



Az Óbudai Egyetem lektorált folyóirata
Peer-reviewed journal of the Óbuda University

Bányi Közlemények–Bányi Reports
Az Óbudai Egyetem lektorált folyóirata

ISSN 2560-2810

<http://bk.bgk.uni-obuda.hu>

A folyóirat célja, hogy tudományos igényességgel közölje a legfrissebb kutatási eredményeket az anyagtudomány, gyártástechnológia, gépészet, mechatronika, informatika, biztonságstudomány, közlekedéstudomány, munkavédelem, ipari automatizálás, robotika, energetika, fenntartható technológiák, illetve a mérnöki tudományok egyéb kapcsolódó területeiről.

Megjelenés félévente, jellemzően magyar és angol, esetenként egyéb idegen nyelven. Konferenciákhoz és témákhoz kapcsolódóan különszámok, tematikus számok alkalmi jelleggel magyar, vagy idegen nyelven.

Szerkeszti a szerkesztőbizottság.

A szerkesztőbizottság elnöke	Rajnai Zoltán
Főszerkesztő	Drégelyi-Kiss Ágota
Vezető szerkesztő	Laufer Edit
Kötet szerkesztő	Nagy István
Tudományos szerkesztő	Lóránd Áron

Tartalomjegyzék

Gellért Miklós: Regulatory environment for IoT in Hong Kong	1-4
Amina Bagoudinova, Guyen Ganbat, Arnold Őszi: Internal Navigational System in Aircraft....	5-11
Ahmed Alareqi, Ahmed Douzi, Judit Lukacs: Fuzzy logic-based Control for Intelligent Traffic Systems	12-19
Amgad Naji Ali Ahmed, Edit Laufer, Judit Lukács, Györök György: Improving Switching Efficiency with a Step-Up/Step-Down Hybrid Buck-Boost Converter using fuzzy logic control	20-27
Réka Veronika Sallay, Arnold Őszi: Brainwaves in Biometric Identification: A Theoretical Framework and Novel Methodology	28-37
Annamária Cserfalvi, Márta Takács, Gábor Simon-Nagy: Analysis of the Hungarian unaccented dactylic finger ABC in an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)	38-45
Kovács Gábor, Simon-Nagy Gábor: Többképkockás videószteganográfia.....	46-51
Magyari F. Attila, Dineva Adrienn: Fuzzy logika alkalmazása a gumiiiparban.....	52-57
Kovács Zsombor: Döntéstámogató rendszer tervezése hegesztési füst vizsgálatával	58-63

Regulatory environment for IoT in Hong Kong

Az IoT szabályozási környezete Hongkongban

Gellért Miklós

Doctoral School on Safety and Security Sciences, Óbuda University, Budapest, Hungary
gellert.miklos@gmail.com

Abstract — Governments and regulators around the world have realized the potential benefits of a digital economy and are now developing a regulatory environment that incentivizes IoT (Internet of Things) device manufacturers and service providers to enter the market, while also supporting the adoption of these solutions by the economy. Although IoT undoubtedly leads to increased efficiency, reduced waste, and smarter ways of working, it also introduces heightened data privacy and cybersecurity risks. Hong Kong is one of the leading regions in the development of the digital economy and the adoption of IoT technologies. A new IoT code of practice has been released to increase data security awareness among end users while also raising the security level of the IoT devices entering the market. This paper aims to provide an overview of the code of practice, the most relevant privacy provisions, and the dedicated wireless IoT licensing regime developed by the regulatory authority.

Keywords: IoT, Hong Kong, data security, data privacy, code of practice

Összefoglalás — A kormányok és a szabályozó hatóságok világszerte felismerték a digitális gazdaság potenciális előnyeit, és jelenleg olyan szabályozási környezetet alakítanak ki, amely piacra lépésre ösztönzi az IoT- (*Internet of Things*-) eszközök gyártóit és szolgáltatóit, továbbá támogatja a gazdaságot ezen megoldások alkalmazásában. Az IoT nagyobb hatékonyságot, kevesebb hulladékot és intelligensebb munkamódszereket eredményez, ugyanakkor megnövekedett adatvédelmi és kiberbiztonsági kockázatokhoz vezet. Hongkong az egyik vezető régió a digitális gazdaság fejlesztésében és az IoT-technológia átvételében. Új IoT gyakorlati kódex jelent meg, amely növeli a végfelhasználók adatbiztonsági tudatosságát, miközben a piacra kerülő IoT-eszközök biztonsági szintjét is emeli. A jelen írás célja, hogy áttekintést nyújtson a gyakorlati kódexről, a legfontosabb adatvédelmi rendelkezésekről és a szabályozó hatóság által kidolgozott vezeték nélküli IoT-engedélyezési rendszerről.

Kulcsszavak: IoT, Hongkong, adatbiztonság, adatvédelem, gyakorlati kódex

1 INTRODUCTION

IoT devices are generally used for automated machine-to-machine (M2M) communications. With new wireless technologies such as the fifth-generation (“5G”) mobile technologies and new IoT applications, such as smart cities, precision agriculture, and autonomous vehicles, continuously being developed, it is expected that in Hong

Kong a large number of IoT devices will connect to the public telecommunications networks in the near future. The list of potential use cases includes mission-critical applications that are fundamental to the functioning of society and economy. This proliferation of IoT devices and the processing of vast amounts of data by IoT devices has brought new challenges for data protection and security. In 2019, Hong Kong issued a Code of Practice (CoP) for IoT to ensure that IoT networks and applications are protected against emerging new security threats.

2 IOT CODE OF PRACTICE

The CoP is a dedicated, voluntary collection of best practices and measures addressed to IoT device manufacturers and service providers to ensure the provision of satisfactory service, strengthen consumer protection, and enhance user confidence in the use of IoT devices. Licensed telecommunications service providers offering communications services and platforms for IoT devices are required to provide a high-quality, efficient, and continuous service as required by the Communications Authority (CA), the telecommunications regulatory authority of Hong Kong. In the code of practice, the CA has identified four challenges related to the increasing number of IoT devices connected to networks: (a) privacy, (b) identity, (c) security, and (d) availability. Privacy risk refers to a risk of end-user personal data being unlawfully processed, which may cause harm for individual end-users or their families. Identity-related challenges pertain to the ability to authenticate IoT devices, services and the end-user operating them. From a security perspective, the challenge is to ensure the system integrity of IoT devices to prevent and withstand cyber-attacks while the associated data can be verified, tracked, and monitored. The availability risk means a risk to the uninterrupted connectivity between the IoT devices and services.

The measures and best practices listed in the CoP address these identified challenges. Although voluntary, IoT device manufacturers and IoT service providers are encouraged to implement as many of the measures as possible when entering the Hong Kong market. Additionally, the CoP encourages device manufacturers and vendors to study the referenced documents when developing their own operational and management policies. The referenced documents include guidelines, and policies issued by governments, industry associations and nonprofit organizations. [1]

The CoP recommends that only those manufacturers of IoT devices may deploy IoT devices in Hong Kong who

implement appropriate security policies and resilient measures. In this context, resiliency means that IoT devices are designed in such a way that they are able to run independently, securely, and safely with basic functions even in the event of a failure of IoT platform or network connection loss. These documents should be complemented with a suitable testing process to verify the functions and features of the devices. Security should also include data security.

One of the basic security measures is to implement unique usernames and strong passwords for IoT devices. Usually, the industry standard is to use generic usernames and passwords, which can be changed later by the end-user. However, this poses the risk of the device being restored to factory default settings, thereby enabling access to it using default credentials. For this reason, it is not recommended using IoT devices with hard-coded usernames and passwords in their software. As an additional measure, multi-factor authentication – namely, using an electronic token in addition to a username and password – and identity management technology, including SIM card, are also recommended to increase security.

Usernames and passwords, personal data, and device identifiers should also be stored securely, encrypted on the IoT device to prevent unauthorized access or modification by third parties. If such data needs to be transmitted over the network, it is recommended to apply end-to-end encryption. Further security measures should include, if possible, anti-virus, anti-malware, network firewalls, and access control lists.

Usernames and passwords may be considered as personal data, just as much of the data gathered by IoT devices in certain cases including smart watches, smart cameras. Manufacturers should comply with the data protection requirements and should also ensure that personal data can be permanently erased from devices by the end-user. This is especially important in case of a transfer of ownership or disposal of IoT devices. The devices and applications should process personal data in compliance with the local data protection regulations, and users should be informed about how their data will be used for each IoT device.

Users should have the option to delete any personal data permanently from the devices. According to the CoP, manufacturers should configure the security and privacy settings of IoT devices to the highest possible level by default. Users should only be provided with the minimum set of rights necessary for operating IoT devices. This minimizes the risk of users unknowingly modifying the settings, making it easier for third parties to compromise the devices. The recommendation is that only essential network interfaces should be open for access, while other parts, such as camera, loudspeaker, and microphone, should be enabled only when in use.

Software updates may open up new possible threat vectors for malicious third parties to gain access to an IoT device and the data stored. For this reason, it is recommended that users should be notified in advance of the need for an update and that IoT devices should be

updated as soon as possible in a way that does not impact the functioning of the device. At the end of the device lifecycle, when the IoT devices are no longer updatable, they should be replaced. Software integrity verification is a measure that also helps to defend against malicious attacks. If during the verification process any unauthorized change is found, then the device should be able to alert users and disconnect from any network automatically. This may prevent further access to network elements.

Depending on the use case, IoT devices may have sensors to measure specific values, such as temperature, humidity, brightness, or time, and then execute actions depending on those measurements. For example, a smart thermostat automatically regulating temperature and activating the heating system when the temperature reaches a certain value. IoT device manufacturers should develop devices in such a way that enables devices to validate formats, types, and values of data from any source including data entered by users, collected by the devices themselves or transmitted via the network. If any anomalies are detected, the devices should be able to initiate appropriate mitigating measures. Taking the example of the smart thermostat, a malicious third-party gaining access to the device would be able to control the thermostat and set the temperature to values so high or low that it may cause physical harm, system damage or financial loss for the owners of the devices.

Bug reporting is an important measure to fix any zero-day vulnerabilities and develop timely bug fixes. For this reason, the CoP recommends that manufacturers and operators should maintain a point of contact where users can report security issues and bugs to minimize the security risks. In case the information is reported to the vendors, it should be shared with the manufacturers or operators of the device. The CoP also recognizes that secure devices are necessary, but not sufficient, and users should be educated as well. Adequate guidance should be provided and made available on the installation, configuration, and use of IoT devices. Manufacturers and operators should also share best practices for users to follow.

IoT devices usually serve a function in a wider system, therefore ensuring the security of the network and its elements is not a single action done upon installation, but an ongoing process. The CoP recommends that operators of IoT devices to frequently conduct assessment of potential risks on the relevant risks arising from device operation. In Annex B, the CoP also provides a template checklist for providers of IoT devices to help with the risk assessment. [1] In December 2022, the Telecommunications Regulatory Affairs Advisory Committee (TRACC) proposed an update to the CoP. The update – although still voluntary for providers of IoT – aims to improve the security of IoT services and devices. Based on the update, IoT providers should conduct regular assessments of compliance with best practices published by the CA as part of Annex C, as well as risk assessment based on Section 5 and Annex B of the CoP. IoT device manufacturers and service providers should submit the relevant information and documents to the CA every year. To encourage compliance, the CA will publish the names of those operators that have conducted the compliance check and

made a risk assessment on thematic webpage of the CA for public information [2].

3 DATA PRIVACY

Data privacy in Hong Kong is regulated by the Personal Data (Privacy) Ordinance (PDPO) and the Data Protection Principles (DPPs). The PDPO is one of the longest-standing data protection laws in Asia, which took effect in December 1996. It was inspired by the OECD Privacy Guidelines and was amended in 2012 and 2021. The PDPO is the data privacy law in effect in Hong Kong, therefore it applies to both the private and the public sectors.

Under the PDPO, the DPPs set the framework for data users on how personal data should be collected, processed, and stored. The DPPs are listed in Schedule 1 of the PDPO, and there are six of them. In addition to the PDPO and the DPPs, the Privacy Commissioner has released several guidance notes to guide data users on lawful personal data processing. Although there are guidance notes on various topics, there is no dedicated guidance note on IoT. This means that manufacturers and providers of IoT services need to follow the general principles and requirements set out by the PDPO. To help data users with compliance, the Privacy Commissioner has released the Privacy Management Programme, a framework aimed to develop a privacy infrastructure with a monitoring and reporting process. The recommendations are similar to the mandatory requirements set by the European General Data Protection Regulation (GDPR) as they also include the nomination of a Data Protection Officer, the development of personal data processing policies and data breach notification procedures.

The main difference is that while the GDPR is mandatory, adherence to the Privacy Management Programme is entirely voluntary for data users [4]. This does not mean, however, that data users are not liable for the processing of personal data. In an increasingly digitized world, data is rarely retained within a single country. Data users may contract with other data users or employ data processors located outside Hong Kong; however section 33 of the PDPO imposes restrictions on cross-border data transfer, unless the transfer is exempted by law or the data subject has previously consented to such transfer.

One way for any IoT device manufacturer or service provider to comply with cross-border data transfer restrictions is to include Recommended Model Contractual Clauses (MMCs) in the contracts. The MCCs are developed by the Privacy Commissioner and are shared in a guide with the general public. [5] The clauses are drafted for free use in any contract between two parties. Outsourcing data processing by data users has become common practice across all industries, including IoT.

This means that if a data user contracts with a data processor for processing personal data – including collection, storage, usage, and so forth. – outside Hong Kong then the IoT manufacturer or service provider, as a data user, must adopt contractual or other measures to ensure that the data is kept only as long as it is necessary for the purpose of the processing (under DPP2(3)) and prevent unauthorized or accidental access (under DPP4(2)). Similar to the liability established by the GDPR, under the PDPO the data user is liable for any act committed by the data processor.

4 DATA SECURITY

Cyber threats are among the main threats to the IoT industry. For regulators, IoT manufacturers, and IoT service providers data security is a top priority and main concern. The reason is that IoT devices are used in various industries and use cases, besides it gathers a wide range of data. Any unauthorized access to the data through hacking, malware, or data breaches may have severe consequences for end users. Consequences may include monetary loss, reputational damage, physical harm, or even death.

DPP4 of the PDPO requires all data users to take all practicable steps to ensure that any personal data held by a data user is protected against unauthorized or accidental access, processing, erasure, loss or use [6].

