخ نمونه برداری برای دریافت سیگنال *EMG* بر روی ۲۰۰۰ هرتز تنظیم شده است، زیرا فرکانس مورد نظر ما بین ۲۰ تا ۴۵۰ هرتز قرار دارد.

برای تشخیص حالات صورت استفاده کرده است که ترکیبی از الکترومایوگرافی صورت (*fEMG*)^۱، آنالیز کورتوگرام و شبکه های عصبی کانولوشنی (*CNN*)^۲ است. در واقع این مقاله از یک روش قوی استفاده می کند که *fEMG* و تکنیک های یادگیری عمیق، بهویژه *CNN* ها، را برای تشخیص مؤثر حالات صورت ادغام می کند. این رویکرد چندوجهی از طریق پروتکل های آزمایش دقیق تأیید شده و دقت بالایی در طبقه بندی حالات احساسی نشان می دهد [6]. علاوه بر روش های سیگنالی، روش های مبتنی بر تصویر نیز در مقالات اخیر بیشتر استفاده شده است [۷-۹]. مثلاً مقاله فرنک و همکاران از الگوریتم های پیشرفته برای دقت در شناسایی حالات عاطفی استفاده کرده است [۱۰].

بطور کلی مطالعات پیشین از روش های نوآورانه ای برای تشخیص حالات صورت استفاده کرده اند اما هر کدام محدودیت های قابل توجهی دارند که ممکن است کارایی و قابلیت استفاده از آنها را دچار مشکلاتی کند. چالش های مطالعات شامل کیفیت سنسور، حساسیت به محیط، وابستگی به فناوری های خاص، مشکلات حریم خصوصی، عدم تفکیک جنسیت، عدم مقایسه با سایر مطالعات و نیاز به آزمایش گسترده در دنیای واقعی است. علاوه بر این، موضوعاتی مانند عدم تعادل در مجموعه داده ها و نیاز به محاسبات سنگین می تواند توسعه سیستم های قوی را با مشکل مواجه کند [1, 4, 5, 11-20]. دلیل انتخاب حرکات (خنده، جویدن آدامس، خواندن کتاب، حالت نرمال و حالت خمیازه) این است که در مطالعات پیشین بر روی این حالت ها مطالعه صورت گرفته است [۲۱-۲۴]. نوآوری های قابل توجهی در این پژوهش بر روی انتخاب حرکات انجام شده است؛ به گونه ای که اکثر حرکات مورد تفکیک در این مطالعه بیانگر حالات روحی فردی در حال رانندگی است که نتایج این پژوهش را می تواند به سمت موضوع آنالیز خستگی و خواب آلودگی از طریق بررسی همین حالات چهره بکشاند. علاوه بر این ترکیب و مقایسه روش های طبقه بندی در این مطالعه می تواند به بهبود قدرت تفکیک داده ها بینجامد. لازم به ذکر است مطالعات قبلی برای اخذ داده ها از چندین کانال الکترومایوگرافی استفاده کرده بودند که مشکلات مربوط به الکتروگذاری و همچنین مشکلات مداخله در رفتار نرمال فرد را به همراه داشت که اخذ تک کاناله این مشکلات را به حداقل می رساند.

در این مطالعه، به بررسی موضوع ارتباط بین الکترومایوگرافی و حالات صورت و تفکیک حالات از طریق روش های یادگیری ماشین خواهیم پرداخت. به نظر می رسد روش های یادگیری ماشین در ترکیب با الگوریتم های پردازش سیگنال می توانند تفکیک داده های مربوط به الکترومایوگرافی تک کاناله را به خوبی انجام دهند.

۲- مواد و روش ها

در این پژوهش، چهار نفر از شرکت کنندگان زن با میانگین سنی 25 ± 5 سال و شاخص توده بدنی 22 ± 23 کیلوگرم بر مترمربع حضور داشتند. تمامی شرکت کنندگان، افراد بالغ و سالم بودند و هیچ گونه سابقه بیماری

³ common mode rejection ratio

¹ Facial Electromyography

² convolutional neural network



داده‌های هر کلاس از حرکات صورت، طی مدت ۱۰ ثانیه ثبت شد. هر فرد در هر کلاس، هر حرکت را ۱۵ بار تکرار کرد. شش کلاس حرکات مختلف صورت (حالت طبیعی، خمیازه، خنده، مطالعه، و جویدن آدامس) مطابق شکل (۲)، توسط هر فرد اجرا و داده‌های مربوطه مطابق نمونه شکل (۳) ثبت شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB* نسخه 2018a انجام شد. پس از وارد کردن داده‌ها به نرم‌افزار و اصلاح خط مبنا، یک فیلتر میان‌گذر باترورث مرتبه ۴ بر روی داده‌ها اعمال شد تا داده‌های خارج از محدوده فرکانسی مورد نظر تضعیف شوند. با افزایش مرتبه فیلتر، پاسخ فرکانسی آن به پاسخ ایده‌آل (دیوار آجری) نزدیک‌تر می‌شود. پس از آزمایش چندین مرتبه، بهینه‌ترین مرتبه برای فیلتر انتخاب گردید. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از تکنیک پنجره‌گذاری با همپوشانی صفر درصد استفاده شد. این تکنیک به تقسیم داده‌ها درون پنجره‌های ۱۰ ثانیه‌ای به مدت ۱۰ ثانیه با همپوشانی صفر در میان کمک نمود. پس از انجام این کار، ۱۲ ویژگی در حوزه‌های زمان و فرکانس که از میان ویژگی‌های منتخب دارای بیشترین واریانس بودند به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از پنجره‌ها استخراج شد. ۲۴ ویژگی در ابتدا بر اساس مطالعات اولیه به‌عنوان ویژگی‌های مؤثر انتخاب شد که نهایتاً پس از استخراج ویژگی‌ها و بررسی واریانس داده‌ها، ۱۲ ویژگی منتخب در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

میانگین، یک مفهوم آماری است که به‌عنوان یک نوع "معدل" برای مجموعه‌ای از داده‌ها و اعداد تعریف می‌شود که در (۱) آمده است.

$$Mean = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

که در این رابطه X_i نمایانگر مقدار هر یک از نقاط در داده و N نشانگر تعداد نمونه‌های پنجره است. میانه، یکی از ویژگی‌های آماری متداول حوزه زمان است که در (۲) آمده است.

$$\begin{cases} x_{\frac{n+1}{2}}, & \text{if } n \text{ is odd} \\ x_{\frac{n}{2}} + x_{(\frac{n}{2}+1)}, & \text{if } n \text{ is even} \end{cases} \quad (2)$$

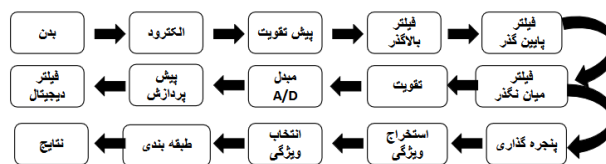
که در این رابطه X لیست مرتب شده مقادیر در مجموعه داده‌ها و n تعداد مقادیر در مجموعه داده‌ها است. واریانس، یک معیار آماری است که در واقع میزان پراکندگی یا تنوع داده‌ها نسبت به میانگین می‌پردازد. به عبارت دیگر، واریانس فاصله داده‌ها از میانگین آنها را نشان می‌دهد و از طریق (۳) بیان می‌شود.

$$\begin{cases} x_{(n+1)/2}, & \text{if } n \text{ is odd} \\ x_{\frac{n}{2}} + x_{(\frac{n}{2}+1)}, & \text{if } n \text{ is even} \end{cases} \quad (3)$$

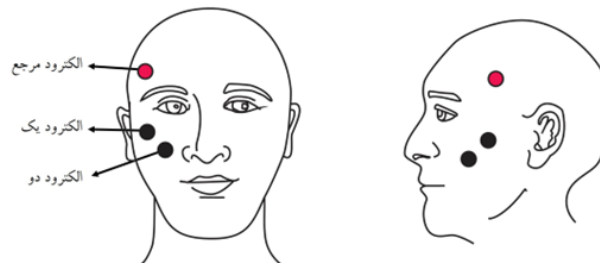
جزر میانگین مربعات (RMS)^۱، یک معیار آماری است که جهت اندازه‌گیری اندازه یا شدت یک مجموعه از مقادیر استفاده می‌شود. رابطه آن به‌صورت (۴) بیان می‌شود.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (4)$$

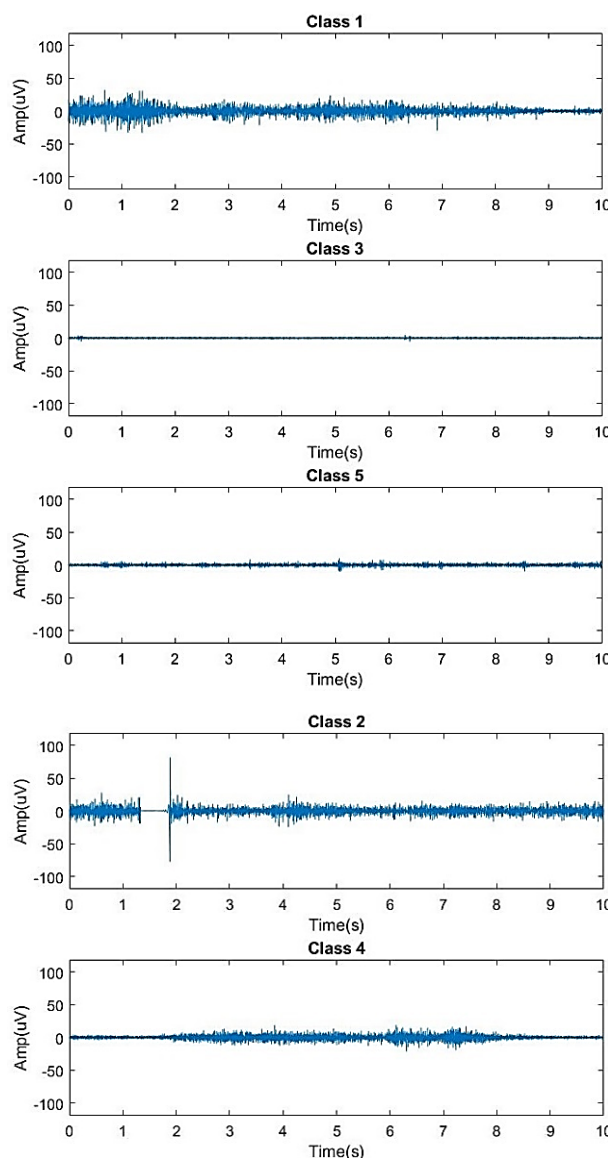
که در آن، RMS ریشه میانگین مربع، n تعداد مربعات و X_i هر مقدار است.



شکل (۱): چارت مراحل پردازش سیگنال در این مطالعه



شکل (۲): نحوه قرار گرفتن الکتروود EMG



شکل (۳): نمونه داده‌های هر کلاس

¹ Root Mean Squared



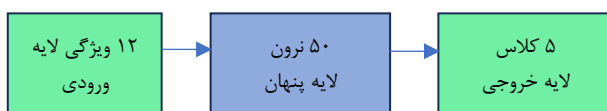
تجزیه و تحلیل کرد. این متغیرهای جدید معمولاً به عنوان مؤلفه های اصلی شناخته می شوند که بر اساس شدت همبستگی با داده ها ترتیب داده می شوند. با این حال، باید به این نکته توجه کرد که تحلیل مؤلفه های اصلی تنها یک روش کاهش ابعاد است و قادر به حل مشکلات ناشی از عدم تعادل داده ها یا شرایط خاص دیگر نمی باشد [۲۵].

در مرحله طبقه بندی داده ها استفاده از روش های یادگیری ماشین ضروری است. به همین منظور شبکه عصبی مصنوعی 2 (ANN) یک مدل محاسباتی الهام گرفته از ساختار مغز انسان است که قادر به یادگیری و حل مسائل پیچیده است. این شبکه ها از نودها (نورون ها) تشکیل شده که به یکدیگر متصل هستند و می توانند سیگنال ها را پردازش کنند. اجزای اصلی آن شامل ورودی ها یعنی داده های ورودی که به شبکه وارد می شوند، لایه های پنهان یعنی لایه هایی که بین لایه ورودی و خروجی قرار دارند و مسئول پردازش اطلاعات و استخراج الگوها هستند، خروجی ها که نمایانگر خروجی نهایی شبکه است که پیش بینی یا تصمیم گیری را نشان می دهد، وزن ها و بایاس ها که شامل ارتباط بین نورون ها و بایاس ها است [۲۶].