In practice, this means that if an IoT manufacturer or service provider, as a data user, enters into a data processing relationship with a data processor, such as a cloud service, platform, or analytics provider, the data user must ensure the security of the data. Under Section 65(2) of the PDPO a data user is liable for any data processor engaged as an agent. Therefore, data users should ensure that the data processors and any other data users comply with the PDPO and apply robust and resilient security measures to protect the personal data processed.

The Privacy Commissioner is responsible for the enforcement of the requirements. If the Commissioner receives a complaint or has reasonable grounds to suspect a contravention of PDPO, the Commissioner may conduct an investigation of the suspected contravention and publish a report setting out the investigation results and recommendations, if it is in the public interest [7]. The Commissioner may issue an enforcement notice to the data user, directing remedial or preventive steps to be taken. Contravention of an enforcement notice issued by the Commissioner is also an offence, which may result in fines or imprisonment. The possible penalties for disclosure of personal data without consent can reach HK\$1,000,000 or five years imprisonment. End-users who suffer loss or damage because of a data breach are also entitled to pursue civil claims.

5 LICENSING

For a functioning IoT market not only device manufacturers and service providers are needed, but also telecommunications operators that maintain the necessary network infrastructure. The Office of the Communications Authority (OFCA) developed a new licensing regime for the Wireless Internet of Things (WIoT) services on 1 December 2017, allowing telecommunications service operators to provide platforms and services for IoT using the shared frequency band of 920–925 MHz.

This type of IoT license is subject to less stringent regulatory control and lower license fees to encourage the growth of the IoT market and to incentivize telecommunications operators to provide IoT services. Under the WIoT License, licensees are entitled to establish, maintain, and operate wireless networks and systems for the provision of wireless IoT services in Hong Kong, based on wireless technologies operating in the 920–925 MHz band [8].

This frequency band is an unlicensed frequency band used by various low-power, wide-area network (LPWAN) technologies. For cellular connectivity-based IoT solutions, an operator requires a different type of license to provide

the necessary network and connectivity services that enable the communication between IoT devices.

The WIoT license allows the licensees to provide wireless data communications services for automated data-only machine-to-machine communications between network elements and IoT devices. M2M communications are defined as communications between machines or devices in which data can be exchanged in an automatic or scheduled manner with little or no human intervention [9]. The license does not permit the provision of any services that allows real-time voice communications or any other service that is subject to separate licensing requirements.

6 CONCLUSION

The Internet of Things (IoT) is becoming ubiquitous, transforming industries, improving efficiency, and offering new ways of working. Adopters of IoT technology may gain advantages over the competition and, as a result, an increasing number of countries are developing regulatory frameworks to foster development and incentivize the implementation of IoT solutions. However, besides clear advantages, there are also significant risks associated with IoT. The main risks include cyber security and data privacy. Governments and regulators are issuing frameworks, guides, and codes of practices to shape and guide the market.

The code of practice issued by the OFCA serves the same purpose. It serves to guide IoT manufacturers and service providers while protecting end users and enhancing data security and awareness. The collection of best practices and recommendations may increase the security of devices and their users. However, the voluntary nature of the document may limit its effectiveness. Moreover, as additional countries and regions develop similar documents and frameworks with varying requirements, this results in increased complexity and cost to market entry, ultimately raising the prices of the IoT devices and services leading to slower adoption and digitalization.

REFERENCES

- [1] “Code of Practice on the Operation and Management of Internet of Things Devices”, Office of the Communications Authority, Hong Kong, China, Issue 2, April 2023, available here: https://www.coms-auth.hk/filemanager/statement/en/upload/619/cop-iot_e.pdf
- [2] Proposed Update of the “Security Guidelines for Next Generation Networks” and “Code of Practice on the Operation and Management of Internet of Things Devices”, Telecommunications Regulatory Affairs Advisory Committee, Hong Kong, China, TRAAC Paper No. 4/2022, 19 December 2022, available here: https://www.ofca.gov.hk/filemanager/ofca/en/content_757/traac4_2022.pdf
- [3] Privacy Protection and Data Governance in the Internet of Things, Hong Kong Academy of Law, Office of the Privacy Commissioner for Personal Data, Hong Kong, China, 5 June 2019, available here: https://www.pcpd.org.hk/english/news_events/speech/files/AcademyofLaw_0605.pdf
- [4] Privacy Management Programme – A Best Practice Guide, Privacy Commissioner for Personal Data, Hong Kong, China, March 2019, available here:

https://www.pcpd.org.hk/english/publications/files/PMP_guide_e.pdf

- [5] Guidance on Recommended Model Contractual Clauses for Cross-border Transfer of Personal Data, Privacy Commissioner for Personal Data, Hong Kong, China, May 2022, available here: https://www.pcpd.org.hk/english/resources_centre/publications/files/guidance_model_contractual_clauses.pdf

- [6] Personal Data (Privacy) Ordinance, Hong Kong, China, accessible here: https://www.elegislation.gov.hk/hk/cap486?xpid=ID_143_8403261084_001

- [7] Office of the Privacy Commissioner for Personal Data, Hong Kong, China, accessible here: https://www.pcpd.org.hk/english/data_privacy_law/ordinance_at_a_Glance/ordinance.html

- [8] Guidelines for Submission of Applications for Wireless Internet of Things Licence, Office of the Communications Authority, Hong Kong, China, Issue 2, 29 June 2021, available here: <https://www.coms-auth.hk/filemanager/statement/en/upload/566/gn132021.pdf>

- [9] Numbering Arrangement for Machine-to-Machine Communications, Telecommunications Regulatory Affairs Advisory Committee, Hong Kong, China, 20 November 2014, available here: https://www.ofca.gov.hk/filemanager/ofca/en/content_757/traac5_2014.pdf

Internal Navigational System in Aircraft

Repülőgépek belső navigációs rendszere

Amina Bagoudinova*, Guyen Ganbat *, Arnold Őszi, PhD.*

* Óbuda University, Faculty of Mechanical and Safety Engineering, Budapest, Hungary
abagoudinova@mail.ru, guyen.ganbat@gmail.com, oszi.arnold@bkg.uni-obuda.hu

Abstract — Inertial navigation systems (INSs) are essential for modern aircraft, enabling accurate determination of position, attitude, and velocity without external references. This paper reviews the operational principles of INS, emphasizing the integration of gyroscope and accelerometer data, data flow within the system, and the importance of platform stabilization and alignment procedures. Key sources of error—such as sensor noise and platform instability—are identified, along with current strategies for error compensation and calibration. The evolution towards Inertial Reference Systems (IRS) is also discussed. By summarizing both theoretical foundations and practical considerations, this paper supports the development and maintenance of reliable INS solutions for aviation.

Keywords: inertial navigation system (INS), aircraft navigation, attitude and heading reference systems (AHRS), sensor fusion, error mitigation.

Összefoglalás — A belső navigációs rendszerek (Internal Navigation System, INS) nélkülözhetetlenek a modern repülőgépek számára, mivel külső referenciák nélkül is pontos pozíció-, attitűd- és sebességhatározást tesznek lehetővé. A cikk áttekinti az INS-ek működési elveit, kiemelve a giroszkóp- és gyorsulásmérő-adatok integrációját, az adatáramlás fő szakaszait, valamint a platform stabilizálásának és igazításának szerepét. Azonosítjuk a legfontosabb hibaforrásokat – például az érzékelőzajt és a platform instabilitását –, továbbá bemutatjuk a korszerű hibakompenzációs és kalibrációs eljárásokat. Kitérünk az INS rendszerek fejlődésére és az IRS-ek (inerciális referencia-rendszerek) irányába mutató tendenciákra is. A tanulmány célja a megbízható navigációs rendszerek fejlesztésének támogatása az elméleti és gyakorlati szempontok bemutatásával.

Kulcsszavak: belső navigációs rendszer (INS), repülőgép navigáció, helyzet- és irányreferencia-rendszerek (AHRS), szenzorfüzió, hibacsökkentés.

1 INTRODUCTION

Inertial navigation systems (INSs) have become indispensable for modern navigation applications, providing precise positioning and attitude information even in the absence of external references. In the realm of aviation, INSs are essential components of aircraft navigation systems, enabling pilots to navigate accurately, safely, and efficiently [1].

INS typically consists of three main components: gyroscopes, accelerometers, and a central processing unit (CPU) (Fig. 1). Gyroscopes measure angular rates,

enabling the INS to determine the aircraft's orientation. Accelerometers measure linear acceleration, which is used to compute the velocity and position of the aircraft. The CPU integrates sensor data, applies navigation models, and generates navigation outputs



Fig.1. Inertial Navigation System (INS)

The accuracy of an INS is primarily determined by the performance of its sensors and the implementation of error mitigation strategies. Sensor noise, platform instability, and modeling errors can significantly degrade INS performance. To address these challenges, advanced INS designs incorporate sensor fusion techniques, that combine data from multiple sensors to improve accuracy and robustness.

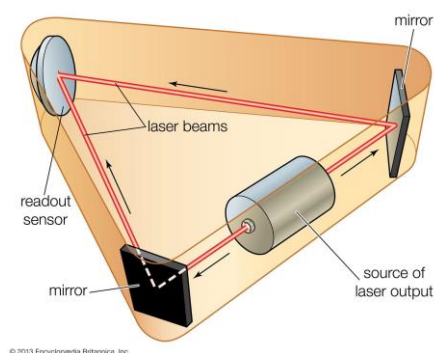


Fig.2. Gyroscope

Gyroscopes (Fig. 2) are critical components of INSs, as they measure angular rates and form the basis for determining aircraft orientation [2]. The most common type of gyroscope in INSs is the ring laser gyroscope (RLG), which utilizes the Sagnac effect to measure angular

displacement. RLGs offer high precision and stability, making them well-suited to demanding navigation applications.



Fig.3. Accelerometer

Accelerometers (Fig. 3) are the other key sensors in INSs. MEMS (micro-electromechanical system) accelerometers are widely used in INSs due to their small size, low cost, and reliable performance.

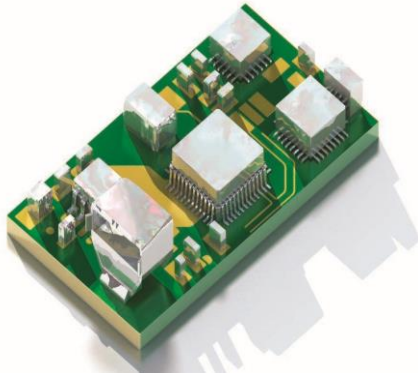


Fig.4. Attitude and heading reference system (AHRS)

An attitude and heading reference system (AHRS) (Fig. 4) is a specialized type of INS that combines gyroscopes and accelerometers to determine the aircraft's attitude (orientation) and heading (direction). AHRSs are often used as backup systems for INSs or as standalone navigation systems for cost-sensitive applications.

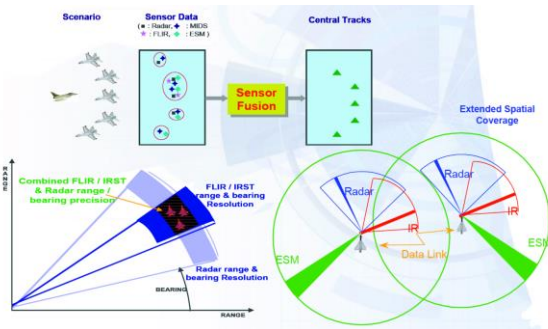


Fig.5. Sensor fusion

Sensor fusion techniques (Fig. 5)) combine data from multiple sensors to improve the accuracy and robustness of navigation systems.

Error mitigation is essential for maintaining INS accuracy. These strategies include techniques such as:

- Data averaging: Averaging multiple sensor readings can reduce the impact of sensor noise;
- Calibration: Regular calibration of sensors can help to compensate for sensor drift;
- Model updates: The INS's navigation models can be updated periodically using external references, such as GPS, to improve accuracy.

2 PRINCIPLE OF OPERATION

An INS operates based on the fundamental laws of motion. Gyroscopes measure angular rates, while accelerometers measure linear accelerations. The INS integrates these measurements over time to determine the position, attitude, and velocity of the aircraft [2].

Attitude is described by three Euler angles: roll, pitch, and yaw. Roll denotes rotation of the aircraft about its longitudinal axis, pitch is the rotation about its lateral axis, and yaw is the rotation about its vertical axis. The INS's velocity is represented by three components: north, east, and down.

Position is determined by integrating its velocity over time. However, this process can lead to errors due to sensor noise, platform instability, and modeling inaccuracies. To mitigate these, the INS employs a variety of techniques, such as sensor fusion and Kalman filtering [7].

2.1 Data Flow

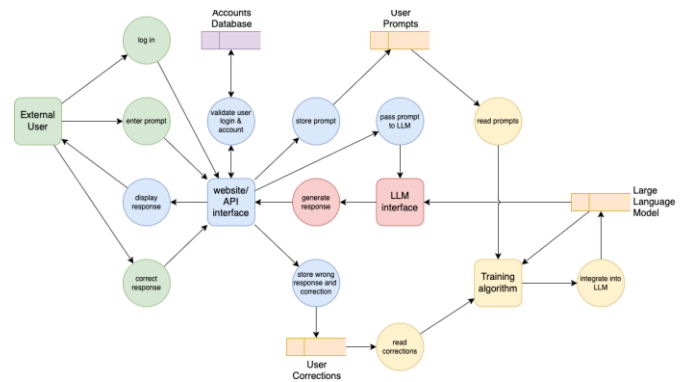


Fig.6. Data flow of INS

The data flow in an INS (Fig. 6) typically follows a three-stage process [4]:

- Sensor data acquisition: Collecting angular rates and linear accelerations from the gyroscopes and accelerometers, respectively.
- Attitude determination: Integration of angular rates to determine the aircraft's orientation.

- Position and velocity estimation: Integration of accelerometer data and application of a velocity model to obtain position and velocity estimates.

The central processing unit (CPU) is responsible for coordinating all aspects of the data flow. The CPU also implements error mitigation strategies to ensure accurate estimation of position, attitude, and velocity.

2.2 Platform Stabilization

Platform stabilization is essential for INS accuracy [3]. The INS platform must be isolated from external disturbances such as vibration and acceleration, to ensure accurate sensor measurements. This is typically achieved using of gimbals and dampers.

2.3 Alignment

Alignment is the process of initializing the INS by setting its reference frame to match the actual orientation of the aircraft. This is typically done using external references, such as GPS or magnetic heading.

2.4 Operation

Once the INS is aligned, operation can begin. The position, attitude, and velocity estimates, computed by INS, are then used for navigation and guidance, including providing heading information to autopilots and controlling the aircraft's flight path.

2.5 Errors

INS errors can arise from a variety of sources, among which are [7]:

- Sensor noise,
- Platform instability,
- Model inaccuracies.

These errors can degrade INS accuracy and must be considered in the design and implementation of INSs.

Error mitigation strategies can reduce the impact of INS errors. These strategies include:

- Sensor fusion,
- Calibration,
- Model updates.

By implementing error mitigation strategies, INSs can achieve high levels of accuracy and reliability.

3 DATA FLOW

3.1 Sensor Data Collection

The process begins with the collection of sensor data from various sources, primarily gyroscopes and

accelerometers. Gyroscopes measure angular rates, providing information on the aircraft's rotation around its three axes: roll, pitch, and yaw, and accelerometers quantify linear accelerations along three axes: north, east, and down, reflecting the aircraft's movement relative to the Earth's surface [2].

3.2 Data Processing and Integration

The acquired sensor data undergo rigorous processing and integration to extract meaningful information. Gyroscope data are integrated over time to determine the aircraft's orientation relative to inertial space. This attitude information is crucial for correctly interpreting accelerometer readings. Accelerometer data are combined with attitude information and applied to a velocity model to estimate the aircraft's velocity and position.

3.3 Sensor Fusion and Kalman Filtering

The INS utilizes a technique known as sensor fusion to combine data from multiple sensors, including gyroscopes and accelerometers. This fusion process ensures that the INS receives the most accurate and comprehensive information for navigation computations. Kalman filtering is a mathematical algorithm employed to refine navigation estimates by considering prior knowledge and sensor data. It effectively mitigates the effects of sensor noise and errors.

3.4 Central Processing Unit (CPU)

The central processing unit (CPU) plays a pivotal role in coordinating the data flow, as well as managing sensor data acquisition, processing, and integration. The CPU also implements error mitigation strategies and applies Kalman filtering to enhance the accuracy of the INS.

3.5 Navigation Information Delivery

The culmination of the data flow process is the delivery of precise navigation information to the aircraft's autopilot and other systems. The INS provides the aircraft with its position, attitude, and velocity information, which are essential for navigation, guidance, and control. The autopilot relies on this information to maintain the aircraft's flight path, while other systems, such as flight management computers and terrain awareness and warning systems (TAWS), also utilize the INS navigation data.

4 PLATFORM STABILIZATION

Platform stabilization is a critical aspect of inertial navigation systems (INS), as it ensures the accurate measurement of angular rates and linear accelerations. The INS platform houses sensitive gyroscopes and accelerometers, that require a stable platform to function effectively. Without proper stabilization, the platform is subject to disturbances and vibrations, causing errors in the

sensor readings. These errors accumulate over time, leading to significant inaccuracies in the INS navigation calculations.

To mitigate these errors, INSs incorporate sophisticated stabilization mechanisms, typically involving gimbals. Gimbals are highly precise mechanisms that isolate the sensor platform from external disturbances, enabling it to maintain a fixed orientation relative to inertial space. This isolation prevents the platform from being influenced by vibrations, motion, and other external forces, thus ensuring the accuracy of sensor readings.

There are two primary types of gimbal systems employed in INSs: strapdown and gimballed.

Strapdown systems utilize electronic gyroscopes to compensate for platform motion, thereby effectively eliminating the need for physical gimbals. This approach simplifies the INS design and reduces weight, but it relies on the accuracy of the electronic gyroscopes. Gimballed systems, on the other hand, physically isolate the sensor platform using mechanical gimbals, providing a more robust and reliable stabilization method.

The importance of platform stabilization in INSs cannot be overstated [3]. Without proper stabilization, the INS would quickly accumulate errors, rendering it ineffective for accurate navigation. The accumulation of errors would result in significant discrepancies between the INS navigation estimates and the aircraft's actual position and orientation. This may lead to navigation errors, deviation from flight paths, and potential safety hazards.

Therefore, platform stabilization is an essential component of any INS. It ensures the accuracy of sensor readings, enabling the INS to provide reliable and precise navigation information for aircraft operation, even under challenging environmental and flight conditions.

5 ALIGNMENT

Alignment is a crucial step in the initialization of an inertial navigation system (INS), ensuring that the reference frame of the system is properly aligned with the Earth's reference frame.

This alignment is essential for accurate navigation, as it allows the INS to:

- Determine the aircraft's absolute position: Without proper alignment, the INS would have no reference point to measure the aircraft's movement relative to Earth.
- Correct for gyroscope bias: Gyroscopes gradually drift over time, accumulating errors that can significantly impact navigation accuracy. Proper alignment calibrates the gyroscope bias, minimizing its impact on navigation.
- Ensure consistent heading: The INS relies on the gyroscopes to measure the aircraft's heading. Without proper alignment, the heading estimates drift, making it difficult to maintain a consistent flight path.

5.1 Primary methods for aligning an INS

Two primary methods are used for aligning an INS:

- Pre-alignment: Pre-alignment involves setting up the INS at a ground station with known coordinates

and orientation. The INS collects sensor data and compares it to the known reference frame. This process allows the INS to calibrate its sensors and initialize its internal navigation model.

- In-flight alignment: In-flight alignment is used when pre-alignment is not feasible, such as during takeoff or landing. This method involves using external references, such as global navigation satellite system (GNSS) signals or magnetic fields, to align the INS reference frame with the Earth's reference frame.

The accuracy of alignment is critical for precise navigation. If the INS is not properly aligned, it accumulates errors over time, leading to inaccurate position and heading estimates. These errors can be significant, especially during long-duration flights.

5.2 Techniques to ensure the accuracy of alignment

To ensure the accuracy of alignment, a variety of techniques are employed, including [5]:

- Careful sensor selection: Using high-quality sensors and minimizing sensor noise improves the accuracy of alignment.
- Rigorous calibration: Calibrating the sensors before and after alignment further enhances accuracy.
- Repeated alignment: Aligning the INS periodically, such as after significant maneuvers or changes in the environment, can maintain accuracy over time.

In summary, alignment is an essential part of INS operation, ensuring that the system provides accurate and precise navigation information. By carefully aligning the INS and using appropriate techniques, aircraft can navigate safely and efficiently, even in challenging environments.

6 SECTION HEADINGS OPERATION

6.1 INS Operation During Different Flight Phases

The operation of an inertial navigation system (INS) varies throughout the phases of flight. During takeoff, the INS relies primarily on stored pre-alignment data to determine the initial position and orientation of the aircraft. Once airborne, the INS continuously updates its position and velocity estimates using its internal navigation model and sensor data from gyroscopes and accelerometers.

During cruise, the INS operates independently, providing accurate navigation information for the autopilot to maintain the aircraft's flight path and altitude. The INS continues to integrate sensor data to refine its position and velocity estimates, ensuring precise navigation even over extended periods.

Approach and landing require greater accuracy, as the aircraft transitions to lower altitudes and higher speeds. In these phases, the INS may integrate external navigation data from global navigation satellite systems (GNSS) to enhance its accuracy and reduce reliance on accumulated errors. The INS then provides this refined navigation information to the autopilot to guide the aircraft safely to touchdown [6].

6.2 Integration with Other Navigation Systems

The integration of INSs with other navigation systems, such as GNSS, has become increasingly common in modern aircraft [4]. GNSS provides absolute position information based on signals from satellites, whereas the INS provides continuous position updates even in the absence of GNSS data. This combination of systems significantly improves the accuracy and reliability of navigation, particularly during critical phases of flight.

GNSS data can also be used to periodically update the INS reference frame, thereby minimizing the accumulation of errors over time. This integration enables the INS to maintain high accuracy even during long-duration flights without external reference signals.

6.3 Adaptation to Aircraft Dynamics and Environmental Conditions

The INS continuously adapts to changes in aircraft dynamics and environmental conditions to maintain accurate navigation. The internal navigation model of the INS takes into account factors such as aircraft acceleration, airspeed, and changes in the Earth's magnetic field. This adaptation ensures that the INS calculations remain accurate even as the aircraft's environment and conditions change.

For instance, the INS can compensate for changes in airspeed by adjusting its estimates of ground speed and position. Similarly, the INS can adapt to changes in the magnetic field of the Earth by incorporating updated magnetic field data into its navigation model.

This adaptability is crucial for ensuring the INS accuracy in challenging environments, such as during high-speed maneuvers or in areas with strong magnetic interference. By continuously adapting to changing conditions, the INS can provide reliable navigation information even under demanding flight scenarios.

7 ERRORS

7.1 Common Errors in INS

Despite their sophisticated design and advanced technology, INSs are susceptible to errors that can degrade their accuracy and performance [8]. These errors can arise from various sources, including:

- **Sensor drift:** Gyroscopes and accelerometers, the primary sensors used in INSs, are prone to drift over time. This drift causes the sensors to gradually deviate from their true readings, leading to errors in the INS navigation.
- **Calibration inaccuracies:** Imperfect calibration of sensors can introduce errors in the INS measurements. Deviations from the calibrated values can accumulate over time, further degrading the INS accuracy.

- **External disturbances:** External factors such as vibrations, temperature fluctuations, and magnetic interference can affect the readings of gyroscopes and accelerometers, introducing errors into INS calculations.

7.2 Sources of Error

The accumulation of errors over time presents a significant challenge for INSs [7]. These errors can become substantial, especially during long-duration flights or in challenging environments. To mitigate these errors, INSs employ various techniques, including:

- **Sensor Fusion:** Combining data from multiple sensors, such as gyroscopes, accelerometers, and magnetometers, helps compensate for individual sensor errors.
- **Kalman Filtering:** Kalman filtering is a mathematical algorithm that continuously updates the INS's navigation estimates based on sensor data and prior knowledge. This technique refines INS estimates and reduces the impact of errors.
- **Regular Alignment:** Aligning the INS periodically ensures that its reference frame remains accurate and that the effects of sensor drift are minimized.
- **External References:** Integrating INS with external navigation systems, such as GNSS, provides accurate position updates and reduces reliance on accumulated errors.

7.3 Mitigating and Correcting Errors

By employing these techniques, INSs can effectively mitigate and correct errors, maintaining high accuracy and reliability for navigation applications [7]. However, it is important to note that no navigation system is entirely immune to errors. Continuous monitoring and maintenance of INSs are essential to ensure their performance and safety.

8 CASE STUDIES

INSs are widely used in civil aviation, particularly in commercial aircraft [7]. They play a crucial role in navigation, providing accurate position, attitude, and velocity information for various aircraft systems, including autopilots, flight management computers, and terrain awareness and warning systems (TAWS).

8.1 Case Study 1: Precession Error Compensation

Precession error is a common challenge in INSs, caused by the gradual rotation of the gyroscope axis due to external

forces. In commercial aircraft, this error can accumulate over time, leading to significant inaccuracies in navigation calculations. To address this issue, commercial aircraft typically employ dual-gyroscope systems with cross-coupling compensation. This technique involves using two gyroscopes mounted in perpendicular directions, to cancel out the effects of precession error.

8.2 Case Study 2: INS Integration with GNSS

INSs are often integrated with GNSS receivers to enhance navigation accuracy and reliability. GNSS data provides absolute position information, while the INS provides continuous position updates even in the absence of GNSS signals. This combination is particularly valuable during approach and landing phases when high precision is critical. By integrating INS and GNSS data, aircraft can maintain accurate navigation even during periods of signal loss or interference [9].

8.3 INS in Military Aviation

INSs are also extensively used in military aviation, where they play a vital role in navigation, targeting, and weapon delivery. Their ability to operate without external references makes them particularly valuable in combat scenarios where GPS signals may be disrupted or unavailable [1].

8.4 Case Study 3: INS in Helicopters

In helicopters, INSs are essential for maintaining accurate heading and attitude control, particularly during hover and low-speed maneuvers. They enable the pilot to maintain a stable flight path and perform precise maneuvers, even in challenging environments.

8.5 Case Study 4: INS in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

In UAVs, INSs are critical for autonomous navigation and flight control. They provide the UAV with the necessary information to navigate to its destination, avoid obstacles, and perform maneuvers as programmed [5].

8.6 Challenges in Practical Implementations

Despite their advantages, INSs also face challenges in practical implementations. These challenges include:

- **Cost:** INSs are relatively expensive compared to other navigation systems, such as magnetic compasses or air data computers. This can limit their use in smaller aircraft or in applications where cost is a major concern [2].
- **Complexity:** INSs are complex and require specialized expertise for installation, maintenance, and calibration. This can pose challenges for operators lacking the necessary technical resources [2].

- **Calibration and maintenance:** INSs require regular calibration and maintenance to ensure their accuracy and reliability. This can be costly and time-consuming, especially in remote or challenging environments [2].
- **External Dependence:** INSs rely on external references, such as GNSS, for absolute position updates. In the absence of these references, INS accuracy will degrade over time [1].

8.7 Case Study 5: INS in Harsh Environments

INSs are particularly challenging to operate in harsh environments, such as combat zones or high-altitude flights. In these environments, they are susceptible to damage from external forces, such as shock, vibration, and extreme temperatures.

To address these challenges, INSs are typically hardened to withstand harsh environments. This may involve using ruggedized components, employing redundancy, and implementing advanced error detection and correction techniques.

9 CONCLUSION

Inertial navigation systems (INS) play a critical role in navigation, providing accurate position, attitude, and velocity information for various applications. Understanding the principles of INS operation, data flow, platform stabilization, alignment, errors and their mitigation strategies is essential for designing, implementing, and maintaining reliable INSs for aircraft operation [8].

Key takeaways:

- INSs rely on gyroscopes and accelerometers to measure angular rates and linear accelerations, respectively.
- The data flow of an INS typically involves three stages: sensor data acquisition, data processing and integration, and navigation information delivery.
- Platform stabilization is crucial for INS accuracy, ensuring isolation from external disturbances. Gimbals and dampers are common stabilization mechanisms.
- Alignment is essential for initializing the INS reference frame and compensating for gyroscope bias. Pre-alignment and in-flight alignment are common methods.
- INS errors can arise from sensor drift, calibration inaccuracies, and external disturbances. Sensor fusion, Kalman filtering, regular alignment, and external references help mitigate these errors.
- INSs are widely used in civil aviation, military aviation, helicopters, UAVs, and other applications.
- Practical challenges of INSs include cost, complexity, calibration and maintenance requirements, and external dependence.
- INSs are particularly challenging to operate in harsh environments, and hardening techniques are employed to address these challenges.

INS provides valuable navigation information for accurate positioning, attitude control, and flight guidance.