علاوه بر روش های با نظارت یادگیری ماشین همانند شبکه عصبی مصنوعی الگوریتم های دیگری نیز امروزه مورد توجه است. از این میان درخت تصمیم 3 (DT)، یک مدل پیش بینی آماری است که به وسیله آن می توان به کمک یک درخت تصمیم گیری کرد. این درخت بر اساس ویژگی های ورودی داده ها و روابط بین آن ها، به یک تصمیم نهایی برسد. درخت تقسیم یک روش تفکیکی است که در آن، داده ها را بر اساس ویژگی های آن ها به شاخه های مختلف تقسیم می کند. این شاخه ها هر کدام را می توان به شاخه های کوچک تر و کوچک تر تقسیم کرد تا در نهایت به یک نتیجه یا کلاس پیش بینی برسد. فازهای اصلی درخت تقسیم به ۴ مرحله تقسیم می شوند. مرحله اول شامل انتخاب ویژگی است که در این مرحله ویژگی های داده مشخص می شوند، سپس در مرحله بعد از روش های تفکیکی برای تقسیم کردن داده ها استفاده می کنیم، در مرحله ۳ پیش بینی برای هر داده بر اساس تقسیم هایی که صورت گرفته است، انجام می شود، سپس در مرحله آخر پارامترهای درخت تصمیم گیری انتخاب می شوند. همچنین ۷۰ درصد از داده های جمع آوری شده برای آموزش و ۳۰ درصد باقیمانده برای آزمایش مدل طبقه بندی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی طبقه بندی از مؤلفه صحت مطابق با (۱۲) استفاده می شود.

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (11)$$

در این رابطه TP نشانگر مثبت صادق، TN نشانگر منفی صادق، FP نشانگر مثبت کاذب، FN نشانگر منفی کاذب است.



شکل (۴): ساختار شبکه عصبی مصنوعی

تعداد عبور از صفر، به تعداد دفعاتی گفته می شود که یک سیگنال (معمولاً یک سیگنال متغیر یا زمانی) از مقدار صفر عبور کرده باشد که در (۵) آمده است.

$$\sum_{i=1}^{n-1} [sgn(x_i \times x_{i+1}) \cap |x_i - x_{i+1}|] \geq \text{threshold} \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \geq th \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$iEMG$ ، یا همان الکترومایوگرافی خام، مجموع داده های سیگنال الکترومایوگرافی در یک پنجره است که نشانگر تقارن داده ها است و از طریق (۶) محاسبه می شود.

$$iEMG = \sum_{i=1}^N X_i \quad (6)$$

مرتبه v ، به وابستگی عملکرد یک الگوریتم یا تابع به پارامتر ورودی اشاره دارد و به صورت (۷) تعریف می شود.

$$Vorder = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^v \right)^{\frac{1}{v}} \quad (7)$$

میانگین فرکانسی، به میانگین فرکانس های موجود در یک سیگنال یا تابع زمانی اشاره دارد و در (۸) آمده است.

$$\sum_{j=1}^m f_j P_j / \sum_{j=1}^m P_j \quad (8)$$

که در این رابطه مقادیر P از طریق محاسبه تبدیل فوریه سریع برای هر طیف فرکانسی به دست می آید. میانه فرکانسی، بیان می کند که در چه نقطه ای از توزیع فرکانس، ۵۰ درصد از انرژی یا قدرت سیگنال تحت پوشش قرار گرفته است و به صورت (۹) تعریف می شود.

$$\sum_{j=1}^{MDF} P_j = \sum_{j=MDF}^M P_j = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M P_j \quad (9)$$

پیک فرکانسی، فرکانسی است که ماکسیمم توان در آن به نمایش درمی آید که در (۱۰) آورده شده است.

$$PKF = \max(P_j) \quad j = 1 \dots \quad (10)$$

میانگین قدرت، فرکانس متوسط یک طیف به صورت مجموع حاصل ضرب شدت طیف (به دسی بل) و فرکانس تقسیم بر مجموع کل شدت طیف گرام محاسبه می شود.

$$f_{mean} = \frac{\sum_{i=0}^n I_i \cdot f_i}{\sum_{i=0}^n I_i} \quad (11)$$

قدرت مجموع، مجموع حاصل ضرب شدت طیف و فرکانس که پس از استخراج از طریق تبدیل فوریه سریع به دست می آید.

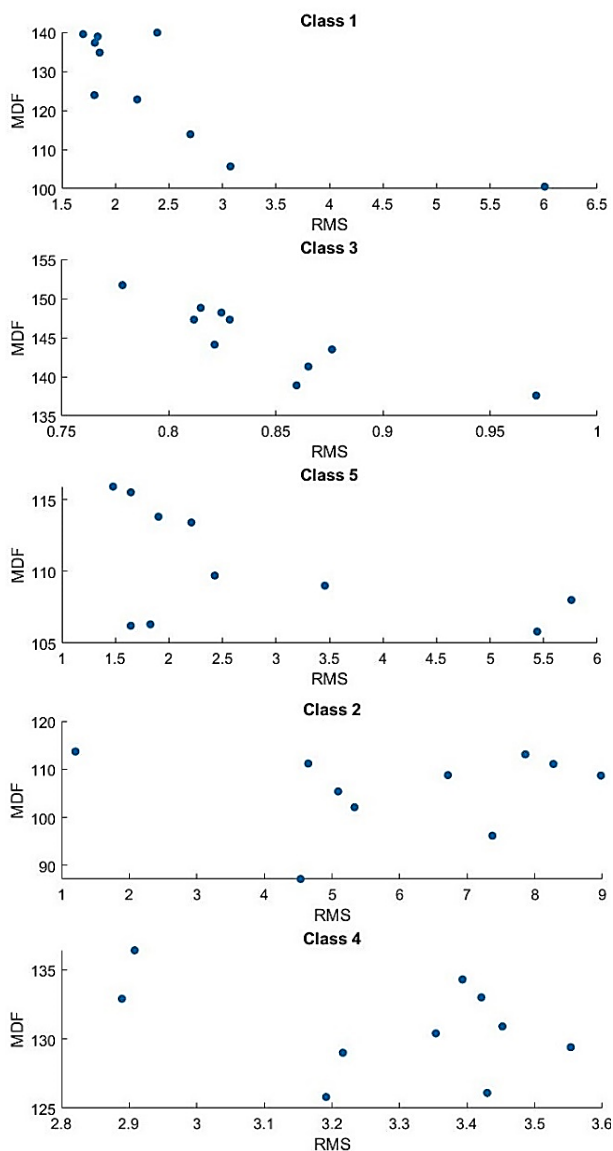
پس از مرحله استخراج ویژگی و باتوجه به تعدد ویژگی های مستخرج از داده ها نیاز به کاهش بار محاسباتی احساس می شود. تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA)^۱ یک روش آماری است که به منظور تبدیل مجموعه ای از متغیرها به متغیرهای جدید طراحی شده است. این متغیرهای جدید، به صورت کامل یا جزئی، از ترکیب متغیرهای اولیه تشکیل می شوند. هدف اصلی این روش، کاهش بعد داده ها و همچنین کاهش تعداد متغیرهای ورودی است که به نوبه خود می تواند پیچیدگی مدل های آماری را کاهش دهد. در تحلیل مؤلفه های اصلی می توان متغیرهای اولیه را به صورت خطی به عنوان ترکیب خطی از متغیرهای جدید

³ Decision Tree

¹ Principal Component Analysis

² Artificial Neural Networks





شکل (۵): نمودار ویژگی‌ها بر اساس دو ویژگی منتخب در حوزه فرکانس یعنی RMS و MDF

جدول (۱): مقادیر حاصل از طبقه‌بندی توسط MLP DT با استفاده و بدون استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تعداد نفرات	MLP	DT	MLP-PCA	DT-PCA
نفر اول	۴۲.۸۶٪	۹۸٪	۴۲.۸۶٪	۹۸٪
نفر دوم	۸۵٪	۱۰۰٪	۷۱.۴۳٪	۱۰۰٪
نفر سوم	۷۱.۴۳٪	۹۲٪	۲۸.۵۷٪	۹۸٪
نفر چهارم	۸۵.۷۱٪	۹۲٪	۷۱.۴۳٪	۹۴٪
نفر پنجم	۸۶٪	۹۵٪	۵۵.۲۸٪	۹۵٪
نفر ششم	۷۰.۴۳٪	۹۴٪	۶۵.۲۳٪	۹۳٪
میانگین	۷۳.۵۷٪	۹۵.۱۶٪	۶۵.۲۰٪	۹۶.۳۳٪

باتوجه به آنچه در مراحل قبلی انجام شد، داده‌ها امکان تفکیک یافته و میزان تفکیک داده‌ها به صورت مقادیر آماری از طریق مؤلفه سنجشی صحت اندازه‌گیری خواهد شد. همچنین بررسی مقدار صحت تفکیک نمایه مناسبی برای کارآمدی روش‌های پردازشی خواهد بود.

۳- نتایج

نتایج اصلی این پژوهش شامل داده‌های جمع‌آوری شده از سیگنال‌های الکترومایوگرافی (EMG) چهار فرد است که در حین انجام شش کلاس منتخب حرکات صورت مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، ۱۲ ویژگی از داده‌ها استخراج شد که شامل ۷ ویژگی در حوزه زمان و ۵ ویژگی در حوزه فرکانس بود. در مجموع ۳۰۰ داده مختلف از افراد جمع‌آوری شد. داده‌های هر کلاس از حرکات صورت، در مدت ۱۰ ثانیه ثبت گردید. هر حرکت توسط هر فرد ۱۵ بار تکرار گردید. همچنین پنج کلاس از حرکات مختلف صورت شامل (حالت طبیعی، خمیازه، خنده، مطالعه، و جویدن آدامس) ثبت گردید.

نمایش داده‌ها توسط دو ویژگی منتخب در حوزه زمان و فرکانس یعنی ویژگی‌های RMS و MDF وضعیت خوبی را مطابق شکل X نشان می‌دهد. بر اساس این شکل که برای داده‌های نمونه سوم است، مشخص گردیده MDF در کلاس‌های مختلف بین ۹۰ تا ۱۵۵ واحد و RMS بین ۰/۷۵ تا ۹ پراکنده شده است که تراکم‌ها را در بخشی از نمودار مذکور نشان‌دهنده صحت عملکرد در زمان داده‌گیری است. اجرای روش‌های طبقه‌بندی توسط ۲ طبقه‌بند پرسپترون چندلایه MLP و درخت تصمیم انجام شد. حالاتی که از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ویژگی استفاده شده یا استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی نادیده گرفته شده است که در جدول (۱) آمده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده پس از استخراج ۱۲ ویژگی از حوزه زمان و فرکانس، طبقه‌بندهای مختلف با دقت، صحت، ویژگی‌ها و حساسیت‌های مختلف شامل پرسپترون چندلایه با صحت ۷۳.۵۷ درصدی، درخت تصمیم با صحت ۹۵.۱۶ درصدی، ترکیب MLP-PCA با صحت ۶۵.۲۰ درصدی و DT-PCA با صحت ۹۶.۳۳ درصدی باهدف تشخیص حالات مختلف از روی عضلات صورت اعمال شدند؛ بنابراین بالاترین صحت تفکیک برای طبقه‌بندی در زمانی که درخت تصمیم با تحلیل مؤلفه‌های اصلی ترکیب شده بود به دست آمد. نتایج طبقه‌بندی توسط ماتریس تصمیم نیز به جهت بهره‌برداری در راستای بهبود عملکرد شبکه برای تمامی کلاس‌ها و افراد اجرا گردید که نمونه‌ای از آن مطابق شکل (۶) است. نتیجه‌های نشان‌داده‌شده حاکی از آن است که طبقه‌بندی‌ها دارای دقت، صحت و حساسیت‌های مختلفی بوده‌اند. نهایتاً به این نتیجه رسیدیم که درخت تصمیم از نتایج، صحت و دقت بالاتری نسبت به دیگر طبقه‌بندها برخوردار است.

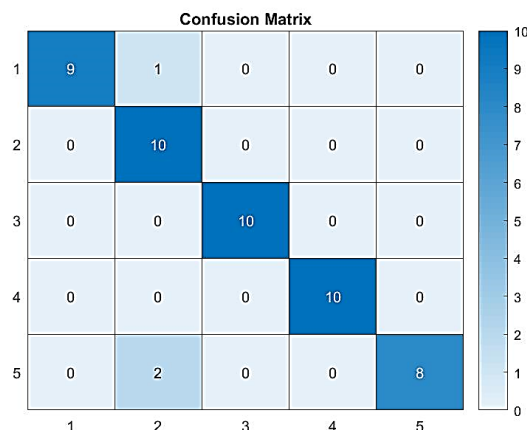


۵- جمع بندی

باتوجه به نتایج حاصل شده، *EMG* به عنوان ابزاری قدرتمند، در حوزه های گوناگونی کاربرد داشته و امکانات گسترده ای را در اختیار محققان و متخصصان قرار داده است. این کاربردها می تواند در حوزه های مختلف از جمله هوش مصنوعی، تحلیل حالات احساسی افراد، بررسی فرایندهای شناختی، تشخیص اختلالات روان شناختی، تشخیص فلج عضلات صورت، پایش پیشرفت درمان و طراحی ربات های اجتماعی باشد. ترکیب طبقه بندی های پرسپترون چند لایه و تحلیل مؤلفه های اصلی به عنوان یک رویکرد موثر در یادگیری ماشین به منظور بهبود دقت پایش بینی و کاهش ابعاد داده ها شناسایی می شود. طبق تحقیقاتی که در سال های اخیر انجام شده است، استفاده از تحلیل مؤلفه های اصلی به عنوان پایش پردازش، قبل از طبقه بندی با *MLP* باعث افزایش دقت نسبت به مدل تحلیل مؤلفه های اصلی می شود. نهایتاً ترکیب این دو مدل با یکدیگر علاوه بر اینکه دقت را افزایش می دهد، به افزایش توانایی تفسیر نتایج هم کمک می کند. همچنین طبق مطالعه ارکلی و همکاران، ترکیب این دو طبقه بند با یکدیگر دقت و کارایی را به طرز قابل توجهی بالا برد و در مطالعه ما نیز با ترکیب این دو با یکدیگر، مقادیر بالا رفته است [۲۷]. ضمن اینکه در مطالعه وورگاس و همکاران نیز مشخص گردیده استفاده از تحلیل مؤلفه های اصلی در کنار *MLP* موجب بهبود صحت طبقه بندی می شود [28]. که این نتیجه در مطالعه اخیر نیز حاصل گردیده است هرچند در مطالعه اخیر علاوه بر این موضوع مشخص گردید تحلیل مؤلفه های اصلی در کنار درخت تصمیم نیز باعث افزایش صحت طبقه بندی می شود.

طبق این مطالعه، *EMG* برای کارهای تحلیل و تشخیص احساسات مورد استفاده قرار می گیرد و درخت تصمیم در این روند بسیار قوی عمل کرده و نتیجه را با درصد دقت بالایی می دهد و ترکیب آن با تحلیل مؤلفه های اصلی، باعث بهبود عملکرد می شود. از محدودیت های این مطالعه، می توان به تک کاناله بودن سیگنال ها اشاره کرد. به عبارت دیگر، در این تحقیق، بدن انسان به صورت متقارن فرض شده و از تفاوت های موجود در ویژگی های بدنی افراد صرف نظر شده است. این تصمیم ممکن است تأثیراتی بر دقت و تعمیم پذیری نتایج به دست آمده داشته باشد. در واقع، با نادیده گرفتن تفاوت های فردی، ممکن است برخی از جنبه های مهم و قابل توجه در تحلیل داده ها تحت تأثیر قرار گیرد؛ بنابراین، این نکته باید در تفسیر یافته ها و کاربردهای عملی مطالعه در نظر گرفته شود. همچنین از مزیت های آن این است که ساده تر هست و الکتروگذاری و تعداد داده کمتری مورد استفاده قرار گرفت. به عنوان مثال در مقاله ساتو و همکاران ۶ کانال استفاده کردید که موجب بالا بردن دقت نهایی گردید [۲۹].

مطابق جدول (۲)، در مطالعات گذشته تعداد کانال های استفاده شده نسبت به مطالعه حاضر بیشتر بوده و نتیجه حاصل با تعداد کانال کمتری بوده است. کانال های کمتر مداخلات کمتری در دیتاگیری ایجاد می کند. همچنین تعداد کلاس های مطالعات [۳۱] - [۳۲] از مطالعه فعلی کمتر بوده و در مطالعاتی هم که تعداد کلاس ها بالاتر بوده، درصد صحت



شکل (۶): طبقه بندی توسط ماتریس تصمیم

جدول (۲): مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین

مرجع	تعداد کانال	روش تفکیک	تعداد کلاس	درصد صحت
[۲۹]	۱۴	الگوریتم های طبقه بندی KNN, SVM	۱۱	۸۳.۹٪
[۳۰]	۱۶	الگوریتم های طبقه بندی SVM و ICA	۵	۷۱.۱۳٪
[۳۱]	۱	شبکه عصبی RMS, VAR, IEMG	۴	۴۱.۲٪
[۳۲]	۱۰	تحلیل فریم با استفاده از نرم افزار Affectiva	۳	۶۷.۵۳٪

۴- بحث

در این مطالعه، دوازده شاخص متمایز از داده های گردآوری شده در دو بازه زمانی و فرکانسی استخراج گردید. هر یک از این شاخص ها قابلیت تفکیک پذیری منحصربه فردی را به نمایش می گذاشتند و دربردارنده اطلاعات و تغییراتی ارزشمند برای تفکیک داده ها بودند. بر این اساس، هر شاخصی که از درصد بالاتری برخوردار بود، بهتر از دیگر داده ها بود. همچنین، حسگرهای به کاررفته در این مطالعه، اطلاعات بسیاری را از فعالیت های عضله در اختیار ما قرار دادند. طبق مطالعه صورت گرفته، پس از دریافت و ثبت سیگنال های *EMG*، مشاهده گردید که دامنه این سیگنال ها، بر حسب نوع حرکت، نوسانات و تغییرات قابل توجهی را از خود بروز می دهد. این تغییرات، به گونه ای معنادار و قابل تأمل، حرکات مختلف و متنوع (از جمله خنده، جویدن آدامس، مطالعه و کتاب خوانی، حالت عادی و نرمال، و خمیازه کشیدن) را از یکدیگر متمایز می سازد و هر یک را با امضایی منحصربه فرد و هویتی مستقل مشخص می نماید. این تفاوت های مشهود و محسوس، حاکی از آن است که سیگنال *EMG*، ابزاری کارآمد و توانا برای تفکیک الگوهای حرکتی گوناگون به شمار می آید. همچنین مشخص گردید تحلیل مؤلفه های اصلی می تواند بهبود قابل توجهی در نتایج طبقه بندی ما ایجاد نماید. این بهبود در ترکیب با درخت تصمیم نتایج بالاتری از صحت را با میانگین حدود ۹۶.۳۳ درصد ایجاد کرد.

- [۱۰] S. Casaccia, E. J. Sirevaag, M. G. Frank, J. A. O'Sullivan, L. Scalise, and J. W. Rohrbaugh, "Facial muscle activity: High-sensitivity noncontact measurement using laser Doppler vibrometry," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3060564>
- [۱۱] Q. Zhu, G. Lu, and J. Yan, "Valence-arousal model based emotion recognition using EEG, peripheral physiological signals and facial expression," in *Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Soft Computing*, 2020, pp. 81-85. <https://doi.org/10.1145/3380688.3380694>
- [۱۲] A. Kelati, J. Plosila, and H. Tenhunen, "Machine learning for semg facial feature characterization," in *2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, ۲۰۱۹, pp. 169-174. <https://doi.org/10.23919/SPA.2019.8936818>
- [۱۳] S. S. Blom, H. Aarts, and G. R. Semin, "Lateralization of facial emotion processing and facial mimicry," *Laterality*, vol. 25, pp. 259-274, 2020. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2019.1657127>
- [۱] V. Kehri and R. Awale, "A facial EMG data analysis for emotion classification based on spectral kurtogram and CNN," *International Journal of digital signals and smart systems*, vol. 4, pp. 50-63, 2020. <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2020.106072>
- [۲] K.-H. S. Chen and R. Chen, "Principles of electrophysiological assessments for movement disorders," *Journal of movement disorders*, vol. 13, p. 27, 2020. <https://doi.org/10.14802/jmd.19064>
- [۳] C. L. Kok, C. K. Ho, F. K. Tan, and Y. Y. Koh, "Machine learning-based feature extraction and classification of emg signals for intuitive prosthetic control," *Applied Sciences*, vol. 14, p. 5784, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14135784>
- [۴] M. Gjoreski, I. Kiprijanovska, S. Stankoski, I. Mavridou, M. J. Broulidakis, H. Gjoreski, et al., "Facial EMG sensing for monitoring affect using a wearable device," *Scientific reports*, vol. 12, p. 16876, 2022.
- [۵] J. Zhang, X. Xie, G. Peng, L. Liu, H. Yang, R. Guo, et al., "A Real-Time and Privacy-Preserving Facial Expression Recognition System Using an AI-Powered Microcontroller," *Electronics*, vol. 13, p. 2791, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13142791>
- [۶] S. A. Hussain and A. S. A. Al Balushi, "A real time face emotion classification and recognition using deep learning model," in *Journal of physics: Conference series*, 2020, p. 012087. 10.1088/1742-6596/1432/1/012087
- [۷] E. S. Agung, A. P. Rifai, and T. Wijayanto, "Image-based facial emotion recognition using convolutional neural network on emognition dataset," *Scientific reports*, vol. 14, p. 14429, 2024.
- [۸] J. Wei, G. Hu, X. Yang, A. T. Luu, and Y. Dong, "Learning facial expression and body gesture visual information for video emotion recognition," *Expert Systems with Applications*, vol. 237, p. 121419, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121419>
- [۹] J. Basavaiah, A. A. Anthony, N. K. HN, and C. M. Patil, "Facial Emotion Recognition: A Review on State-of-the-art Techniques," in *2024 4th International Conference on Data Engineering and Communication Systems (ICDECS)*, 2024, pp. 1-6.

تفکیک کمتر بوده بنابراین با استفاده از روش‌های پردازشی ترکیبی با تعداد کانال کمتر و تعداد کلاس‌های بیشتر، درصد صحت بالاتری حاصل گردید. در مطالعات آینده می‌توان ترکیبی از داده‌های عضلات صورت را استفاده کرد، همچنین می‌توان تعداد حرکات انتخابی صورت را بیشتر کرد و حرکات بیشتری از صورت را مورد بررسی قرارداد. ضمن اینکه با استفاده از هم‌زمان‌سازی سنسورها، تأثیر مؤلفه‌های مغزی روی عضلات صورت را بررسی کنیم. این رویکرد نه تنها به درک عمیق‌تری از ارتباطات میان مغز و حرکات صورت کمک می‌کند، بلکه می‌تواند زمینه‌ساز پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه‌های مختلفی مانند روان‌شناسی، عصب‌شناسی و حتی هنرهای زیبا گردد.