By understanding the fundamentals of INS operation, data flow, error mitigation, and practical implementation, stakeholders can effectively incorporate INSs into their applications for safe and reliable navigation.

10 REFERENCES

- [1] Chen, N. (2003). Strapdown inertial navigation systems (2nd ed.). Springer Science & Business Media. New York, NY. 2003. pp. 1-18, 58-59, 157-158.
- [2] Hedrick, C. M. (2006). Inertial navigation: Theory and application. Academic Press. New York, NY. 2006. pp. 3-4, 319-320.
- [3] Lachapelle, G., & Lefebvre, M. O. (2006). GPS for land navigation: Principles and applications (3rd ed.). McGraw-Hill Education. New York, NY. 2006. pp. 7-8.
- [4] Markley, F. L., & Crassidis, J. L. (2007). Optimal estimation of spacecraft attitude, position, and velocity. Springer Science & Business Media. New York, NY. 2007. pp. 65-80, 200-202.
- [5] Hegarty, S., & Noronha, J. (2006). Introduction to inertial navigation systems. Artech House. Boston, MA. 2006. pp. 103-104, 266-267.
- [6] Shuster, M. D. (2008). Applied optimal estimation. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 2008. pp. 6-7.
- [7] Grewal, M. S., Andrews, A. P., & Barton, D. C. (2013). Modern inertial technology: Navigation, guidance, and control (5th ed.). Artech House. Boston, MA. 2013. pp. 1-18, 25-52, 536-537, pp. 119-122.
- [8] Heslin, J. J. (2009). Inertial navigation for unmanned aerial vehicles. Springer Science & Business Media. New York, NY. 2009. pp. 195-196.
- [9] Leffert, J., & Markley, F. L. (2012). Fundamentals of inertial navigation. AIAA Education Series. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reston, VA. 2012. pp. 200-202.

Fuzzy logic-based Control for Intelligent Traffic Systems

Fuzzy logikán alapuló vezérlés intelligens közlekedési rendszerekhez

Ahmed Alareqi*, Ahmed Douzi*, Judit Lukacs**

*Óbuda University, Doctoral School on Safety and Security, Budapest, Hungary

** Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering, Budapest, Hungary
ahmedalareqi@outlook.com; ahmeddouzi1993@gmail.com; lukacs.judit@bgk.uni-obuda.hu

Abstract — In the realm of traffic management, conventional systems often rely on manual intervention at junctions, leading to inefficiencies and stress for commuters. This manual approach causes mental strain for passengers and results in significant fuel wastage due to delays at traffic junctions. Intelligent Traffic Systems (ITS) have long been recognized as effective tools for mitigating traffic congestion and improving traffic flow. By combining hardware and software techniques, ITS can monitor traffic movements and optimize signal timings to alleviate congestion. The cost-effectiveness of ITS is significantly influenced by the method used for traffic data collection. Utilizing ultrasonic and IR sensors for traffic flow measurement has been proposed as a means to reduce installation and maintenance expenses while enhancing system efficiency. This paper presents the design and implementation of an intelligent traffic lights controller utilizing fuzzy logic. By integrating roadside sensors and an Arduino Mega interface with ultrasonic sensors, the system dynamically adjusts traffic signals to manage congestion effectively. Implementing this system at intersections not only eliminates the need for manual traffic control but also reduces overall wait times compared to traditional traffic control systems.

Keywords: Fuzzy logic, Intelligent Traffic Systems, Arduino, smart traffic lights controller, ultrasonic sensors.

Összefoglalás — A forgalomirányítás területén a hagyományos rendszerek gyakran a csomópontokban történő manuális beavatkozásra támaszkodnak, ami hatékonyságvesztéshez és a ingázók számára stresszhez vezet. Ez a manuális megközelítés mentális terhelést okoz az utasoknak, és jelentős üzemanyag-pazarlást eredményez a forgalmi csomópontokban tapasztalható késések miatt. Az Intelligens Közlekedési Rendszerek (ITS) régóta elismert hatékony eszközök a forgalmi torlódások enyhítésére és a forgalom javítására. Hardveres és szoftveres technikák kombinálásával az ITS képes figyelemmel kísérni a forgalom mozgását és optimalizálni a jelzések időzítését a torlódások enyhítése érdekében. Az ITS költséghatékonyságát jelentősen befolyásolja a forgalmi adatok gyűjtésére használt módszer. Az ultrahangos és infravörös (IR) érzékelők alkalmazása a forgalom mérésére javasolt, mint az telepítési és karbantartási költségek csökkentésének, valamint a rendszer hatékonyságának növelésének eszköze. Ez a tanulmány egy intelligens közlekedési lámpa vezérlő tervezését és megvalósítását mutatja be, amely fuzzy logikát alkalmaz. Az út menti érzékelők és egy Arduino Mega interfész

ultrahangos érzékelőkkel történő integrálásával a rendszer dinamikus állítja be a forgalmi jelzéseket a torlódások hatékony kezelésére. Ennek a rendszernek a kereszteződésekben történő bevezetése nemcsak megszünteti a manuális forgalomirányítás szükségességét, hanem a hagyományos forgalomirányítási rendszerekhez képest csökkenti az általános várakozási időket is.

Kulcsszavak: Fuzzy logika, Intelligens közlekedési rendszerek, Arduino, intelligens közlekedési lámpavezérlő, ultrahangos szenzorok

1 INTRODUCTION

Traffic lights are mainly utilized to regulate and coordinate movement among vehicles. Every day, traffic congestion issues increase as a result of the increasing number of fixed-frame vehicles on the road. The existing clock-based traffic light systems are categorically ineffective for controlling traffic in this circumstance. The traffic lights guarantee that vehicles can pass through the intersection in a systematic way from all directions. The traffic signal lights are typically set to turn on and off at specific times. But in daily life, we see that traffic on a two-way road is typically heavier on one side than the other. In this case, scheduling equal amounts of time for both types of traffic leads to congestion during peak traffic hours and causes traffic delays.

There are many ways to reduce traffic congestion; one of them is to inform the driver about the actual cause of the traffic [1], this is not the best solution, so a framework for continual traffic control that adjusts the traffic signal based on traffic density is needed to address this problem.

The current traffic signal control system uses postponements, where the sign change timings are predetermined and independent of the flow of traffic. In order to resolve the major traffic jam difficulties, the current traffic density should be increased. So, to address several problems and enhance the trafficking framework, An intelligent traffic signal framework is presented.

Using ultrasonic sensors and IR sensors located on each side of the road, and an Arduino MEGA 2560 Microcontroller, which is a key component of the framework, helps to control the traffic automatically.

There is excessive and unnecessary waiting time on the roads, and vehicles use more fuel, because of the predetermined time gaps between green and red lights. This

ultimately contributes to environmental degradation and causes several health problems for those living nearby and traveling nearby. Additionally, these traditional traffic light control systems lack any options for providing data on traffic volumes on different roadways, which causes traffic jams.[2]

The transportation industry has just recently begun to conceptualize congestion in this way. However, this is essential because different methods must be developed to deal with each congestion source, and these techniques can differ greatly from one highway to another. Fig.1 shows a graphic representation of the estimated national contribution of each of these sources to overall congestion. These figures are approximations based on a variety of previous and continuing research investigations.

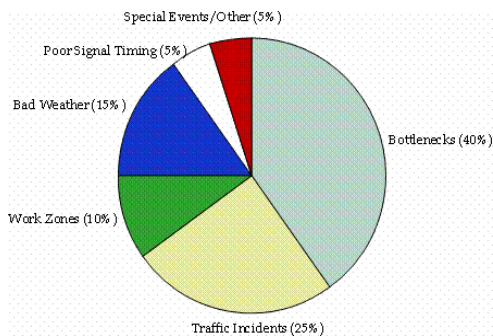


Fig. 1: The sources of congestion national summary [3]

The reliability of travel times is another growing issue. One important factor in the congestion issue is the daily change in travel times. Travel delays do not always result in the same amount of additional travel time or disruption to the day or system. It affects not only commute travel but also every trip made during peak travel times, and it is a major worry for both big and small businesses across the board. Agencies can determine the additional travel time that must be allocated—or buffer time—above the normal travel time using extremely comprehensive data from some urban freeways. Congestion has a direct impact on the amount of time that shippers, carriers, business travelers, commuters, and homeowners must budget for.

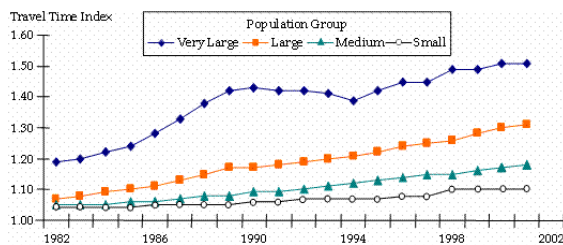


Fig. 2: Peak-Period Congestion (Travel Time Index) Trends by U.S. Population Group [3]

In this paper, the implementation of an intelligent traffic lights control system using fuzzy logic technology, capable of mimicking human intelligence in controlling traffic lights, is discussed. A hardware model has been developed to simulate an isolated traffic junction. Analyses such as waiting time, density, cost, etc., can be performed using the hardware. Additionally, the hardware model can serve as an educational tool for undergraduate and graduate students to grasp the concept of fuzzy logic and its real-world applications.

This paper has been organized as follows. First, a brief overview on traffic lights control system is presented. Then, the Literature review and already existed solutions. After that, development of the hardware model and its usage is next discussed. A comparison between the performance of the fuzzy traffic lights controller and the conventional fixed-time controller is analyzed and discussed in the section that follows. Slower speeds, longer travel times, and higher vehicular queuing are the hallmarks of the transport condition known as traffic congestion. Congestion occurs when transportation demand is high enough that interactions between cars slow down the flow of traffic

2 LITERATURE REVIEW

Accuracy in the collection of traffic data, such as traffic flow, speed, and density, is one of ITS's most important features. The system uses the data as input to make the appropriate judgments. In order to assess traffic conditions like congestion and backups, the number of vehicles and their rate of movement during a given time period in the road networks is typically utilized as a technique. This has given rise to a wide variety of techniques for recording vital information about traffic flow on a road network. In a document titled "Vehicle Sensing: Ten Technologies to Measure Traffic," ten (10) vehicle sensing technologies were covered. Manual counts, video vehicle detection, pneumatic road tube counting, piezoelectric sensors, inductive loops, magnetic sensors, and other methods were covered. The manual and automatic vehicle detection approaches can be classified into two major categories at once. Zheng and Mike[4], who conducted a thorough investigation of the manual counting of vehicles, came to the conclusion that the method can be successful with the exception of the classification of vehicles, which is susceptible to error.

Automatic vehicle counting counts the number of moving cars along a road using a variety of hardware and software technologies. The hardware used for data acquisition and the algorithm used to process the data once it has been acquired in order to extract the required information from it generally make up the system's strength. This field is active because of problems with sensing device accuracy, installation methods, energy consumption, installation maintenance costs, and the impact of the environment on performance[5].

The Peripheral Interface Controller (PIC) Microcontroller was introduced by R. Weil, J. Wootton, and A. Garcia Ortiz in 1998[6]. As an intelligent traffic signaling system based on traffic density. The total number of cars in the memory is saved by this system in real time. The microcontroller transmits the collected data in its entirety to a computer. To reduce traffic jams, the person who has full access to the computer at the main station will be aware of all the traffic conditions pertaining to any active traffic light on the nearby street. Future versions of this system will be able to inform drivers about the flow of traffic in various locations, but it will also require human input to determine which road should be opened, which will be determined by human assessment.

Research on traffic systems based on traffic density is presented in "K. Thatsanavipas, N. Ponganunchoke, et al.," 2010 [7]. It is based on image processing methods such as edge detection to identify the density of traffic that emerges from the current traffic signaling system, as shown in fig.2.

The key benefits of developing a smart system for traffic control include the decrease of congestion, lower operating costs, providing drivers with alternate routes, and finally, the development of high-capacity infrastructure. Generally, it's a complicated system and also too expensive due to the use of a high-quality camera and the operation of installing it on roads, besides the need for a high computing machine if compared with the proposed sensors' prices and installation method.

The traffic control system based on traffic density will be constructed using an infrared [IR] sensor that will determine the green light time interval using a microcontroller, according to Wanjing Ma and Xiaoguang Yang, 2008,[8].

The sensor will be placed on the sides of the road, where it will look for cars before sending the information to the microcontroller. The microcontroller will choose the duration of the red and green light cycles based on the fuzzy controller. So, the timing of the traffic light delay here will be determined based on the number of cars and the queue.

Roswan Latuconsina, Tito Waluyo Purboyo, and Moch Agung Prasetyo (2018)[9] introduced another system that was similar to ours but quite different in terms of cost. The proposed system consists of three ultrasonic sensors placed along each road to measure the level of traffic congestion and report the situation to the microcontroller as follows: the first sensor indicates light traffic, and the second indicates a normal traffic jam. The third indicates heavy traffic, which prompts a change of the traffic light to decrease traffic congestion.

According to the previously examined literature, the current systems have used an infrared (IR) sensor or several ultrasonic sensors for the traffic control system, which has a disadvantage or a challenge. The difficulty in using numerous ultrasonic sensors to measure the amount of traffic on the road and send the situation to the microcontroller consequently. The first sensor indicates light traffic. The Second Sensor stands for a typical traffic jam. The third position denotes heavy traffic, which prompts a change in the traffic lights to ease the gridlock. Another issue with using three ultrasonic sensors for each road is their price.

3 METHODOLOGY

This section, the main components, which were used in this paper, are going to be explained. Also, the fuzzy controller will be briefly explained. The main components are Arduino Mega microcontroller, Ultrasonic sensor, Traffic LEDs, infrared (IR) sensor, and Fuzzy controller

3.1 Arduino Mega

Arduino Mega was used to provide sufficient digital I/O; using an Arduino UNO with extra extensions was a possible solution, but the Arduino Mega was chosen to simplify the wiring and assembly process in Fig.[3].