مراجع

- [۱] V. Kehri and R. Awale, "A facial EMG data analysis for emotion classification based on spectral kurtogram and CNN," *International Journal of digital signals and smart systems*, vol. 4, pp. 50-63, 2020. <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2020.106072>
- [۲] K.-H. S. Chen and R. Chen, "Principles of electrophysiological assessments for movement disorders," *Journal of movement disorders*, vol. 13, p. 27, 2020. <https://doi.org/10.14802/jmd.19064>
- [۳] C. L. Kok, C. K. Ho, F. K. Tan, and Y. Y. Koh, "Machine learning-based feature extraction and classification of emg signals for intuitive prosthetic control," *Applied Sciences*, vol. 14, p. 5784, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14135784>
- [۴] M. Gjoreski, I. Kiprijanovska, S. Stankoski, I. Mavridou, M. J. Broulidakis, H. Gjoreski, et al., "Facial EMG sensing for monitoring affect using a wearable device," *Scientific reports*, vol. 12, p. 16876, 2022.
- [۵] J. Zhang, X. Xie, G. Peng, L. Liu, H. Yang, R. Guo, et al., "A Real-Time and Privacy-Preserving Facial Expression Recognition System Using an AI-Powered Microcontroller," *Electronics*, vol. 13, p. 2791, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13142791>
- [۶] S. A. Hussain and A. S. A. Al Balushi, "A real time face emotion classification and recognition using deep learning model," in *Journal of physics: Conference series*, 2020, p. 012087. 10.1088/1742-6596/1432/1/012087
- [۷] E. S. Agung, A. P. Rifai, and T. Wijayanto, "Image-based facial emotion recognition using convolutional neural network on emognition dataset," *Scientific reports*, vol. 14, p. 14429, 2024.
- [۸] J. Wei, G. Hu, X. Yang, A. T. Luu, and Y. Dong, "Learning facial expression and body gesture visual information for video emotion recognition," *Expert Systems with Applications*, vol. 237, p. 121419, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121419>
- [۹] J. Basavaiah, A. A. Anthony, N. K. HN, and C. M. Patil, "Facial Emotion Recognition: A Review on State-of-the-art Techniques," in *2024 4th International Conference on Data Engineering and Communication Systems (ICDECS)*, 2024, pp. 1-6.



- [۲۱] G. Lombardi, M. Gerbella, M. Marchi, A. Sciutti, G. Rizzolatti, and G. Di Cesare, "Investigating form and content of emotional and non-emotional laughing," *Cerebral Cortex*, vol. 33, pp. 4164-4172, 2023. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac334>
- [۲۲] L. Franz, C. de Filippis, A. Daloiso, E. Biancoli, F. P. Iannaccone, D. Cazzador, et al., "Facial surface electromyography: A systematic review on the state of the art and current perspectives," *American Journal of Otolaryngology*, vol. 45, p. 104041, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2023.104041>
- [۲۳] A. van Boxtel, "Electromyographic (EMG) responses of facial muscles during language processing," in *Language Electrified: Principles, Methods, and Future Perspectives of Investigation*, ed: Springer, 2023, pp. 367-385.
- [۲۴] C. J. Doelman and J. A. Rijken, "Yawning and airway physiology: a scoping review and novel hypothesis," *Sleep and Breathing*, vol. 26, pp. 1561-1572, 2022.
- [۲۵] B. Merzoug, M. Ouslim, L. Mostefai, and M. Benouis, "Evaluation of dimensionality reduction using PCA on EMG-based signal pattern classification," *Engineering Proceedings*, vol. 14, p. 23, 2022. <https://doi.org/10.3390/engproc2022014023>
- [۲۶] T. S. Murotzhonovich, "Introduction to Artificial Neural Networks," *Web of Synergy: International Interdisciplinary Research Journal*, vol. 2, pp. 198-202, 2023. 10.4018/979-8-3693-7250-0.ch016
- [۲۷] A. K. Ali and E. Erçelebi, "Automatic modulation classification using different neural network and PCA combinations," *Expert Systems with Applications*, vol. 178, p. 114.۲۰۲۱, ۹۳۱, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114931>
- [۲۸] F. Vargas, D. Lettnin, M. C. F. de Castro, and M. Macarthy, "Electrocardiogram pattern recognition by means of MLP network and PCA: A case study on equal amount of input signal types," in *VII Brazilian Symposium on Neural Networks*, 2002. SBRN 2002. Proceedings., 2002, pp. 200-205. <https://doi.org/10.1109/SBRN.2002.1181474>
- [۲۹] L. Shao, "Facial movements recognition using multichannel EMG signals," in *2019 IEEE Fourth International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC)*, 2019, pp. 561-566.
- [۳۰] J. Zhang, S. Huang, J. Li, Y. Wang, Z. Dong, and S.-J. Wang, "A Perifacial EMG Acquisition System for Facial-Muscle-Movement Recognition," *Sensors*, vol. 23, p. 8758, 2023.
- [۳۱] S. A. Mithavkar and M. S. Shah, "Recognition of emotion through facial expressions using EMG signal," in *2۰۱۹ international conference on nascent technologies in engineering (ICNTE)*, 2019, pp. 1-6.
- [۳۲] L. Kulke, D. Feyerabend, and A. Schacht, "A comparison of the Affectiva iMotions Facial Expression Analysis Software with EMG for identifying facial expressions of emotion," *Frontiers in psychology*, vol. 11, p. 329, 2020.
- [۹] J. Basavaiah, A. A. Anthony, N. K. HN, and C. M. Patil, "Facial Emotion Recognition: A Review on State-of-the-art Techniques," in *2024 4th International Conference on Data Engineering and Communication Systems (ICDECS)*, 2024, pp. 1-6.
- [۱۰] S. Casaccia, E. J. Sirevaag, M. G. Frank, J. A. O'Sullivan, L. Scalise, and J. W. Rohrbaugh, "Facial muscle activity: High-sensitivity noncontact measurement using laser Doppler vibrometry," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3060564>
- [۱۱] Q. Zhu, G. Lu, and J. Yan, "Valence-arousal model based emotion recognition using EEG, peripheral physiological signals and facial expression," in *Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Soft Computing*, 2020, pp. 81-85. <https://doi.org/10.1145/3380688.3380694>
- [۱۲] A. Kelati, J. Plosila, and H. Tenhunen, "Machine learning for semg facial feature characterization," in *2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, ۲۰۱۹, pp. 169-174. <https://doi.org/10.23919/SPA.2019.8936818>
- [۱۳] S. S. Blom, H. Aarts, and G. R. Semin, "Lateralization of facial emotion processing and facial mimicry," *Laterality*, vol. 25, pp. 259-274, 2020. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2019.1657127>
- [۱۴] M. N. Kyranides, M. Petridou, H. A. Gokani, S. Hill, and K. A. Fanti, "Reading and reacting to faces, the effect of facial mimicry in improving facial emotion recognition in individuals with antisocial behavior and psychopathic traits," *Current Psychology*, vol. 42, pp. 14306-14319, 2023.
- [۱۵] A. González-Rodríguez, Á. García-Pérez, M. Godoy-Giménez, P. Sayans-Jiménez, F. Cañadas, and A. F. Estévez, "The role of the differential outcomes procedure and schizotypy in the recognition of dynamic facial expressions of emotions," *Scientific Reports*, vol. 14, p. 2322, 2024.
- [۱۶] L. O. LUNDQVIST, "Facial EMG reactions to facial expressions: A case of facial emotional contagion?," *Scandinavian journal of psychology*, vol. 36, pp. 130-141, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1995.tb00974.x>
- [۱۷] B. 't Hart, M. E. Struiksma, A. van Boxtel, and J. J. Van Berkum, "Emotion in stories: Facial EMG evidence for both mental simulation and moral evaluation," *Frontiers in psychology*, vol. 9, p. 613, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00613>
- [۱۸] J. J. van Berkum, M. Struiksma, and B. t Hart, "Using facial EMG to track emotion during language comprehension: past, present, and future," in *Language Electrified*, ed: Springer, 2023, pp. 687-729.
- [۱۹] J. Chen, T. Ro, and Z. Zhu, "Emotion recognition with audio, video, EEG, and EMG: a dataset and baseline approaches," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 13229-13242, 2022.
- [۲۰] C.-T. Hsu and W. Sato, "Electromyographic validation of spontaneous facial mimicry detection using automated facial action coding," *Sensors*, vol. 23, p. 9076, 2023.

Development and implementation of smart energy networks using blockchain technology: challenges and opportunities

Alireza Joshan

Department of Electrical Engineering, University of Guilan,Rasht, Guilan, Iran

Alireza.joshan.guilan@gmail.com

Abstract: Considering the growing demand for energy and the need to optimize energy resources, the development of smart networks has been proposed as a basic solution in the energy industry. These networks need innovative technologies that help facilitate the management and distribution of energy. One of these technologies is blockchain, which, as a decentralized and secure tool, provides the possibility of exchanging information and conducting transactions. This review article examines the role of blockchain in the development and implementation of smart energy networks and analyzes the opportunities and challenges associated with it. First, the basic concepts of smart grids and blockchain are introduced, and then the potential applications of blockchain in improving the transparency, efficiency and security of energy systems are examined. The results show that this technology can facilitate the exchange of energy between producers and consumers, reduce transaction costs and improve the security of energy infrastructure. However, challenges such as scalability, lack of reliable data, and issues related to public acceptance are obstacles in the way of implementing this technology. By identifying the developable areas of blockchain in smart energy networks, this study provides suggestions for future research, the integration of blockchain in energy networks can lead to a great transformation in the electricity and energy industry and provide new solutions for optimal management of energy consumption and production.

Keywords: smart energy networks, blockchain technology, energy management, decentralized systems, smart contracts

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025

Received: 2024-09-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-05-06

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-06-21

CITATION

Joshan, A., "Development and implementation of smart energy networks using blockchain technology: challenges and opportunities", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 54-62, 2025.

DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

In recent years, blockchain technology, as one of the important innovations in the field of digital technologies, has created new opportunities in the energy industry. This technology has been able to play an important role in improving the transparency, security and efficiency of energy distribution and management networks. Blockchain enables the conclusion of smart contracts, permanent and immutable records of transactions and reducing dependence on intermediaries, which can create significant changes in the traditional and interconnected structures of this industry. Practical applications and sample projects demonstrate the high potential of this technology in improving efficiency, reducing costs and developing local and smart markets in the energy sector. The purpose of this study is to deeply examine the applications of blockchain in the energy industry, analyze data from practical projects and identify future challenges and opportunities.

2- Methodology

This research uses library resource analysis, practical project reports, and statistical data collection related to blockchain activities in the energy sector. The data includes the number of projects, areas of activity, geographical scope, and related technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence, and cryptocurrency, which are presented in the form of statistical tables and graphs. Also, case studies of successful projects in different countries and analysis of benefits, challenges, and implementation solutions through scientific documents and articles have been conducted. This approach has enabled a comprehensive and comparative assessment of the efficiency and effectiveness of blockchain in the energy sector.

3- Results and discussion

The results show that a wide range of blockchain projects are being implemented and tested around the world, such as grid management, decentralized energy trading, and local market development. Statistical data shows that different countries, with a focus on emerging markets, are playing an important role in advancing the technology. Examples such as the TransActive Grid project in the United States and the SUNNY platform are demonstrating that blockchain can reduce costs, reduce errors and fraud, and increase transparency in energy transactions. Also, an analysis of existing projects shows that the integration of blockchain with technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence will transform the future of energy resource management and has the potential to achieve sustainable development. At the same time, challenges such as scalability limitations, high energy consumption, lack of global standards, and cultural

resistance are the main obstacles to the widespread development of this technology, which require appropriate solutions and international cooperation policies.

4- Conclusion

Overall, blockchain technology plays a vital and transformative role in developing and improving the structures of the energy industry. The potential of this technology to reduce costs, increase transparency, facilitate transactions and create local and smart markets promises a sustainable and efficient future. However, to fully exploit the potential of blockchain, we need to take steps such as developing global standards, improving technical infrastructure, investing in research and development, educating stakeholders and adjusting policies. Interagency and international cooperation and establishing strong legal frameworks will not only solve technical and legal problems but also facilitate public and industrial adoption of the technology in the energy sector. As a result, realizing a bright and smart future in the energy industry requires continuous adaptation to new technologies and strategic and coordinated policies, in which blockchain plays a key role.





توسعه و پیاده سازی شبکه های هوشمند انرژی با استفاده

از فناوری بلاک چین: چالش ها و فرصت ها

علیرضا جوشن^{۱*}

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان، ایران (Alireza.joshan.guilan@gmail.com)

چکیده: با توجه به رشد فزاینده تقاضا برای انرژی و نیاز به بهینه سازی منابع انرژی، توسعه شبکه های هوشمند به عنوان یک راه حل اساسی در صنعت انرژی مطرح شده است. این شبکه ها به فناوری های نوآورانه ای نیاز دارند که به تسهیل مدیریت و توزیع انرژی کمک کند. یکی از این فناوری ها، بلاک چین است که به عنوان ابزاری غیرمتمرکز و امن، امکان تبادل اطلاعات و انجام معاملات را فراهم می آورد. این مقاله مروری، به بررسی نقش بلاک چین در توسعه و پیاده سازی شبکه های هوشمند انرژی می پردازد و فرصت ها و چالش های مرتبط با آن را تحلیل می کند. در ابتدا، مفاهیم اساسی شبکه های هوشمند و بلاک چین معرفی شده و سپس کاربردهای بالقوه بلاک چین در بهبود شفافیت، کارایی و امنیت سیستم های انرژی مورد بررسی قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد که این فناوری می تواند تبادل انرژی میان تولیدکنندگان و مصرف کنندگان را تسهیل کرده، هزینه های معاملاتی را کاهش دهد و امنیت زیرساخت های انرژی را ارتقا بخشد. با این حال، چالش هایی مانند مقیاس پذیری، کمبود داده های قابل اعتماد و مسائل مربوط به پذیرش عمومی، موانعی در مسیر پیاده سازی این فناوری محسوب می شوند. این مطالعه با شناسایی زمینه های توسعه پذیر بلاک چین در شبکه های هوشمند انرژی، پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می دهد. ادغام بلاک چین در شبکه های انرژی می تواند به تحولی بزرگ در صنعت برق و انرژی منجر شود و راهکارهایی نوین برای مدیریت بهینه مصرف و تولید انرژی ارائه دهد.

واژه های کلیدی: شبکه های هوشمند انرژی، فناوری بلاک چین، مدیریت انرژی، سیستم های غیرمتمرکز، قراردادهای هوشمند.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: مروری

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

۱- مقدمه

امنیت، و همچنین افزایش پایداری انرژی کمک کند [۵]. همچنین، بلاک چین با فراهم آوردن امکان ایجاد قراردادهای هوشمند، به تسریع روند معاملات و برنامه ریزی انرژی منجر می شود.

هرچند پتانسیل های قابل توجهی برای ادغام بلاک چین در شبکه های هوشمند وجود دارد، اما چالش هایی نیز فراروی این فناوری قرار دارد. از جمله این چالش ها می توان به نگرانی های مربوط به مقیاس پذیری، کمبود داده های استناددار، و نیاز به پذیرش عمومی اشاره کرد [۶-۹]. هدف این مقاله مروری، بررسی و تحلیل کاربردهای بلاک چین در توسعه و پیاده سازی شبکه های هوشمند انرژی، و نیز شناسایی چالش ها و فرصت های موجود در این زمینه است. با ارائه یک مروری جامع بر ادبیات موجود، این مقاله به تعبیر پتانسیل های بلاک چین در برطرف کردن معضلات حال حاضر صنعت انرژی کمک کرده و به محققان و سیاست گذاران راهکارهایی نوین ارائه می دهد. در این مقاله، با پرداختن به موضوعات کلیدی و شفاف سازی ضرورت های نوآورانه در صنعت انرژی، سعی خواهد شد تا زمینه های بیشتری برای تحقیق و توسعه در این زمینه به وجود بیاید. با این حال، باید به این

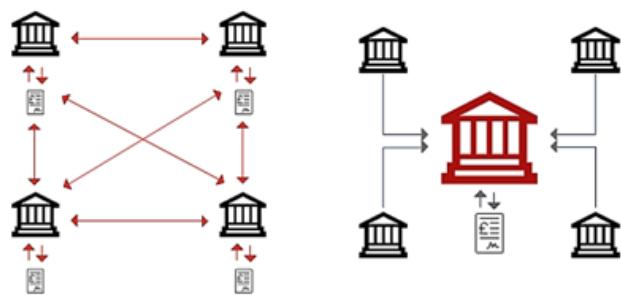
در دهه های اخیر، صنعت انرژی با چالش های فراوانی مواجه شده است؛ از جمله افزایش تقاضا برای انرژی، نوسانات قیمت، و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای. این عوامل، فشار روزافزونی را بر روی سیستم های تولید و توزیع انرژی تحمیل نموده اند [۱]. در این راستا، شبکه های هوشمند انرژی به عنوان راهبردی موثر برای بهینه سازی تولید، توزیع، و مصرف انرژی معرفی شده اند. این شبکه ها با استفاده از فناوری های نوین، نظیر سنسورها و سیستم های اطلاعاتی، امکان مدیریت بهینه و آنی جریان انرژی را فراهم می آورند [۲ و ۳]. یکی از فناوری هایی که به تازگی در جهت بهبود عملکرد شبکه های هوشمند مورد توجه قرار گرفته، فناوری بلاک چین است. بلاک چین با ارائه یک سیستم غیرمتمرکز و ایمن، موجب تسهیل تبادل اطلاعات و معاملات در میان تولیدکنندگان و مصرف کنندگان انرژی می شود [۴]. این فناوری می تواند به کاهش هزینه های معاملاتی، بهبود شفافیت و



شفافیت در زنجیره‌های تأمین و معاملات کمک می‌کند، زیرا هر تراکنش به‌طور دائمی و عمومی ثبت می‌شود و هیچ فرد یا نهادی نمی‌تواند به‌تنهایی آن را دست‌کاری کند. همچنین، فناوری بلاک‌چین قابلیت ایجاد قراردادهای هوشمند را فراهم می‌آورد؛ قراردادهایی که به‌طور خودکار و بر اساس شرایط مشخصی اجرا می‌شوند و نیاز به واسطه را کاهش می‌دهند. اهمیت بلاک‌چین نه‌تنها در انتقال دارایی‌ها، بلکه در دنیای شبکه‌های انرژی نیز به وضوح مشهود است. این فناوری می‌تواند تسهیل تعاملات میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی کمک کرده و به بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی کمک کند. به‌طور کلی، بلاک‌چین به‌عنوان یک مفهوم نوین و تحول‌ساز در عرصه‌های مختلف به‌ویژه انرژی، به‌طرز شگرفی شیوه‌های فعلی کسب‌وکار و مدیریت اطلاعات را تغییر می‌دهد [۱۴ و ۱۵].

۳-۱- معرفی بلاک‌چین

بلاک‌چین یک فناوری نوین است که به عنوان یک دفتر کل توزیع شده و غیرمتمرکز عمل می‌کند (شکل ۱). این فناوری به‌طور اصلی برای ثبت و تأیید تراکنش‌ها در ارزهای دیجیتال مانند بیت‌کوین توسعه یافته است، اما کاربرد های آن فراتر از این حوزه می‌رود. در بلاک‌چین، اطلاعات در قالب بلوک‌هایی ذخیره می‌شوند که هر بلوک شامل مجموعه‌ای از تراکنش‌ها و یک هش منحصر به فرد از بلوک قبلی است. این ویژگی باعث می‌شود که هر تغییر در اطلاعات به راحتی قابل شناسایی باشد و امنیت داده‌ها تضمین شود [۱۴ و ۱۵]. بلاک‌چین از طریق شبکه‌ای از گره‌ها (نودها) مدیریت می‌شود که هر کدام نسخه‌ای از دفتر کل را نگهداری می‌کنند. این ساختار توزیع شده نه تنها از تقلب جلوگیری می‌کند، بلکه امکان شفافیت و دسترسی عمومی به داده‌ها را فراهم می‌آورد. همچنین، بلاک‌چین با استفاده از الگوریتم‌های رمزنگاری، امنیت و حریم خصوصی اطلاعات را تأمین می‌کند [۱۵]. بلاک‌چین می‌تواند در زمینه‌های مختلفی مانند زنجیره تأمین، رای‌گیری الکترونیکی، ثبت املاک و دارایی‌های دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به مزایای آن، بسیاری از صنایع به دنبال پیاده‌سازی این فناوری برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها هستند. در نهایت، بلاک‌چین به عنوان یک نوآوری مهم در دنیای دیجیتال، پتانسیل تغییرات بنیادینی در نحوه تعاملات اقتصادی و اجتماعی بشر را دارد [۱۶ و ۱۷].



شکل (۱): الف- دفتر کل متمرکز؛ ب- دفتر کل توزیع شده

پرداخته شود که استفاده از بلاک‌چین تا چه حدی توانایی برآورده کردن الزامات فعلی کنترل، عملیات و مدیریت شبکه هوشمند را دارد. در این پژوهش، پس از معرفی فناوری بلاک‌چین و تشریح مفاهیم اساسی مرتبط آن، کاربردهای این فناوری در بخش انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، ایده‌های نوآورانه مرتبط با این حوزه به تفصیل بیان شده و نمونه‌های عملی موفق اجرا شده در سراسر جهان تحلیل می‌شوند. در بخش پایانی، چالش‌های کلیدی و ملاحظات مهم در راستای استفاده از بلاک‌چین در صنعت انرژی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مبانی نظری شبکه‌های هوشمند انرژی

شبکه‌های هوشمند انرژی به‌عنوان یک سیستم پیچیده و یکپارچه، ساختاری را فراهم می‌آورند که امکان مدیریت بهینه تولید، توزیع و مصرف انرژی را ایجاد می‌کند [۱۰]. در این شبکه‌ها، تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای مانند سنسورها، کنترل‌کننده‌های هوشمند و سیستم‌های اطلاعاتی به کار گرفته شده‌اند تا داده‌های واقعی و آنی در مورد وضعیت انرژی به‌دست آید. این داده‌ها به مدیران و مصرف‌کنندگان قابلیت می‌دهند که تصمیمات هوشمندانه‌تری بگیرند و بنابراین مصرف انرژی را بهینه کنند. شبکه‌های هوشمند انرژی به‌ویژه با هدف کاهش اتلاف انرژی، بهبود کیفیت برق و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع طراحی شده‌اند [۱۱]. این نوع شبکه‌ها همچنین توانایی ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و بادی را دارا هستند؛ که به‌طور قابل توجهی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی موثرند. امکان مدیریت دوطرفه انرژی در این شبکه‌ها به افراد این امکان را می‌دهد که نه تنها مصرف‌کننده، بلکه تولیدکننده نیز باشند، به‌ویژه در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس خانگی. عملکرد شبکه‌های هوشمند به‌طور عمده بر اساس جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و پردازش آن‌ها و اجرای تصمیمات بر مبنای اطلاعات به‌دست آمده است. در حالی که حفاظت از اطلاعات و امنیت سایبری چالش‌های مهمی برای این سیستم‌ها محسوب می‌شوند، توسعه و پیاده‌سازی این شبکه‌ها می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود تأمین انرژی و کاهش هزینه‌ها در طولانی‌مدت شوند [۱۲ و ۱۳].