The Atmega 2560 microprocessor is the foundation of the open-source Arduino board, a microcontroller board. The processing or wiring language is executed by this board's growing environment. With a user-friendly platform that allows anyone with little to no technical background to start by learning some necessary skills to program and run the Arduino board, these boards have revitalized the automation sector. These boards can be

connected to PC programs like MaxMSP, Processing, and Flash, or they can be utilized to extend distinct interactive items. The ATmega2560 microcontroller is essential for microcontroller boards like the "Arduino Mega." It has 54 digital input/output pins, of which 16 are used as analog inputs and 14 as PWM outputs. There are also four hardware serial ports (UARTs), a 16 MHz crystal oscillator, an ICSP header, a power jack, a USB port, and an RST button. This board primarily contains all of the components required to support the microcontroller. Therefore, this board's power supply can be accomplished by using a USB cable to link it to a PC, a battery, or an AC-DC adapter. A base plate can be used to shield this board from an unexpected electrical discharge.[10]



Fig. 3: Arduino Mega Microcontroller[11]

3.2 Ultrasonic sensor

The HC-SR04 Ultrasonic Sensor is a very reasonably priced proximity/distance sensor that has primarily been utilized in robotics applications for obstacle avoidance in. Additionally, it has been utilized as a parking sensor, a water level sensor, and in turret applications. The popular HC-SR04 Low-Cost Ultrasonic Sensor has been updated with this module.

This new version of the HC-SR04 has a wider input voltage range, allowing it to work with controllers that operate on 3.3V, in contrast to the first-generation model, which could only operate between 4.8V and 5V DC. The HC-SR04 ultrasonic sensor offers a very simple and inexpensive way to measure distance.

Sonar is used to measure distance; the device emits an ultrasonic pulse (about 40 kHz) that is much above human hearing, and the target's distance is calculated by timing how long it takes for the echo to return. This sensor comes in easy-to-use packaging and provides excellent range accuracy and reliable readings. The sensor may be easily prototyped by connecting it to a solderless breadboard using an onboard 2.54 mm pitch pin header.

The Trig pin must be set to a High State for 10 s in order to produce the ultrasonography, resulting in an emitted ultrasonic burst of 8 cycles that will move at the speed of sound. Once that 8-cycle ultrasonic burst is emitted, the Echo pins will immediately go high and begin to listen for, or wait for, the wave to be reflected from something.

If there is no object or reflected pulse, the echo pin times out after 38 milliseconds and returns to the low state. Conversely, if a reflected pulse is received, the echo pin will close earlier than those 38 milliseconds. The duration for which the echo pin remained HIGH, as depicted in Fig.[4], allows for the calculation of the travel distance of the sound wave and, consequently, the distance between the sensor and the object.

To calculate this distance, the following basic distance calculation formula is utilized:

$$\text{Speed} \times \text{Time} = \text{Distance} \quad (1)$$



Fig. 4: ultrasonic sensor [11]

In this project, the function of the ultrasonic sensor is to detect the cars and give us information on the existing cars waiting for traffic.

3.3 Traffic LEDs

An LED (light-emitting diode) traffic light may alter and encode information in its visible light. It can therefore be used to transmit audio messages or other traffic or road-related information. To a large extent, all LED traffic lights can function as communication tools.

This mini traffic light display module shown in Fig.[5] has high brightness and is perfect for making models of traffic light systems.

It is distinguished by its compact size, straightforward wiring, and targeted and personalized installation. A PWM connection can be made to adjust the LED's brightness.



Fig. 5: Mini traffic light

Insert the figures and tables into the text, right after the sentence which first mention these.

3.4 IR sensor

An infrared (IR) sensor operates by emitting and detecting infrared radiation, primarily for obstacle detection. The main components of an IR sensor include an IR transmitter, a receiver, an operational amplifier (Opamp), a variable resistor, and a light-emitting diode (LED). The IR transmitter, which is an IR LED, emits light within the infrared frequency range. IR light is invisible to the human eye as its wavelength (700 nm – 1mm) is much longer than that of visible light, and it typically emits at an angle between 20-60 degrees, covering a distance from a few centimeters up to several feet in Fig.[6].

The receiver portion of the sensor is a photodiode that acts as the IR receiver, detecting the IR light that is reflected back. This photodiode is distinctively coated black on its outer side. Within the sensor, the Opamp functions as a voltage comparator. The variable resistor plays a role in

calibration, allowing adjustment of the distance at which objects are detected by the sensor. [12]

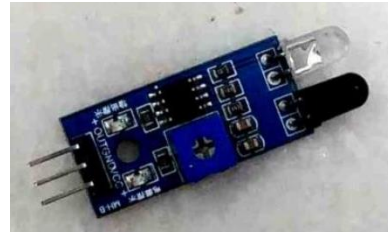


Fig. 6: infrared (IR) sensor [12]

3.5 Power supply

The Mean Well RS-15-5 enclosed power supply 5V / 3A, a 15W single output switching power supply, was used in my project. This power supply features an all-purpose AC input and a full range of safety measures including overload protection, overvoltage protection, and over-temperature protection. It employs free air convection cooling and underwent a 100% full load burn-in test. Features also include an LED indicator as seen in Fig.7 and the use of long-life 105°C capacitors that can withstand a 300-volt surge for five seconds. It has a high operating temperature, reaching 70°C, resists 5G vibration at all times, and offers great reliability, longevity, and efficiency.



Fig. 7: Mean Well RS-15-5 power supply

4 DESIGN CRITERIA AND CONSTRAINTS

After some research was conducted and existing solutions were reviewed, the conclusion was reached that the best approach for a traffic control system is to utilize roadside sensors with fuzzy logic controller. These sensors monitor traffic flow and determine whether it is normal or congested, with traffic light timings adjusted accordingly based on the road conditions. This field is active as a result of various cases, inaccurate sensor measurements, and increasing traffic congestion in expanding and large cities.

4.1 Fuzzy logic controller

Fuzzy Controller is a mathematical controller that deals with dynamic systems. It contains three parts: the input part, the process part, and the output part. Input parts, called fuzzification, read analog signals that transform from sensors such as pressure, sound, temperature, ... etc., or digital signals like ON, OFF switches and convert it to membership function. The process part is the most important part which can be designed by experiment. In this part, the rules of the controller are generated, and they will be translated to the output port of the fuzzy controller. The final part is the output which consists of the defuzzification

that converts the analyzed result into the specific output value [13]. A fuzzy logic system is shown in Fig. 8.

The controller utilizes two fuzzy input variables: the volume of traffic approaching the intersection (Arrival) and the volume of traffic waiting (Queue). When the north and south sides are green, they represent the arrival side, whereas the west and east sides function as the queuing side, and the roles reverse accordingly. The output variable from the fuzzy logic controller is the additional time required for the green light on the arrival side (Extension time) as seen in Fig.12. Therefore, based on the prevailing traffic conditions, fuzzy rules are established, directing whether the controller should extend the current green light duration. If there is no extension, the traffic light state will promptly transition, allowing traffic from the alternate direction to proceed.

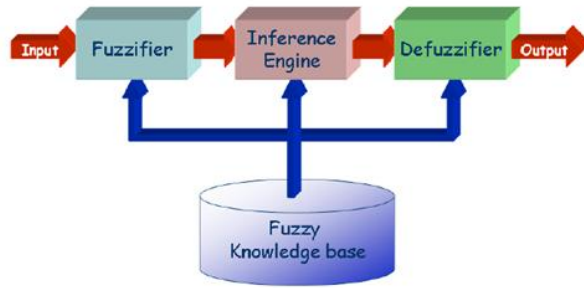


Fig. 8. Overview diagram of a fuzzy system [13]

4.1.1 Input and Output Membership Functions

For controlling the traffic lights, the system employs four membership functions for each input and output fuzzy variable. Table 1 displays the fuzzy variables for Arrival, Queue, and Extension. Abbreviations on the right-hand side are used to succinctly represent these variables.

Table 1: Fuzzy variables of arrival, queue and extension of the traffic light control.

Input				output	
Arrival		Queue		Extension	
Almost	AN	Very Small	VS	Zero	Z
Few	F	Small	S	Short	S
Many	MY	Medium	M	Medium	M
Too Many	TMY	Large	L	Longer	L

Fig.9,10,11 displays the graphical representation of the membership functions for the linguistic variables used. The y-axis measures the membership degree of each fuzzy variable. On the x-axis, the universe of discourse for input fuzzy variables is represented by quantized sensor signals that measure the quantity of cars. For the output fuzzy variable, the universe of discourse denotes the duration to be added in seconds. According to Fig.9,10,11, 10 cars linked for the "Too Many" or "Large" fuzzy subsets in this simulation and receive full membership. For the "Many" or "Medium" fuzzy subsets, full membership consists of 7 cars. Regarding the output fuzzy variable, a full membership in the "Long" category corresponds to approximately 10 seconds, while a "Medium" category correlates with about 7 seconds. The setup of these membership functions is tailored based on expert analysis of the system and its environment. However, the width and center points of the membership functions for these fuzzy

subsets are adjustable and can be customized to match varying traffic conditions. For instance, in cases where a junction is overly congested, the count for cars within the "Too Many" or "Large" fuzzy subset should be increased. Conversely, the width of the membership functions should be narrowed in scenarios with less congestion.

Fuzzy logic control facilitates a seamless transition from one fuzzy subset to another, smoothing out changes between control actions, thereby necessitating overlapping of these subsets. Without some degree of overlap, the control actions may become too binary or step-like in nature. However, excessive overlap can introduce unnecessary fuzziness, obscuring clear distinctions between control actions. A pragmatic approach typically involves overlapping the fuzzy subsets by approximately 25%.

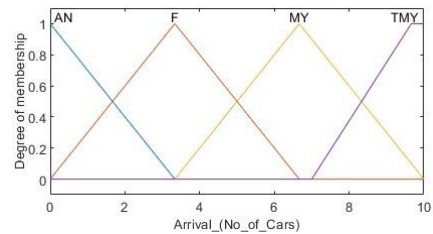


Fig. 9: Graphical representation of membership functions of the Input-1 of fuzzy logic controller.

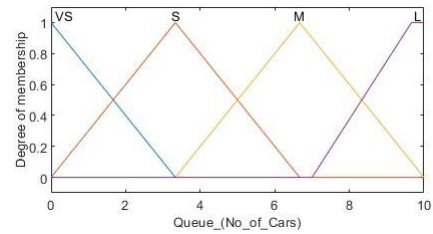


Fig. 10: Graphical representation of membership functions of the Input-2 of fuzzy logic controller.

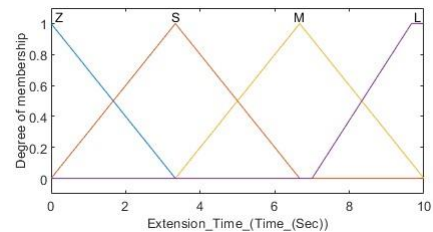


Fig. 11: Graphical representation of membership functions of the Output of fuzzy logic controller.

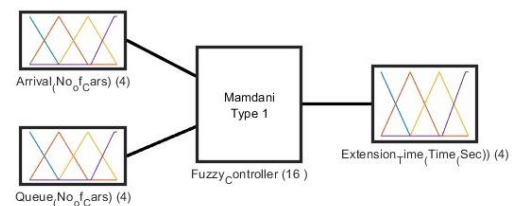


Fig. 12: Design of fuzzy controller

4.1.2 Fuzzy Rule Base

The inference mechanism in the fuzzy logic controller mirrors the human reasoning process, linking fuzzy logic technology with artificial intelligence. Humans naturally

apply rules when executing actions, much like a traffic policeman managing a junction, for instance, from the north and west directions. He would rely on his expert judgment to control the traffic, generally in the following manner:

IF traffic from the north of the city is HEAVY
AND traffic from the west is LESS
THEN allow movement of traffic from the north LONGER
IF traffic from the north of the city is AVERAGE
AND traffic from the west is AVERAGE
THEN allow NORMAL movement of traffic for both sides

The advantage of fuzzy logic lies in its ability to employ approximate reasoning with terms like HEAVY, LESS, AVERAGE, NORMAL, LONGER, and so on. Thanks to the techniques for assigning membership, as previously discussed, these linguistic variables, despite their fuzzy characteristics, can be effectively managed within a computer using fuzzy logic technology.

In the development of the fuzzy logic controller, we use almost similar rules and below are some examples: If there are too many cars (TMY) at the arrival side and very small number of cars (VS) queueing then extend the green light longer (L). If there are almost no cars (AN) at the arrival side and very small number of cars (VS) queueing then do not extend the green light at all (Z).

These rules can be shorten as follows:

- IF Arrival is TMY AND Queue is VS THEN Extension is L
- IF Arrival is F AND Queue is VS THEN Extension is S
- IF Arrival is AN AND Queue is VS THEN Extension is Z

In this context, "Arrival" and "Queue" serve as the antecedents, while the "Extension" of the green light acts as the consequent. Such rules can be formulated based on the traffic conditions at the junction, and a matrix can be used to succinctly display these rules. The matrix's size, or the total number of rules, corresponds to the possible input combinations, which are calculated from the number of membership functions per input. For instance, in the traffic control system, with two inputs each possessing four membership functions, the total number of rules would be sixteen. While it might not be necessary to utilize all rules in the matrix bank for many applications, for this specific application, filling up all the rules is essential.

4.1.3 Inference Engine and Defuzzification

In the fuzzy logic controller, once the relevant rules are activated, the membership degree of the output fuzzy variable, namely the Extension time, is established by encoding the antecedent fuzzy subsets, specifically Arrival and Queue, in this instance. The traffic lights fuzzy control system employs the max-min implication technique [14]. This technique determines the final output membership function for each rule by clipping the true value degrees of the membership functions linked to the antecedents. After the membership degree for each output fuzzy variable is ascertained, all activated rules are aggregated, and the precise, crisp output is derived through the process of defuzzification. There are various methods of

defuzzification, and for this development, the center of gravity defuzzification technique is utilized.

4.2 Flowchart

A flowchart is a diagram that shows how a system, computer algorithm, or process works. They are frequently used in many different fields to examine, organize, enhance, and convey frequently complex processes in simple, understandable diagrams. As shown in Fig.13:

- The system will operate and read data from IR sensors and ultrasonic sensors by Arduino Mega.
- Data for the four directions will be sent to the fuzzy controller in MATLAB using serial data connection.
- Based on fuzzy controller rules, the output of the controller will be sent back to Arduino.
- Arduino Mage will change the timing of the traffic lights according to data which been sent from the fuzzy controller.

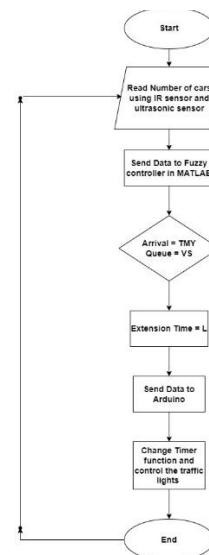


Fig. 13: Flowchart of the system

4.3 Hardware

The concept for this project came from an existing system that consists of sensors for object detection and a microprocessor that system has software installed to enable it to function.