۳- فناوری بلاک‌چین: تعریف و ویژگی‌ها

فناوری بلاک‌چین یک سیستم غیرمتمرکز برای ذخیره‌سازی و تبادل داده‌ها است که به‌طور اصولی بر مبنای ایجاد و حفظ یک دفتر کل توزیع‌شده عمل می‌کند. این فناوری به‌دلیل ویژگی‌های خاصی که دارد، به‌ویژه در حوزه‌هایی مانند صنعت انرژی و مالی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. یکی از ویژگی‌های بارز بلاک‌چین، قابلیت غیرقابل تغییر بودن داده‌هاست؛ به‌طوری که هر بلاک جدید به‌صورت زنجیره‌ای به بلاک قبلی متصل می‌شود و هرگونه تغییر در اطلاعات موجود باید توسط همه نودهای شبکه تأیید گردد. بلاک‌چین از پروتکل‌های رمزنگاری استفاده می‌کند که امنیت و حریم خصوصی داده‌ها را تضمین می‌کند. با وجود این ویژگی‌ها، بلاک‌چین به افزایش

۴- نقش بلاک چین در مدیریت انرژی

بلاک چین به عنوان یک فناوری تحول ساز، نقش مهمی در مدیریت انرژی ایفا می کند و به بهینه سازی فرآیندها و بهبود کارایی سیستم های انرژی کمک می کند. یکی از کاربردهای اصلی بلاک چین، تسهیل ارتباطات میان منابع انرژی تجدیدپذیر و مصرف کنندگان است. با استفاده از بلاک چین، امکان ایجاد بازارهای محلی انرژی به وجود می آید که در آن تولیدکنندگان می توانند انرژی خود را به طور مستقیم به مصرف کنندگان بفروشند، بدون نیاز به واسطه های سنتی. علاوه بر این، بلاک چین به بهبود پیش بینی و مدیریت بار کمک می کند. با تجزیه و تحلیل داده های جمع آوری شده از سنسورها و دستگاه های هوشمند، بلاک چین می تواند پیش بینی های دقیق تری در مورد تقاضا و عرضه انرژی ارائه دهد. این امر به مدیران شبکه کمک می کند تا تصمیمات بهتری در مورد برنامه ریزی و توزیع انرژی اتخاذ کنند [۱۶]. بلاک چین همچنین به افزایش شفافیت در فرآیندهای مدیریت انرژی کمک می کند. به واسطه ثبت دائمی و غیرقابل تغییر داده ها در بلاک چین، تمامی ذینفعان می توانند به راحتی در مورد معاملات و فرآیندهای مربوط به انرژی نظارت کنند و به این ترتیب خطرات تقلب و سوءاستفاده کاهش می یابد. همچنین، بلاک چین می تواند به تسهیل در پرداخت ها و تراکنش ها کمک کند، که موجب می شود زمان و هزینه های مرتبط با فرآیندهای مالی کاهش یابد. به علاوه، با امکان مدیریت قراردادهای هوشمند، قوانین و شرایط معاملاتی به صورت خودکار اجرا می شوند که به کارایی و سرعت فرآیندهای تجاری اضافه می کند. در مجموع، بلاک چین به عنوان یک ابزار کارآمد برای مدیریت انرژی، به تحول در این صنعت کمک قابل توجهی می کند [۱۷].

۵- مزایای بلاک چین در صنعت برق

فناوری بلاک چین به عنوان یک نوآوری برجسته، مزایای قابل توجهی را به صنعت برق ارائه می دهد که می تواند به بهبود کارایی و شفافیت این صنعت کمک کند. یکی از اصلی ترین مزایای بلاک چین، قابلیت غیرمتمرکز بودن آن است. این ویژگی به تولیدکنندگان و مصرف کنندگان انرژی این امکان را می دهد که به صورت مستقیم با یکدیگر تعامل کنند و نیاز به واسطه ها را کاهش دهند، که خود به کاهش هزینه ها منجر می شود. بلاک چین همچنین به بهبود شفافیت در زنجیره تأمین انرژی کمک می کند. تمام معاملات و تراکنش ها به صورت دائمی ثبت می شوند، که این امر امکان پیگیری و تأیید تراکنش ها را برای همه ذینفعان فراهم می آورد. این شفافیت می تواند به اعتماد بیشتر میان تولیدکنندگان و مصرف کنندگان انرژی منجر شود و از رفتارهای غیرمنصفانه جلوگیری کند. یکی دیگر از مزایای بلاک چین، امکان استفاده از قراردادهای هوشمند است که به طور خودکار اجرا می شوند. این قراردادها می توانند به خودکارسازی پروسه های معاملاتی کمک کنند و از لحاظ زمان و هزینه بهینه سازی های چشمگیری به وجود آورند. به علاوه، بلاک چین می تواند به مدیریت بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و

بادی، کمک کند و به تسهیل تجمیع و فروش آن ها توسط مصرف کنندگان جزء (مانند خانوارها) بپردازد. در نهایت، افزایش امنیت در تبادلات انرژی یکی دیگر از مزایای بلاک چین است. سیستم های سنتی معمولاً در برابر حملات سایبری آسیب پذیرند؛ اما بلاک چین با ویژگی های رمزنگاری خود، این خطرات را به حداقل می رساند. به طور کلی، بلاک چین می تواند به تحولی بزرگ در صنعت برق منجر شود و شیوه های فعلی معاملات و مدیریت انرژی را بهبود بخشد [۲۰-۱۸].

۶- چالش های فنی بلاک چین در صنعت انرژی

با وجود پتانسیل های بسیار بالای فناوری بلاک چین در صنعت انرژی، چالش های فنی متعددی وجود دارد که می توانند مانع از گسترش آن شود. یکی از اصلی ترین معضلات، مقیاس پذیری است. بسیاری از شبکه های بلاک چین در حال حاضر قادر به پردازش حجم بالای تراکنش ها در زمان واقعی نیستند. این مشکل می تواند در زمان های اوج بار، که نیاز به تبادل سریع اطلاعات وجود دارد، موجب افت عملکرد و سرعت شود. علاوه بر این، هم سویی و سازگاری بلاک چین با زیرساخت های موجود در صنعت انرژی نیز یک چالش جدی است. بسیاری از سیستم های فعلی انرژی بر اساس تکنولوژی های سنتی طراحی شده اند و هماهنگی آنها با بلاک چین می تواند زمان بر و پرهزینه باشد. مسئله دیگری که باید به آن پرداخته شود، مدیریت داده ها و امنیت سایبری است. در پیاده سازی بلاک چین، اطلاعات حساس و حیاتی انرژی باید محافظت شوند. هرگونه دسترسی غیرمجاز می تواند عواقب گسترده ای برای سیستم های انرژی و امنیت ملی به همراه داشته باشد. نیاز به زیرساخت های فنی مناسب نیز از دیگر چالش ها است. برای پیاده سازی مؤثر بلاک چین، وجود سخت افزار و نرم افزارهای مناسب ضروری است که هنوز در بسیاری از مناطق توسعه نیافته است. در نهایت، عدم آگاهی و آموزش کافی از فناوری بلاک چین در بین ذینفعان و متخصصان این صنعت نیز به عنوان یک مانع برای پیاده سازی آن تلقی می شود. ضروری است که با برگزاری دوره های آموزشی و کارگاه های تخصصی، سطح دانش فنی در این حوزه ارتقاء یابد تا بتوان بر این چالش ها فائق آمد [۲۱ و ۲۲].

۷- چالش های اجتماعی و فرهنگی بلاک چین در

صنعت انرژی

پیاده سازی فناوری بلاک چین در صنعت انرژی تنها با چالش های فنی و قانونی محدود نمی شود، بلکه با مسائل اجتماعی و فرهنگی نیز روبه رو است. یکی از اصلی ترین چالش ها، عدم آگاهی و درک جامعه از فناوری بلاک چین و کاربردهای آن در مدیریت انرژی است. بسیاری از مصرف کنندگان و تولیدکنندگان ممکن است نسبت به این فناوری دیدی منفی داشته باشند یا اطلاعات کافی در مورد مزایای آن نداشته باشند، که می تواند مانع از پذیرش آن شود. علاوه بر این، ترس از تغییر و انتقال به سیستم های جدید نیز می تواند از موانع جدی باشد. ذینفعان سنتی، از جمله شرکت های بزرگ انرژی، ممکن است به دلیل منافع



۹- مقایسه بلاک چین و سیستم‌های سنتی انرژی

مقایسه بلاک چین و سیستم‌های سنتی انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا شناخت نقاط قوت و ضعف هر کدام می‌تواند راهگشای تحول در صنعت انرژی باشد. در سیستم‌های سنتی، انرژی از تولیدکنندگان بزرگ به مصرف‌کنندگان منتقل می‌شود و این فرآیند اغلب شامل واسطه‌های متعدد است که باعث افزایش هزینه‌ها و زمان انتقال می‌شود. به عکس، بلاک چین با امکان تعامل مستقیم بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، می‌تواند این فرآیند را سریع‌تر و کمتر هزینه‌بر کند. یکی از مهم‌ترین مزایای بلاک چین، افزایش شفافیت در تراکنش‌ها است. در سیستم‌های سنتی، اطلاعات مربوط به تأمین و توزیع انرژی معمولاً در دسترس عموم قرار ندارد و این امر می‌تواند به نقایص امنیتی منجر شود. اما بلاک چین اطلاعات را به صورت غیرقابل تغییر و در دسترس همه قرار می‌دهد، که به عملکرد بهتر و قابل اعتمادتر سیستم کمک می‌کند [۲۸ و ۲۹]. همچنین، در سیستم‌های سنتی، امکان خطا و تقلب در گزارش‌گیری وجود دارد. اما بلاک چین با استفاده از الگوریتم‌های رمزنگاری و سیستم‌های تأیید چندگانه، این ریسک را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. مسائل مربوط به دسترسی و هزینه نیز از دیگر تفاوت‌های مهم هستند. سیستم‌های سنتی ممکن است عملکرد ضعیفی در مناطق دورافتاده یا کم‌جمعیت داشته باشند، در حالی که بلاک چین می‌تواند به راحتی در این نقاط اجرا شود و به تأمین انرژی محلی کمک کند. در نهایت، چالش‌های فنی سیستم‌های سنتی معمولاً به پیچیدگی زیرساخت‌ها مربوط می‌شود؛ اما بلاک چین با ارائه یک پلتفرم تخصصی و مبتنی بر داده‌های غیرمتمرکز، راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای تسهیل عملیات انرژی ارائه می‌دهد. این مقایسه تأکید می‌کند که بلاک چین می‌تواند به عنوان یک گزینه جذاب و کارآمد برای آینده صنعت انرژی مطرح باشد [۳۰].

۱۰- پروژه‌های موفق بلاک چین در صنعت انرژی

با رشد فناوری بلاک چین، پروژه‌های موفق در سطح جهانی در زمینه صنعت انرژی راه‌اندازی شده‌اند که نشان‌دهنده پتانسیل این فناوری در بهبود ساختارهای مدیریت انرژی هستند. یکی از نمونه‌های بارز، پروژه Power Ledger در استرالیا است که یک پلتفرم تبادل انرژی مبتنی بر بلاک چین ارائه می‌دهد. این پلتفرم به مصرف‌کنندگان این امکان را می‌دهد که انرژی تولیدی خود از منابع تجدیدپذیر را به صورت مستقیم به سایرین بفروشند، بدون نیاز به واسطه. پروژه دیگر در آلمان، WePower نام دارد که در آن بلاک چین برای تأمین مالی پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. این پلتفرم به تولیدکنندگان انرژی کمک می‌کند تا قراردادهای خرید و فروش بلندمدت را با مصرف‌کنندگان آینده به صورت شفاف و امن منعقد کنند و به این ترتیب، منابع مالی لازم برای توسعه پروژه‌های جدید را تأمین نمایند. در ایالات متحده، LO3 Energy با راه‌اندازی شبکه‌ای مبتنی بر بلاک چین به نام TransActive Grid، به مصرف‌کنندگان امکان می‌دهد تا انرژی خود را در مقیاس محلی به یکدیگر بفروشند. این

اقتصادی خود، تمایلی به پذیرش بلاک چین نداشته باشند. این مقاومت فرهنگی نیازمند تغییرات عمده‌ای در نحوه تفکر و اقدامات این ذینفعان است. چالش دیگری که ناشی از فرهنگ استفاده از انرژی‌های غیر تجدیدپذیر است، ممکن است باعث کند شدن روند انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده از بلاک چین در این حوزه شود. برای غلبه بر این چالش‌ها، نیاز است که برنامه‌های آموزشی و اطلاع‌رسانی به صورت مؤثر طراحی و اجرا شوند تا فرهنگ پذیرش نوآوری‌های فناورانه را در جامعه تقویت کنند. همچنین، باید به دغدغه‌های اجتماعی، از جمله دسترسی عادلانه به فناوری بلاک چین و اطمینان از اینکه همه اقشار جامعه از مزایای آن بهره‌مند شوند، توجه ویژه‌ای شود. ترویج همکاری میان ذینفعان مختلف، از جمله دولت، فعالان صنعت، و جامعه مدنی، می‌تواند به ایجاد یک اکوسیستم پایدار و هم‌پیوند در پذیرش بلاک چین کمک کند [۲۵-۲۳].