A 50 x 30 cm table divided into two sections is utilized. Drilling could have been done to conceal the wires beneath the table, but it was decided against. Instead, the wires were placed along the table's edges, as shown in Fig. 14.



Fig. 14: wiring connection

Five volts and ground are connected to the Arduino Mega to establish the system's power supply. This power supply facilitates easy access to power wherever electricity is available and simplifies the wire connections. To ensure short wiring, two whiteboards were placed beside the Arduino Mega.



Fig. 15: 3D model of the system

Each ultrasonic sensor and IR sensor is placed beside its corresponding traffic LEDs on a small whiteboard, allowing for the observation of object detection and the corresponding changes in the lights, as illustrated in Fig. 15 and in Fig.16.

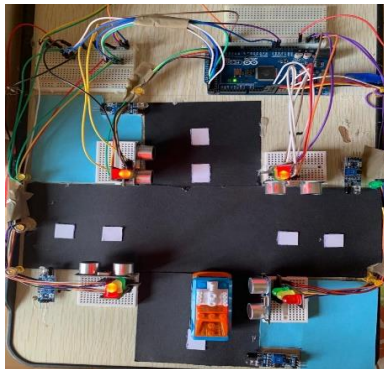


Fig. 16: Constructed system in prototype

5 DISCUSSION AND RESULTS

The working of the project is described in two tests:

5.1 Test 1: Fixed-Time Model

It is a description of the current normal state of the roads that expresses the constant duration of the signal for the regular opening of each traffic light in order with a pre-established time limit 20 second for the opening of each signal.

5.2 Test 2: Smart-Time-Fuzzy-Logic Model

This system chosen will route depend on the highest number of vehicles in any route, as seen in Fig.17. The route has highest number of vehicles their route will be open first and so on. If there are two routes have the same number of cars the light open for the route that have less than time. The same route can't be open twice in the same turn even if it has the highest number of vehicles. If there is no vehicle in all routes the light is become red. Counter time is flexibility change depend on the volume of traffic approaching the intersection (Arrival) and the volume of traffic waiting (Queue).

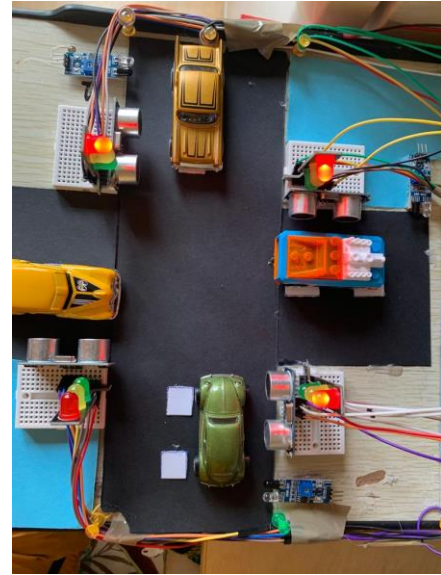


Fig. 17: Smart-Time-Fuzzy-Logic Model

6 CONCLUSION AND FUTURE WORK

Classical traffic signal systems rely heavily on a traffic police officer to regulate and control traffic in accordance with traffic density. There have been numerous studies done to estimate or calculate traffic density and then use a sensor to adjust traffic signals depending on that information. In addition, some traffic management systems use image processing to estimate traffic density.

The fuzzy logic traffic lights controller outperforms both the fixed-time controller and vehicle-actuated controllers due to its greater flexibility. This flexibility pertains to the number of vehicles detected at the approach to the junction and the subsequent extension of green time. In the case of a fixed-time controller, an open-loop system, the green time does not extend regardless of the density of cars at the junction. Vehicle-actuated traffic light controllers, which are advanced versions of fixed-time controllers, do allow for the extension of green time whenever a vehicle is detected; however, these extensions are preset to certain limits, like an additional 5 or 10 seconds, up to a maximum time.

In contrast, the fuzzy logic controller does not use fixed extension times. Instead, it operates with fuzzy variables for extension times, such as long, medium, or short. Furthermore, the number of cars detected by the controllers are also translated into fuzzy values like very small, small, medium, or too many. Additionally, the fuzzy controller benefits from using linguistic rules that mimic human decision-making, akin to how a traffic policeman would manage the flow at a typical junction. The reasoning method in the fuzzy controller similarly reflects the intuitive tactics employed by humans in controlling traffic.

Future work for the fuzzy logic-based traffic control system could explore integrating machine learning for predictive traffic optimization and adapting fuzzy rules dynamically. Real-time data from GPS, social media, and crowdsourced apps could enhance decision-making, while Vehicle-to-Infrastructure (V2I) communication could further optimize signal timings. Testing the system in

diverse, real-world environments and integrating public transport data would improve robustness. Additionally, future studies could focus on scalability for smart cities, energy efficiency, and reducing environmental impact, making the system more adaptable and efficient in managing urban traffic.

REFERENCES

- [1] A. P. R. L. Richard Arnott, „Transportation Research,” pp. 309-318, September 1991.
- [2] S. M. Shinde, „Adaptive traffic light control system,” in International Conference on Intelligent Systems and Information Management (ICISIM), Aurangabad, India, 2017.
- [3] U. d. o. transportation, „Traffic Congestion and Reliability: Linking Solutions to Problems,” Federal highway administration , United States, 2017.
- [4] M. PengjunZhenga, „An investigation on the manual traffic count accuracy,” in International conference on traffic and transportation studies, 2012.
- [5] U. D. o. transportation, „A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies use in Intelligent Transportation Systems,”
<https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/pubs/vdstits2007/05pt2.cfm>.
- [6] J. A.-O. R. Weil, „mathmetical and comuputer modeling,” Traffic incident detection: Sensors and algorithms, pp. 257-291, may-june 1998.
- [7] N. P. e. a. K. Thatsanavipas, „Wireless Traffic Light Controller,” in International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference,, Nakhonphanom, Thailand., 2010.
- [8] S. V. M. Ashok. P.V, „International Journal of Applied Engineering Research,” %1. kötet12, 2017.
- [9] Hamara Chaudhuri, Nishanth P Raikar, „Traffic Control Management with help of State of Control Algorithm using Ultrasonic Sensors & GSM Technology,” International Research Journal of Engineering and Technology, %1. kötet05, %1. szám04, 2018.
- [10] *The Arduino Mega 2560*. (2024, March 11).
<https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/>.
- [11] Ultrasonic Sensor HC-SR04 and Arduino – Complete Guide. (2017, April 11).
<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/ultrasonic-sensor-hc-sr04/>.
- [12] Mullapudi, Chaitanya. (2020). Implementation of Arduino-Based Counter System. International Journal of Engineering and Technical Research. 9. 10.17577/IJERTV9IS090456.
- [13] Nour, Morsy & Said, Sayed M. & Ramadan, Hassanien & Ali, Abdelfatah & Farkas, Csaba. (2018). Control of Electric Vehicles Charging Without Communication Infrastructure. 10.1109/MEPCON.2018.8635277.
- [14] Kiang, Kok & Khalid, Marzuki & Yusof, Rubiyah. (1997). Intelligent Traffic Lights Control By Fuzzy Logic. Malaysian Journal of Computer Science. 9. 29-35.

Improving Switching Efficiency with a Step-Up/Step-Down Hybrid Buck–boost Converter Using Fuzzy Logic Control

Kapcsolási hatékonyság javítása step-up/step-down hibrid buck–boost átalakítóval fuzzy logikai vezérlés alkalmazásával

Amgad Naji Ali Ahmed*, Edit Laufer**, Judit Lukács**, György Györök***

* Óbuda University, Bánki Donát Faculty of Doctoral School on Safety and Security Sciences, Budapest, Hungary

** Óbuda University, Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering, Budapest, Hungary

*** Óbuda University Alba Regia Faculty of Székesfehérvár, Budai út 45 Hungary

ahmed.amgad@uni-obuda.hu, laufer.edit@bgtk.uni-obuda.hu, gyorok.gyorgy@amk.uni-obuda.hu

Abstract — This paper presents a novel hybrid buck–boost DC–DC converter controlled using fuzzy logic to enhance switching efficiency in photovoltaic (PV) energy systems. The proposed topology integrates separate step-up and step-down converter blocks connected via a DC link capacitor, enabling flexible voltage regulation across a wide input range. A fuzzy logic controller dynamically adjusts the duty cycles based on real-time PV input voltage and current, ensuring optimal power conversion under varying environmental conditions. It is hypothesized that combining fuzzy logic control with dedicated converter structures significantly reduces output ripple, improves voltage stability, and increases overall efficiency compared to conventional buck–boost designs. Simulation results validate the proposed system's performance, showing superior dynamic response, reduced oscillations, and enhanced efficiency. The step-down converter demonstrates an average improvement of 4.24% and the step-up converter, 2.63% in charging efficiency over the conventional design. The architecture is particularly suitable for renewable energy applications such as electric vehicle (EV) battery charging, where stable and efficient power regulation is critical.

Keywords: buck–boost converter, fuzzy logic control (FLC), PV system, efficiency, MPPT, MATLAB.

Összefoglalás — Ez a tanulmány egy újszerű hibrid buck–boost DC–DC konvertert mutat be, amelyet fuzzy logika vezérel, hogy növelje az átalakítási hatékonyságot fotovoltaiikus (PV) energiarendszerekben. A javasolt topológia különálló step-up és step-down (feszültségnövelő- és csökkentő) konverter blokkokat integrál, amelyek DC-link kondenzátoron keresztül csatlakoznak, lehetővé téve a rugalmas feszültség szabályozást széles bemeneti tartományban. Egy fuzzy logikai vezérlő dinamikusan állítja be a kitöltési tényezőt a valós idejű PV-bemeneti feszültség és -áram alapján, biztosítva az optimális teljesítményátalakítást változó környezeti feltételek mellett. Feltételezzük, hogy a fuzzy logikai vezérlés és a dedikált konverterstruktúrák kombinációja jelentősen csökkenti a kimeneti feszültség ingadozást, javítja a stabilitást és növeli az összhatékonyságot a hagyományos buck–boost kialakításokhoz képest. A szimulációs eredmények igazolják

a javasolt rendszer teljesítményét, kiváló dinamikus választ, csökkent oscillációt és fokozott hatékonyságot mutatva. A step-down konverter átlagosan 4,24%-os, a step-up konverter pedig 2,63%-os javulást mutat a töltési hatékonyságban a hagyományos kialakításhoz viszonyítva. Az architektúra különösen alkalmas megújulóenergia-alkalmazásokhoz, például az elektromos járművek (EV) akkumulátorainak töltéséhez, ahol a stabil és hatékony teljesítményszabályozás különösen fontos.

Kulcsszavak: buck–boost konverter, fuzzy logikai vezérlés (FLC), napelemes rendszer, hatásfok, MPPT, MATLAB

1 INTRODUCTION

A hybrid buck–boost DC–DC converter is designed to convert a variable input voltage into a constant or variable output voltage. The term "hybrid" refers to the integration of both buck and boost functionalities within a single circuit, enabling it to either step up or step down the voltage as needed. This means that if a consistent output voltage is required, the converter can adjust to changes in the input voltage. The hybrid buck–boost DC to DC converter is widely used in electrical power supplies for electronic devices, battery charging systems, and renewable energy systems such as solar and wind power systems.

Its high efficiency, low noise, and ability to handle a variety of input voltages make it preferred over other converter types [1]. The hybrid buck–boost converter's circuitry consists of an output filter, a switching circuit, and an input PV solar array. The switching circuit receives the pulsed DC voltage produced by the solar array. Two power switches (transistors or MOSFETs) are used in the switching circuit, and they alternately operate to control the voltage level. The output filter receives the input voltage when the switches are on; and when the switches are off, the energy stored in the filter's inductor and capacitor is used to maintain the output voltage [2]. The output filter is used to remove high-frequency noise or ripple from the signal and to smooth the output voltage. Typically, it consists of a capacitor and an inductor connected in series with the load.

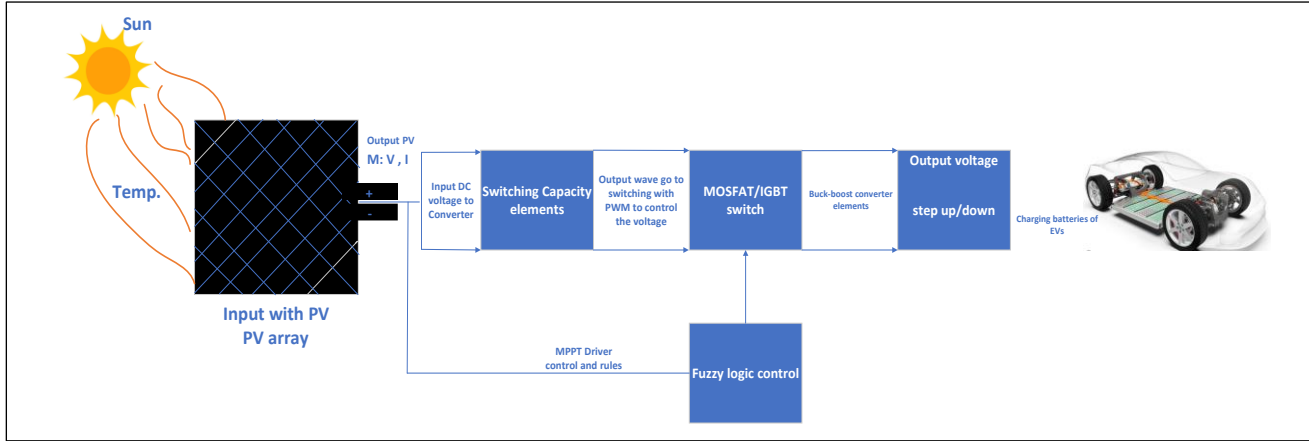


Figure 1: Schematic diagram of the system operation

In conclusion, the hybrid buck–boost converter is a flexible and effective power converter that is frequently utilized in a variety of applications like EV battery charging. It can handle a wide range of input voltages and integrates the capabilities of both buck and boost converters into a single circuit [3]. One of the main advantages of the hybrid buck–boost converter is its ability to provide a regulated output voltage even when the input voltage varies widely or remains constant. This is due to the converter's dual ability to step up and step down the input voltage, which enables it to keep the output voltage steady even while the input voltage fluctuates [4].

The hybrid buck–boost converter has relatively high efficiency when compared to other converter types. This is because it transfers energy directly from the input to the output, doing away with the need for a transformer, which can result in losses. The switching circuit of the converter is also highly efficient and reduces losses [5]. Additional advantages of the hybrid buck–boost converter include its small size and low weight. This is because of its high-power density, which allows it to deliver significant power in a very small container. Because of this, it is ideal for usage in systems with limited weight and space, such as portable electronic devices or automotive systems [6].

The fundamental DC–DC converters, including the buck (whose duty cycle determines the ideal input-to-output voltage ratio), boost, buck–boost, Cuk, Sepic, and Zeta converters, cannot significantly step-down or step-up the input voltage, which is required for many contemporary applications. This study introduces a fuzzy logic-controlled hybrid buck–boost converter with separate step-up and step-down blocks to improve switching efficiency and voltage regulation under varying PV conditions.

2 STEP-UP AND STEP-DOWN BUCK–BOOST CONVERTER DESIGN FOR OPTIMIZED SWITCHING CAPACITY

In this paper, a new method for easily switching dual structures—which consist of two capacitors and two to three diodes, or two to three inductors and two to three-

diodes—is presented. As shown in [7], these circuit topologies have the ability to either step up or step down the input voltage. With only a few disadvantages, they can be incorporated into a conventional buck–boost converter to attain a high voltage conversion ratio while preserving all the advantages of a topological converter.

A PV solar array with a fuzzy logic controller (FLC) and a switching-capacity block for the step-up and step-down circuit will help to reduce the ripple and output overshoot caused by the output of the conventional buck–boost converter, whose ripple increases power loss in the main circuit that affects the load [8]. As evidenced by its voltage gain, this converter architecture permits a larger step-down, and step-up, depending on the input voltage, than the conventional buck–boost topology.

This topology introduces a single switching capacitor block for use in both step-up and step-down modes in separate circuits. By utilizing an input PV-solar array with an FLC strategy, the design reduces both cost and weight. Additionally, the proposed topology is expected to offer higher efficiency by eliminating hysteresis and potential energy losses associated with transformer magnetization.

2.1 Switching capacity of step-down buck boost operation

Fig. 2 shows a buck–boost converter diagram that includes a square-block capacitance, designed to enhance the performance output of the converter. This configuration can be connected to batteries or other types of loads, allowing control of the load to operate at high efficiency of step-down converter.

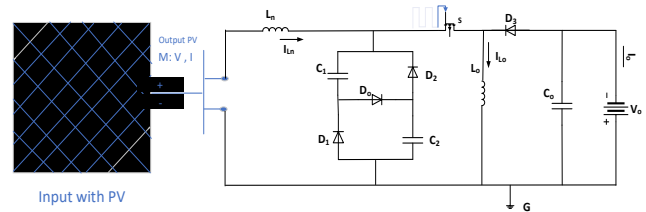


Figure 2: Step-down buck boost converter with square block switching

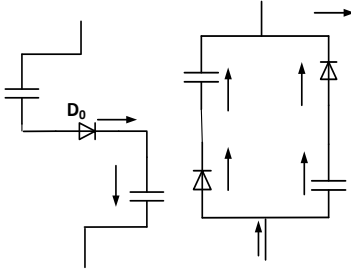


Figure 3: Switching on and off operation of the square block

According to the Fig. 3, the parallel and series operation of the square-block buck boost converter, can be described as follows:

1. When switch S is off, the converter operates as two separate circuits. The input circuit, which includes a rectifier, converts the PV input to a DC output and charges the capacitors through the square-block configuration and the current will be pass through the L_n and, in series, through the square block to charge the capacitors C_1 and C_2 . The second circuit, connected to the output, uses inductors to supply current in the reverse direction to charge the output load, such as a battery.
2. When the switch S is operating the square block causes the two-capacitor discharge in parallel and with the support of the L_n which used to charge the output inductors L_o . These inductors use as the supplier to the output to charge the load or control the load with the helping of output capacitor C_o .

By using the voltage second balance method on the inductors, based on the average voltage across the inductors over a full switching cycle, which must be equal to zero in steady state operation [9].

1. Voltage across input inductors

When S is on, the voltage across L_n is

$$V_{Ln-on} = V_S - V_c.$$

When S is off, the voltage across the L_n is

$$V_{Ln-off} = V_S - 2V_c.$$

According to the equations for the voltage across input inductors at the on and off state equations the balance input voltage will be,

$$(V_S - V_c)t_{on} + (V_S - 2V_c)t_{off} = 0.$$

Then, for the times, $t_{off} = t - t_{on} = t(1 - d)$, and $d = t_{on}/t$.

Hence the balance equation of the inductor voltage reads

$$(V_S - V_c)d t + (V_S - 2V_c)(1 - d)t = 0,$$

$$(V_S - V_c)d + (V_S - 2V_c)(1 - d) = 0,$$

$$V_S d - V_c d + V_S - V_S d - 2V_c + 2V_c d = 0,$$

$$V_S - V_c d - 2V_c + 2V_c d = 0.$$

Therefore the input voltage will be:

$$V_S = V_c(d + 2 - 2d),$$

and the voltage across the capacitor is

$$V_c = \frac{V_S}{2 - d}.$$

2. The Voltage balance across the output inductors

When S is on, the voltage across L_o is

$$V_{Lo-on} = V_c,$$

and when S is off, the voltage across the L_o is

$$V_{Lo-off} = V_o,$$

therefore the balance equations for the output inductor should be equal to zero:

$$V_c t_{on} + V_o t_{off} = 0.$$

In this case, for the times equation:

$$V_c d + V_o (1 - d) = 0.$$

Hence the balance equation for the output inductor is

$$V_o = \frac{-V_c d}{(1 - d)}.$$

According to the capacitor voltage of the input balance equation, the output voltage of the whole circuit can be calculated as

$$V_o = \frac{-V_S d}{(2 - d)(1 - d)}.$$

Therefore, as comparing to the conventional diagram of the converter without step-down block and filters inductance is $(2 - d)$, which increases the performance of the converter.

The efficiency of the switching step down buck boost converter is given by the following equations,

$$p_i = V_S i_s,$$

and

$$p_o = V_o i_o = \frac{V_S d}{(2 - d)(1 - d)} i_o.$$

The related input and output current for the balanced voltages are

$$i_s d = i_o(1 - d),$$

$$i_o = \frac{i_s d}{(1 - d)}.$$

Hence the output power of the converter will be:

$$p_o = V_o i_o = \frac{V_S d}{(2 - d)(1 - d)} i_o = V_S i_s \frac{d^2}{(2 - d)(1 - d)^2}.$$

Then the efficiency of the step-up block hybrid buck boost converter reads

$$\mu = \frac{p_o}{p_i} = \frac{d^2}{(2 - d)(1 - d)^2}.$$

Since the equation of $(2 - d)$ is consistently greater than one, the efficiency of the proposed converter surpasses that of the conventional buck-boost converter for all duty cycle values.

2.2 Switching capacity of step-down buck boost operation

According to Fig. 4, the performance of the converter increases due to the step-up block which is connected at the output stage of the converter, that has the capacitance due to the small resistance through the capacitance, the losses are reduced [10]. To increase the output voltage

with lower losses, the step-up converter is better than the step-down converter, in order to make the batteries charging more slowly for protection.

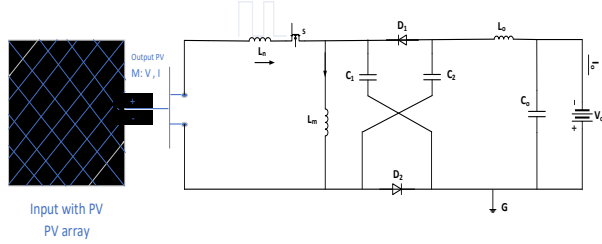


Figure 4: Step-up buck boost converter with square block switching

During operation, the X-block-based buck-boost converter functions in two distinct modes depending on the switching state:

1. When switch S is off, the inductor L_m supplies energy to the load circuit. At this time, the two diodes are forward-biased, allowing both capacitors to charge in parallel from the PV source which makes the two capacitors C_1 and C_2 connected in parallel, those capacitors will charging energy that coming from L_m and L_o to make the operation in balance through the operator work.
2. When switch S is on, the diodes become reverse-biased, and the capacitors C_1 and C_2 are connected in series. They discharge together to supply a higher voltage to the output.

The two capacitances connected in the X-block gives the converter high gain, enabling control of the output voltage, making it higher than the input power supply, which is useful when the solar energy is used as the input to charging the batteries. To derive the equations for the converter using the voltage-second balance method a systematic approach is used, that is similar to the one we used for basic converters but adapted to the hybrid converter topology. For the input stage which include the L_n is intended to improve performance, such as reducing ripple in the output voltage and current. These components will improve the dynamic performance by smoothing out voltage and current transients, in steady-state operation, the output voltage of the step-up converter is as follows.

According to the second stage of the converter which contains the inductor L_m , the voltage balance across this inductor when the switch is operating with input voltage with duty cycle d also under the switching is open, the output corresponds to the time duration $(1-d)$, the equation of the voltage balance for the inductors should equal to zero.

For S in operation L_m and L_o :

$$V_{lm\ on} = V_s, V_{lo\ on} = V_o.$$

For S not in operation L_m and L_o :

$$V_{lm\ off} = V_o - V_s,$$

$$V_{lo\ off} = V_o.$$

Hence the balance voltage across the L_m ,

$$V_s d + (1-d)(V_o - V_s) = 0,$$

$$V_o = \frac{-2d V_s}{(1-d)}.$$

For L_o the dynamic behavior is the same as for L_m which additionally contributes energy to the output.

The output voltage of the step-up hybrid buck-boost converter has double the gain compared to the conventional one, thus increasing the performance of the converter for step-up operation.

The efficiency of this converter is given by:

$$p_o = V_o i_o,$$

$$p_s = V_s i_s,$$

$$\mu = \frac{p_o}{p_i} = \frac{V_o i_o}{V_s i_s} = \frac{V_o}{V_s} \frac{(1-d)}{2d}.$$

Compared to conventional and step-down converters, the efficiency is improved when the duty cycle is higher than 0.5.

3 VOLTAGE GAIN COMPARISON

The converters that are used for applications focus on the gain of the components inside the converter which have the responsible for improving the operation of the converter. Regarding the output voltage of the three converters which are the conventional, hybrid step-down and step-up converters. The hybrid converters are designed to improve the performance of the converter achieve high output performance, decreasing ripple, and the total losses that can affect the load. Then the step-down used to control the output voltage to be less than the input voltage, the step-up converter used to control the output voltage to be greater than the input voltage, the conventional converter can perform both, but with higher losses and ripple.

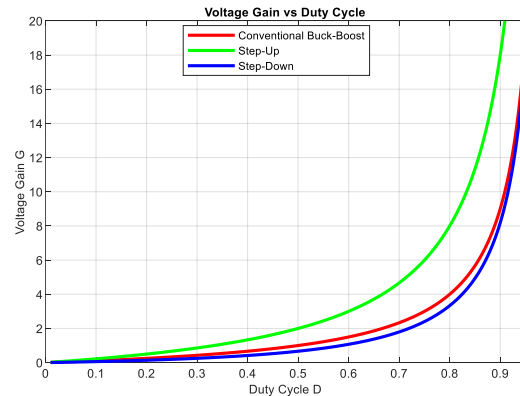


Figure 5: Voltage gain with duty cycle

With regard to the voltage gain shown in Fig. 5, the conventional buck-boost converter is appropriate for applications needing a wide voltage range because it can both step up and step down with a high voltage gain, although it often has larger ripple and poorer efficiency. Applications requiring a large voltage rise benefit greatly from the step-up converter, which performs best at high duty cycles ($d \geq 0.5$) and offers higher gain and efficiency at the expense of increased ripple. Because it offers smaller ripple and higher efficiency, the step-down (buck) converter is perfect for situations where voltage reduction is required, especially when duty cycles $d \leq 0.5$. Filters are applied in order to reduce ripple and losses for both step-up and step-down. However, at high duty cycles, the step-down will have more ripple and

overshoot, whereas at lower duty cycles, the step-up will have more ripple.

Based on the design and voltage gain analysis, the square-block buck–boost converter achieves lower voltage gain compared to the X-block configuration. It is suitable for low voltage output control, whereas the X-block design offers higher voltage gain, making it ideal for applications requiring high output voltage such as fast battery charging. For high performance and lower losses, the square-block and X-block buck boost converters are used to control the load, such as for battery chargers when the supplier is solar array used for EV low voltage applications.

Table 1: Key points of the three converters

Converters	Square-block converters	X-block converters	Conventional converters
Voltage gain	$V_o = \frac{-V_s d}{(2-d)(1-d)}$	$V_o = \frac{-2d V_s}{(1-d)}$	$V_o = \frac{-d V_s}{(1-d)}$
Efficiency	$\mu = \frac{p_o}{p_i} = \frac{d^2}{(2-d)(1-d)^2}$	$\mu = \frac{p_o}{p_i} = \frac{V_o I_o}{V_s I_s} = \frac{V_o (1-d)}{V_s} \frac{1}{2d}$	$\mu = \frac{p_o}{p_i} = \frac{V_o I_o}{V_s I_s} = \frac{V_o (1-d)}{V_s} \frac{1}{d}$

4 FUZZY LOGIC CONTROL STRATEGIES FOR THE OUTPUT VOLTAGE

DC–DC power converters in photovoltaic (PV) systems are well-suited for fuzzy logic control, a computational intelligence technique that simulates human reasoning to make control decisions. Unlike traditional PID controllers, which need an exact mathematical model, FLC is a rule-based control strategy that can handle nonlinear and complex systems [11].

Output voltage control is essential in PV-powered applications because solar energy is intermittent. The performance of traditional controllers deteriorates due to their inability to handle temperature and irradiance changes. FLC offers a reliable substitute by dynamically modifying control parameters according to input conditions, ensuring steady voltage output under variable solar conditions [12][13].

To increase the safety of the converters that using to charging of EVs fuzzy logic is a numerical control strategy capable of regulating the output signal with high performance and lower losses thereby enabling safe operation compared to other types of control. In photovoltaic (PV) systems, maximum power point tracking (MPPT) is crucial for maximizing energy output. Artificial Intelligence (AI) techniques can greatly improve the efficiency and effectiveness of MPPT algorithms [13]. FLC is a type of AI-based control used to track voltage in PV systems operating with MPPT algorithm.

4.1 The system operation with fuzzy logic control

This system regulates the output voltage of a PV system using FLC, dynamically controlling both a step-up and a step-down buck–boost converter. Since the PV voltage fluctuates due to changing sunlight and temperature conditions, the system employs a MPPT algorithm to

extract the maximum available power while maintaining a stable output voltage [14][15].