۸- تأثیرات اقتصادی بلاک چین در صنعت انرژی

بلاک چین به عنوان یک فناوری نوین، تأثیرات عمیقی بر اقتصاد صنعت انرژی دارد. یکی از مهم‌ترین این تأثیرات، کاهش هزینه‌ها در زنجیره تأمین انرژی است. با حذف واسطه‌ها و تسهیل معاملات مستقیم بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، هزینه‌های مربوط به انتقال و توزیع انرژی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به کاهش قیمت انرژی برای مصرف‌کنندگان شود. علاوه بر این، بلاک چین امکان ایجاد بازارهای انرژی محلی و خودکفا را فراهم می‌آورد. این بازارها به تولیدکنندگان محلی این امکان را می‌دهند که انرژی تولیدی خود را مستقیماً به همسایگان یا مصرف‌کنندگان نزدیک بفروشند، که می‌تواند به تحریک اقتصاد محلی و افزایش درآمد برای تولیدکنندگان منجر شود. بلاک چین همچنین می‌تواند به نوآوری در مدل‌های کسب و کار جدید در صنعت انرژی کمک کند. به عنوان مثال، می‌توان سیستم‌های عضویت یا اشتراک‌گذاری انرژی را ایجاد کرد که در آن مصرف‌کنندگان انرژی مازاد خود را به دیگران ارائه می‌دهند. این مدل‌سازی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش ضایعات کمک کند. تأثیر بلاک چین بر تأمین مالی پروژه‌های انرژی نیز قابل توجه است. این فناوری امکان تأمین مالی جمعی را برای پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر فراهم می‌کند و به افراد و سرمایه‌گذاران کوچک اجازه می‌دهد تا در توسعه این پروژه‌ها مشارکت کنند. این امر به افزایش سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر کمک می‌کند. در نهایت، بلاک چین به افزایش شفافیت و اعتماد در بازار انرژی کمک می‌کند. با ثبت تراکنش‌ها به صورت غیرقابل تغییر بر روی زنجیره، نهادها و افراد می‌توانند با اطمینان بیشتری در بازار انرژی فعالیت کنند. این ویژگی‌ها به ویژه در حالتی که شبهه و عدم اعتماد به اطلاعات جاری وجود دارد؛ بسیار حیاتی است. به طور کلی، بلاک چین می‌تواند به یک تغییر اساسی در جنبه‌های اقتصادی صنعت انرژی منجر شود و به ایجاد سیستمی پایدار و کارآمد کمک کند [۲۶ و ۲۷].

جدول (۱): داده‌های پروژه‌های معرفی شده، اجرا شده و آزمایش شده در خصوص بلاکچین در بخش صنعت انرژی

گستره جغرافیایی	تعداد پروژه	زمینه های فعالیت
آمریکا	۲۵	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه - گذاری/امنیت داده
آلمان	۱۶	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه - گذاری/امنیت داده
هلند	۱۴	مبادله غیرمتمرکز انرژی/مدیریت شبکه /کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری /امنیت داده/فناوری های نوین
سوئیس	۱۰	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری/امنیت داده
انگلستان	۱۰	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری/امنیت داده
استرالیا	۸	تجارت کربن/محرکه های برقی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/مبادله غیرمتمرکز انرژی
سنگاپور	۶	مبادله غیرمتمرکز انرژی/مدیریت شبکه/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
فرانسه	۵	مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء/امنیت داده/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
اسپانیا	۴	امنیت داده/مبادله غیرمتمرکز انرژی/فناوری نوین
ژاپن	۴	مبادله غیرمتمرکز انرژی/امنیت داده/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
بلژیک	۴	مبادله انرژی، اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
چین	۴	مبادله انرژی، اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
اتریش	۴	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/مبادله غیرمتمرکز انرژی/تجارت کربن
کانادا	۳	مبادله غیرمتمرکز انرژی/تجارت کربن
آفریقای جنوبی	۲	کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری/محرکه برقی
رومانی	۲	مبادله غیرمتمرکز انرژی
دانمارک	۲	امنیت داده/مبادله غیرمتمرکز انرژی
برزیل	۲	مبادله غیرمتمرکز انرژی/کریپتو کارنسی، توکن
روسیه	۲	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/تجارت کربن
آندورا	۲	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/مبادله انرژی
اتحادیه اروپا	۲	فناوری های نوین
فنلاند	۲	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
تایلند	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
هند	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
امارات	۱	کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
اسلونی	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
کره جنوبی	۱	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
نیوزلند	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
هنگ کنگ	۱	تجارت کربن

پروژه به‌طور قابل توجهی هزینه‌ها و پیچیدگی‌های مربوط به فرآیندهای سنتی را کاهش داده و به افزایش جذابیت انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کرده است. در کنار این پروژه‌ها، SUNNY نیز به‌عنوان یک پلتفرم جدید معرفی شده که امکان تسهیل تراکنش‌های مالی بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی را فراهم می‌آورد و همچنین به کاهش کربن و بهره‌وری انرژی کمک می‌کند. این نمونه‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای بلاکچین در تحول صنعت انرژی هستند و اهمیت سرمایه‌گذاری در این تکنولوژی را برای شرکت‌های فعال در این حوزه مشخص می‌سازند [۳۸-۳۱].

۱۰-۱- داده‌های آماری پروژه‌های عملی بلاکچین در بخش انرژی

در این بخش از مقلله، داده‌های آماری از پروژه‌های بلاکچین در بخش انرژی [۱۷و۳۶] در ۱۴۰ عنوان پروژه و در ۸ گروه که در جدول (۱) نمایش داده شده عنوان شده است.

۱۱- چشم‌انداز آینده بلاکچین در صنعت انرژی

چشم‌انداز آینده بلاکچین در صنعت انرژی با پتانسیل‌های بی‌نظیری همراه است که می‌تواند شیوه‌های سنتی مدیریت انرژی را به‌طور بنیادین تغییر دهد. با افزایش تمرکز بر پایداری و انرژی‌های تجدیدپذیر، بلاکچین به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت و توزیع انرژی در حال شکل‌گیری است. این فناوری می‌تواند به تسهیل تعاملات میان تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و نهادهای نظارتی کمک کند و در نتیجه به ارتقاء کارایی سیستم‌های انرژی منجر شود. افزایش پذیرش قراردادهای هوشمند بر بستر بلاکچین به خودکارسازی فرآیندهای معاملاتی کمک کرده و امکان اجرای سریع و بدون واسطه توافقات را فراهم می‌آورد [۳۹]. این ویژگی‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های انرژی و تسهیل در تبادل انرژی‌های تجدیدپذیر بین مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان منجر شود. همچنین، استفاده از بلاکچین در تجزیه و تحلیل داده‌های انرژی نیز چشم‌اندازهای جدیدی را برای بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی به‌وجود می‌آورد. با تجزیه و تحلیل دقیق اطلاعات، شرکت‌ها می‌توانند در زمان واقعی به تغییرات تقاضا و عرضه پاسخ دهند و بهبود مستمر در مدیریت منابع را فراهم سازند [۴۰و۴۱]. در نهایت، همکاری‌های بین‌المللی و تحقیق و توسعه در فناوری بلاکچین می‌تواند به ایجاد استانداردهای جهانی کمک کنند که پذیرش این فناوری را تسهیل کند. با ترکیب بلاکچین با سایر فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی، می‌توان به بلوغ بیشتری در مدیریت انرژی دست یافت و به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کرد [۴۲و۴۳].



۱۲- نتیجه و پیشنهاد‌های آینده

کمک کند. در پایان، برقراری ساز و کارهای تشویقی برای پذیرش بلاک‌چین در میان مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان انرژی می‌تواند از موانع موجود عبور کرده و روند انتقال به سیستم‌های انرژی هوشمند و پایداری را تسریع کند. با اجرای این راهبردها، می‌توان آینده‌ای روشن برای بلاک‌چین در صنعت انرژی متصور شد.

مراجع

- [1] andoni, merlinda, et al. blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities. *renewable and sustainable energy reviews*, 2019, 100: 143174. doi: 10.1016/j.rser.2018.10.014.
- [2] choobineh, moein, et al. energy innovations through blockchain: challenges, opportunities, and the road ahead. *the electricity journal*, 2022, 35.1: 107059. doi: 10.1016/j.tej.2021.107059.
- [3] hasankhani, arezoo, et al. blockchain technology in the future smart grids: a comprehensive review and frameworks. *international journal of electrical power & energy systems*, 2021, 129: 106811. doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106811.
- [4] sharma, pradip kumar; kumar, neeraj; park, jong hyuk. blockchain technology toward green iot: opportunities and challenges. *ieee network*, 2020, 34.4: 263-269. doi: 10.1109/mnet.001.1900526.
- [5] kapassa, evgenia, et al. blockchain in smart energy grids: a market analysis. in: information systems: 17th european, mediterranean, and middle eastern conference, emcis 2020, dubai, united arab emirates, november 25–26, 2020, proceedings 17. springer international publishing, 2020. p. 113-124. doi: 10.1007/978-3-030-63396-7_8.
- [6] cioara, tudor, et al. smart grid management using blockchain: future scenarios and challenges. in: *2020 19th roedunet conference: networking in education and research (roedunet)*. ieee, 2020. p. 1-5. doi: 10.1109/roedunet51892.2020.9324874.
- [7] lu, hongfang, et al. blockchain technology in the oil and gas industry: a review of applications, opportunities, challenges, and risks. *ieee access*, 2019, 7: 41426-41444. doi: 10.1109/access.2019.2907695.
- [8] ferreira, joao c., et al. blockchain, iot, and smart grids challenges for energy systems. in: *international conference on smart computing and communication*. singapore: springer nature singapore, 2024. p. 65-80. doi: 10.1007/978-981-97-1323-3_6.
- [9] al sibahee, mustafa a., et al. blockchain- smart environments: a systematic literature review. *ieee internet of things journal*, 2024. doi: 10.1109/jiot.2024.3422678.
- [10] xu, yizhe, et al. smart energy systems: a critical review on design and operation optimization. *sustainable cities and society*, 2020, 62: 102369. doi: 10.1016/j.scs.2020.102369.
- [11] xiao, yang. communication and networking in smart grids. crc press, 2012. doi: 10.1201/b11897.
- [12] kranz, johann, et al. smart energy: where do we stand and where should we go?. *electronic markets*, 2015, 25: 7-16. doi: 10.1007/s12525-015-0180-3.
- [13] mbungu, nsilulu t., et al. overview of the optimal smart energy coordination for microgrid applications. *ieee access*, 2019, 7: 163063163084. doi: 10.1109/access.2019.2951459.
- [14] tyagi, nitin, et al. a framework for blockchain technology including features. emerging technologies in data mining and information security: proceedings

فناوری بلاک‌چین به عنوان یک ابزار تحول آفرین در توسعه و بهینه سازی شبکه‌های هوشمند انرژی، نقش مهمی در افزایش شفافیت، امنیت و کارایی این سیستم‌ها ایفا می‌کند. بررسی پروژه‌های معرفی شده، اجرا شده و آزمایش شده در این حوزه نشان می‌دهد که استفاده از بلاک‌چین می‌تواند چالش‌های اساسی، از جمله مقیاس‌پذیری، امنیت داده‌ها، مدیریت غیرمتمرکز تراکنش‌های انرژی و بهینه‌سازی توزیع را تا حد زیادی برطرف کند. این فناوری با امکان قیمت‌گذاری پویا، تسویه بلادرنگ معاملات انرژی و کاهش وابستگی به واسطه‌ها، زمینه را برای ایجاد بازارهای انرژی هوشمندتر و پاسخگوتر فراهم می‌آورد. با این حال، پیاده‌سازی گسترده بلاک‌چین در این حوزه همچنان با چالش‌هایی همراه است. موانعی همچون نیاز به زیرساخت‌های محاسباتی قوی، مصرف بالای انرژی برخی از مدل‌های بلاک‌چین و پیچیدگی‌های تطابق با قوانین و استاندارد‌های موجود، نیازمند بررسی و بهینه‌سازی مستمر هستند. پروژه‌های بررسی شده نشان می‌دهند که با توسعه پروتکل‌های کم مصرف‌تر، بهبود قابلیت‌های مقیاس‌پذیری و همکاری میان سیاست‌گذاران، صنایع و محققان، می‌توان این چالش‌ها را مدیریت کرد و از ظرفیت‌های بالقوه بلاک‌چین در مدیریت انرژی بهره برداری بهتری داشت. در نهایت، ادغام فناوری بلاک‌چین با شبکه‌های هوشمند انرژی نه تنها امکان مدیریت کارآمدتر منابع انرژی را فراهم می‌کند، بلکه به افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و توانمندسازی مصرف‌کنندگان منجر می‌شود. آینده این حوزه وابسته به ادامه تحقیقات، توسعه استاندارد‌های بین‌المللی و سرمایه‌گذاری در راهکارهای نوآورانه است تا این فناوری بتواند به صورت عملی و گسترده در سیستم‌های انرژی آینده پیاده‌سازی شود. به منظور بهبود پیاده‌سازی بلاک‌چین در صنعت انرژی، اتخاذ راهبردهای مؤثر و جامع ضروری است. اولین قدم ایجاد چارچوب‌های قانونی و مقرراتی مناسب است که به جذب سرمایه‌گذاران و نهادهای مختلف کمک کند. این چارچوب‌ها باید به وضوح نقش‌ها و مسئولیت‌های هر یک از ذینفعان را مشخص کرده و از حقوق مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان حمایت کنند. دومین راهبرد، افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه است. با تخصیص منابع مالی بیشتر به پروژه‌های تحقیقاتی، می‌توان نوآوری‌های جدید و بهینه‌سازی‌های فناورانه را در این حوزه تسریع کرد. همچنین، توسعه پلتفرم‌های آموزشی به منظور آگاه‌سازی ذینفعان از مزایا و کاربردهای بلاک‌چین در انرژی بسیار حائز اهمیت است. سومین راهبرد، برقراری همکاری‌های بین‌بخشی است. ایجاد تیم‌های کاری متشکل از دولت، صنعت و دانشگاه‌ها می‌تواند به شناسایی چالش‌های مشترک و یافتن راه‌حل‌های کارآمد کمک کند. این تبادل دانش و تجربیات می‌تواند اجرای پروژه‌های بلاک‌چین را تسهیل کند. ایجاد اکوسیستم‌های همکارانه برای آزمایش فناوری‌های نوآورانه و تبادل اطلاعات میان استارت‌آپ‌ها و شرکت‌های بزرگ نیز بسیار مهم است. همچنین، استفاده از فناوری‌های مکمل مانند اینترنت اشیا و هوش مصنوعی می‌تواند به گسترش قابلیت‌های بلاک‌چین در صنعت انرژی

- [30] meng, xianghui; zhu, lingling. augmenting cybersecurity in smart urban energy systems through iot and blockchain technology within the digital twin framework. *sustainable cities and society*, 2024, 106: 105336.doi: 10.1016/j.scs.2024.105336.
- [31] mollah, muhammad baqer, et al. blockchain for future smart grid: a comprehensive survey. *ieee internet of things journal*, 2020, 8.1: 18-43.doi: 10.1109/jiot.2020.2993601.
- [32] mendoza tovar, eutimio. *blockchain for environmental sustainability*. 2023. phd thesis. masaryk university, faculty of economics and administration.doi: 10.1201/9781003260905.
- [33] lin, jason; pipattanasomporn, manisa; rahman, saifur. comparative analysis of auction mechanisms and bidding strategies for p2p solar transactive energy markets. *applied energy*, 2019, 255: 113687.doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113687.
- [34] orlov, alisa. blockchain in the electricity market: identification and analysis of business models. 2017. master's thesis. <http://hdl.handle.net/11250/2486421>.
- [35] lamers, david. *possibilities for blockchain in the energy transition*. 2018. master's thesis. university of twente. <https://purl.utwente.nl/essays/74364>.
- [36] mendoza tovar, eutimio. of thesis: blockchain for environmental sustainability. 2022. <https://is.muni.cz/th/hyrel/?lang=en>.
- [37] lv, yongjun. transitioning to sustainable energy: opportunities, challenges, and the potential of blockchain technology. *frontiers in energy research*, 2023, 11: 1258044.doi: 10.3389/fenrg.2023.1258044.
- [38] barceló, ernest, et al. regulatory paradigm and challenge for blockchain integration of decentralized systems: example renewable energy grids. *sustainability*, 2023, 15.3: 2571.doi: 10.3390/su15032571.
- [39] budiarto, mukti, et al. future energy using blockchain systems. in: *2022 international conference on science and technology (icostech)*. ieee, 2022. p. 1-9.doi: 10.1109/icostech54296.2022.9829123.
- [40] taherdoost, hamed; madanchian, mitra. blockchain-based new business models: a systematic review. *electronics*, 2023, 12.6: 1479.doi: 10.3390/electronics12061479.
- [41] liu, yishu; li, ziyuan; huang, lihua. the application of blockchain technology in smart sustainable energy business model. *energy reports*, 2022, 8: 7063-7070.doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.002.
- [42] rao, k. varaprasada; murla, dileep kumar; panda, sandeep kumar. blockchain: a study of new business model. in: *recent advances in blockchain technology: real-world applications*. cham: springer international publishing, 2023. p. 187214.doi: 10.1007/978-3-031-22835-3_9.
- [43] tang, wenhu, et al. exploring the potential of iot-blockchain integration technology for energy community trading: opportunities, benefits, and challenges. *csee journal of power and energy systems*, 2025.doi: 10.17775/cseejpes.2024.02160.
- [44] ferreira, joao c., et al. blockchain, iot, and smart grids challenges for energy systems. in: *international conference on smart computing and communication*. singapore: springer nature singapore, 2024. p. 65-80.doi: 10.1007/978-981-97-1323-3_6.
- [45] taherdoost, hamed; madanchian, mitra. 4 blockchain integration in renewable energy. *applications of blockchain and computational intelligence in environmental sustainability*, 2025, 54.doi: 10.1201/9781003609865-4.
- ofiemis2020, volume 1, 2021, 633645.doi: 10.1007/978-981-15-9927-9_62.
- [15] komalavalli, c.; saxena, deepika; laroia, chetna. overview of blockchain technology concepts. in: *handbook of research on blockchain technology*. academic press, 2020. p. 349-371.doi: 10.1016/b978-0-12-819816-2.00014-9.
- [16] miglani, arzoo, et al. blockchain for internet of energy management: review, solutions, and challenges. *computer communications*, 2020, 151: 395418.doi: 10.1016/j.comcom.2020.01.014.
- [17] li, joey, et al. methods and applications for artificial intelligence, big data, internet of things, and blockchain in smart energy management. *energy and ai*, 2023, 11: 100208.doi: 10.1016/j.egyai.2022.100208.
- [18] nour, morsy; chaves ávila, josé pablo; sánchez-miralles, álvaro. review of blockchain potential applications in the electricity sector and challenges for large scale adoption. *ieee access*, 2022, 10: 4738447418.doi: 10.1109/access.2022.3171227.
- [19] borkovcova, anna; černá, miloslava; sokola, marcela. blockchain in the energy sector: systematic review. *sustainability*, 2022, 14.22: 14793.10.3390/su142214793.
- [20] aljaroodi, jameela; mohamed, nader. blockchain in industries: a survey. *ieee access*, 2019, 7: 36500-36515.doi: 10.1109/access.2019.2903554.
- [21] mika, bartek; goudz, alexander. blockchain technology in the energy industry: blockchain as a driver of the energy revolution? with focus on the situation in germany. *energy systems*, 2021, 12.2: 285-355.doi: 10.1007/s12667-020-00391-y.
- [22] boumaiza, ameni. a blockchain-based scalability solution with microgrids peer-to-peer trade. *energies*, 2024, 17.4: 915.doi: 10.3390/en17040915.
- [23] shin, donghee; ibahrine, mohammed. the socio-technical assemblages of blockchain system: how blockchains are framed and how the framing reflects societal contexts. *digital policy, regulation and governance*, 2020, 22.3: 245-263.doi: 10.1108/dprg-11-2019-0095.
- [24] teisserenc, benjamin; sepaşgozar, samad. adoption of blockchain technology through digital twins in the construction industry 4.0: a pestels approach. *buildings*, 2021, 11.12: 670.doi: 10.3390/buildings11120670.
- [25] friedman, nicola; ormiston, jarrod. blockchain as a sustainability-oriented innovation?: opportunities for and resistance to blockchain technology as a driver of sustainability in global food supply chains. *technological forecasting and social change*, 2022, 175: 121403.doi: 10.1016/j.techfore.2021.121403.
- [26] ahl, amanda, et al. challenges and opportunities of blockchain energy applications: interrelatedness among technological, economic, social, environmental, and institutional dimensions. *renewable and sustainable energy reviews*, 2022, 166: 112623.doi: 10.1016/j.rser.2022.112623.
- [27] whig, pawan; velu, arun; naddikatu, rahul reddy. the economic impact of ai-enabled blockchain in 6g-based industry. in: *ai and blockchain technology in 6g wireless network*. singapore: springer nature singapore, 2022. p. 205-224.doi: 10.1007/978-981-19-2868-0_10.
- [28] su, xiaole, et al. a blockchain-based smart contract model for secured energy trading management in smart microgrids. *security and privacy*, 2024, 7.1: e341.doi: 10.1109/isis64839.2024.10887444.
- [29] liu, ziming, et al. pricing game and blockchain for electricity data trading in low-carbon smart energy systems. *ieee transactions on industrial informatics*, 2024.doi: 10.1109/tii.2023.3345450.





Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA)

Volume 3, Issue 1, Spring 2025

Papers List

<u>Number</u>	<u>Paper title/Authors</u>	<u>Page</u>
1	Fuzzy Logic-Based Controller Design for Enhancing Anti-lock Braking System Performance Amir Moghtadaei rad	1
2	A new Approach to Epilepsy Diagnosis based on the Social Spider Algorithm and the Support Vector Machine Bahram Dehghan	13
3	Ultrasound waves, Characteristic and Applications Asma Lak*, Fereshteh Safi	23
4	Numerical analysis of midinfrared dual-side polished and double elliptical cut PCF-based SPR sensor for broad-range refractive index sensing applications Seyed Hossein Moayed, Mojtaba Sadeghi*, Zahra Adelpour	32
5	The classification of selected facial expressions using single-channel electromyographic signals through artificial neural networks and decision trees Niloofer Shojaeian*, Babak Rezaee Afshar	44
6	Development and implementation of smart energy networks using blockchain technology: challenges and opportunities Alireza Joshan	54



Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA) Editorial Board

Director-in-Charge	Hamed Agahi	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
Editor-in-Chief	Taher Niknam	Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
Internal Manager	Zahra Maghsoodzadeh	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
Clerical Staff	Seyedeh-Neda Hosseini	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran

Editorial Board

Professor	Taher Niknam	Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
Professor	Rahim Ghayour	Shiraz University, Shiraz, Iran
Professor	Habibollah Abiri	Shiraz University, Shiraz, Iran
Professor	Hamid Khaloozadeh	K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Professor	Asghar Keshtkar	Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
Professor	Mohammad Bagher Menhaj	Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
Professor	Mohammad Naser Moghadasi	Islamic Azad University, S&R Branch, Tehran, Iran
Professor	Hasan Tavakoli	Baqiyatollah University of Medical Sciences, Tehran, Iran
Professor	Seyedebrahim Afjeii	Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Associate Professor	Hamed Agahi	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
Associate Professor	Ahmad Fakharian	Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran
Associate Professor	Amir-Masud Eftekhari-Moghadam	Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran
Associate Professor	Majid Ebnali	Shahrekord University
Associate Professor	Mohammad Sadegh Javadi Estahbanati	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran



Islamic Azad University , Shiraz Branch
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis



نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها

Journal of Circuits, Data & Systems Analysis