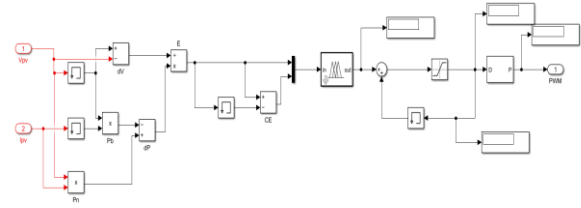


Figure 6: FLC system

The FLC-based MPPT system is designed to enhance the efficiency of PV energy harvesting by continuously monitoring the PV voltage (V_{pv}) and current (I_{pv}) to determine the optimum operating point. The controller calculates the power output and evaluates both the error (E) and the change in error (ΔE), which are then used as inputs to the fuzzy inference system. Implemented using the Mamdani-type fuzzy logic approach, the controller applies a set of intuitive rule-based decisions to generate a PWM (Pulse Width Modulation) signal. This PWM output adjusts the duty cycle of the DC–DC converter, thereby regulating the PV operating voltage. Depending on the input voltage level, a switching control unit activates either the step-up or step-down buck–boost converter to maintain operation at the maximum power point (MPPT). The fuzzification, rule application, and defuzzification processes allow the system to respond dynamically to changing environmental conditions, and the control rules used to achieve MPPT are summarized in Table 2, with the FLC interface illustrated in Fig. 7.

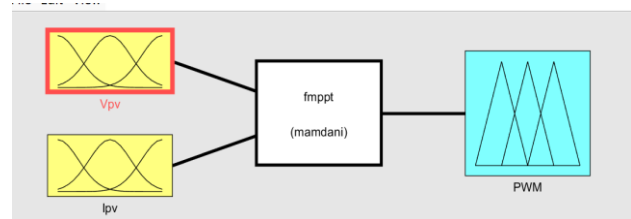


Figure 7: FLC interface

Table 2: Fuzzy control rules for PWM output

$\Delta E/E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PS	NS	NS	Zero
NS	PS	PS	NB	NS	NS
ZE	NS	NS	PB	Zero	PB
PS	NS	PB	PS	NB	PB
PB	NB	NB	Zero	Zero	Zero

The inputs to the FLC are the PV voltage and current, each characterized by five linguistic terms: negative big (NB), negative small (NS), zero (ZE), positive small (PS), and positive big (PB). These linguistic terms are represented using triangular membership functions, chosen for their simplicity and computational efficiency. The output, which is the PWM signal used to control the converter, is also described using the same five linguistic terms and triangular membership functions. Fig. 8 illustrates the PWM output surface generated from fuzzy rules. As shown, when both V_{pv} and I_{pv} are low (NB), the PWM output peaks positively, correcting the converter

toward maximum power. The surface confirms the smooth, nonlinear mapping of fuzzy rules across variable PV conditions.

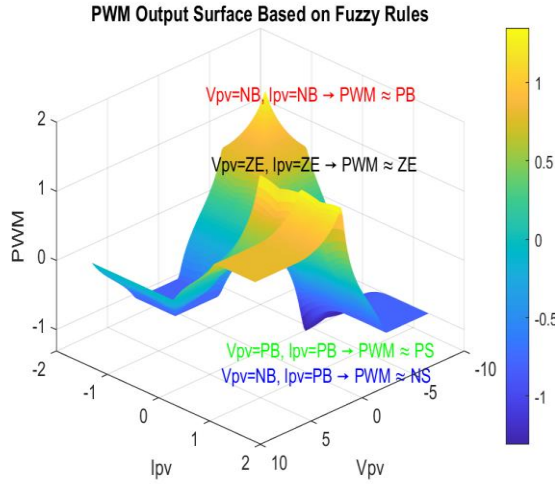


Figure 8: 3D surface plot showing FLC for PWM output as a function of V_{pv} and I_{pv} based on fuzzy rules

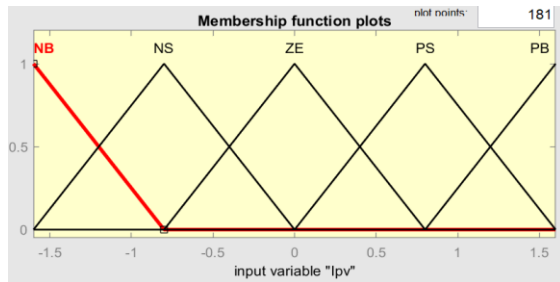


Figure 9: Membership functions of the PV current (I_{pv})

As shown in Fig. 9 the horizontal axis represents the range of I_{pv} values from -1.5 to +1.5, while the vertical axis shows the degree of membership from 0 to 1. Each triangle represents a fuzzy set: NB, NS, ZE, PS, and PB. These functions are symmetrically arranged, allowing smooth transitions between fuzzy states. Similarly to the current input, V_{pv} is described over a range of -8 to +8, and divided into five fuzzy sets with corresponding triangular shapes. These fuzzy sets enable the system to capture the behavior of the voltage under varying conditions effectively. The output fuzzy sets (NB to PB) correspond to the control signal that adjusts the duty cycle of the converter to maintain optimal operation of the PV system. This approach ensures fine-grained control and robust response to input variations as shown in Fig. 10.

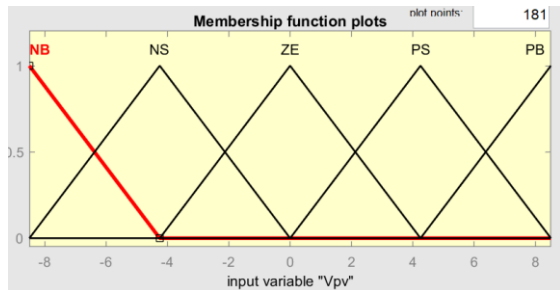


Figure 10: Membership functions for the PV voltage (V_{pv})

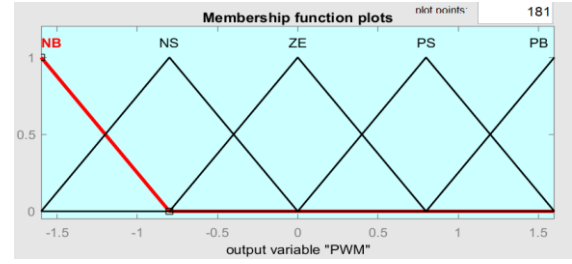


Figure 11: The membership functions of the PWM output

The fuzzy rule base includes 25 control rules that determine the PWM output based on various combinations of PV voltage and current. These rules are derived from expert knowledge and are designed to respond effectively to dynamic solar conditions by adjusting the converter's duty cycle. For instance, when both V_{pv} and I_{pv} are in the NB region (low voltage and low current), the output PWM is also NB, implying a strong correction to increase power extraction. Conversely, if both inputs are PB, indicating high voltage and current, the controller maintains the output in the PB region to sustain efficient operation. Below a brief description of some of the fuzzy rules is given:

- If V_{pv} is NB and I_{pv} is NB, then PWM is PB.
- If V_{pv} is NB and I_{pv} is NS, then PWM is PS.
- If V_{pv} is NB and I_{pv} is ZE, then PWM is NS.

This pattern continues for all 25 combinations, creating a control surface that handles varying operating conditions. The fuzzy operators used include the minimum (MIN) method for the AND operation and implication, the maximum (MAX) method for aggregation, and the centroid method for defuzzification, which calculates the center of gravity of the aggregated output membership functions to produce the final PWM signal.

5 CASE STUDY : SIMULATION OF BUCK-BOOST CONVERTER WITH FLC

A simulation of a PV system with a buck-boost converter controlled by an FLC was performed in MATLAB/Simulink. The FLC successfully tracked the maximum power point under varying irradiance levels by adjusting the PWM signal based on the error and change in power error. The system responded quickly to changes in sunlight and stabilized the output voltage and power with minimal oscillation. Compared to conventional methods, the FLC showed improved efficiency and dynamic performance.

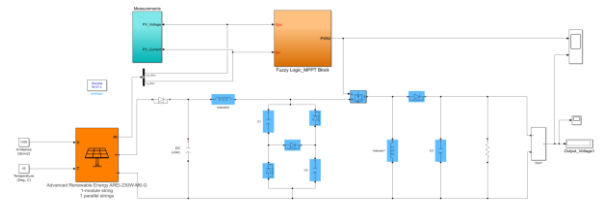


Figure 12: Step-down buck-boost model with FLC

If the PV voltage is higher than required, the step-down buck-boost converter reduces it by adjusting the switching duty cycle to regulate the output, as shown in the output of Fig. 13 the input voltage will be in between 30 and 40 V

but the output voltage will be with a smooth 10 V output, which is used to slowly charge EV batteries due to the lower output voltage.

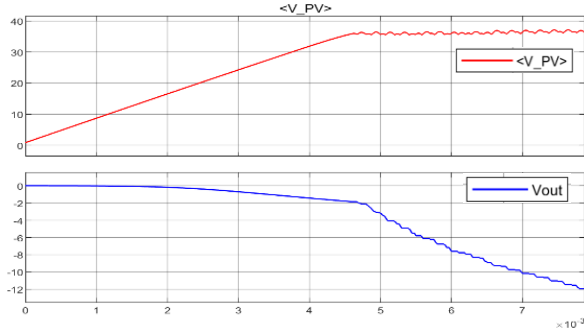


Figure 13: Output voltage of step-down buck-boost with FLC

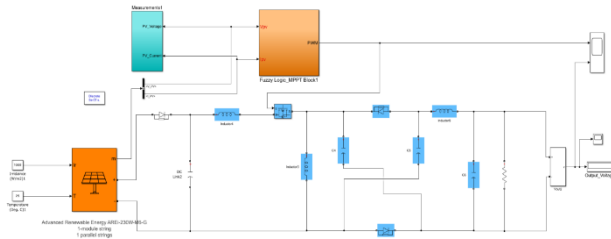


Figure 14: Step-up buck-boost model with FLC

When the PV voltage is lower than the desired output, the step-up buck-boost converter increases the voltage by controlling the energy stored and released by the inductor. As shown in Fig. 15, this results in an output voltage that exceeds the input, with low ripple and improved efficiency – ideal for fast EV battery charging.

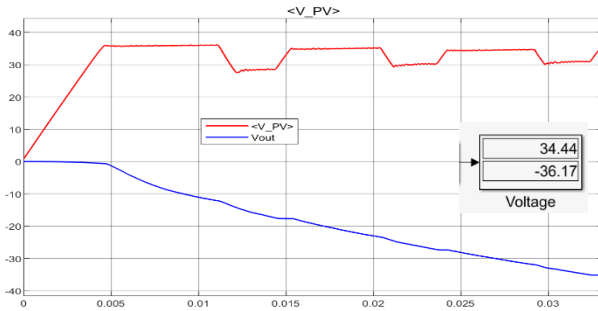


Figure 15: Output voltage of step-up buck-boost with FLC

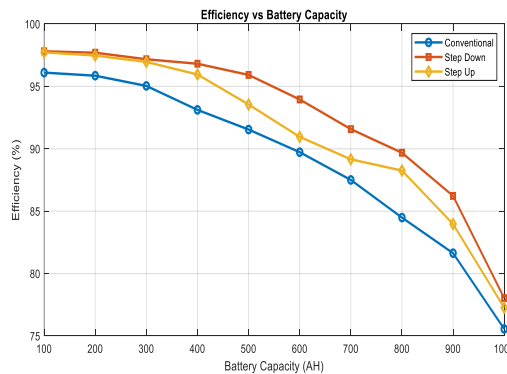


Figure 16: Efficiency comparison of converters

Fig. 16 illustrates the efficiency comparison among three converter configurations: a conventional buck-boost converter, a fuzzy logic-controlled step-down hybrid converter, and a fuzzy logic-controlled step-up hybrid converter. The graph plots battery capacity (in ampere-hours, Ah) against charging efficiency (in percent). Across all tested capacities (100–1000 Ah), both fuzzy logic-controlled converters consistently outperform the conventional topology. The step-down FLC converter achieves the highest efficiency values, with an average gain of 4.24%, while the step-up FLC converter shows an average improvement of 2.63% over the conventional approach. This demonstrates the effectiveness of fuzzy logic control in reducing ripple, enhancing voltage regulation, and optimizing power flow during the charging process. The performance advantage becomes more noticeable at lower battery capacities, which are more sensitive to switching and control losses, further supporting the suitability of the proposed converter for variable renewable energy systems such as solar-powered EV charging.

By continuously selecting the appropriate mode, this system ensures maximum power extraction, efficient voltage regulation, and adaptability to environmental changes. Compared to traditional MPPT methods, fuzzy logic improves response time and reduces oscillations, making this approach highly effective for renewable energy applications. Compared to conventional buck-boost converters, the proposed hybrid design integrates separate step-up and step-down stages, improving both voltage regulation and efficiency. Traditional methods struggle with ripple and slow dynamic response, especially under variable irradiance. Additionally, the use of distinct X-block and square-block topologies allows tailored optimization for high and low voltage scenarios, which is not observed in previous approaches.

6 CONCLUSION

This paper investigates hybrid buck-boost DC-DC converter topologies using fuzzy logic control (FLC) for efficient photovoltaic (PV) system operation. The hybrid converter, combining step-up and step-down configurations, enhances efficiency, reduces size, and improves reliability by adjusting the duty cycle based on input voltage fluctuations. The FLC-based MPPT algorithm dynamically tracks the maximum power point, optimizing power extraction from the PV system while maintaining a stable output voltage. The step-down buck-boost converter operates effectively when the PV voltage is higher than the required output, regulating the voltage to a smooth 10 V output, ideal for electric vehicle (EV) battery charging applications. On the other hand, the step-up buck-boost converter is employed when the PV voltage is lower than the desired output, boosting the voltage to achieve higher output (up to 40 V), with low ripple, improving charging speed and efficiency. Compared to traditional methods, the fuzzy logic controller enhances response time, minimizes voltage oscillations, and adapts more effectively to changing environmental conditions. This makes the system highly suitable for renewable energy applications such as electric vehicle (EV) charging.

REFERENCES

- [1] Sahu, B., & Rincón-Mora, G. A. (2004). A low voltage, dynamic, noninverting, synchronous buck-boost converter for portable applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(2), 443–452.
- [2] Andrade, P., Ferreira, J. A., Santos, J., Silva, M. R., & Correia, P. (2022). Buck-boost DC-DC converters for fuel cell applications in DC microgrids—State-of-the-art. *Electronics*, 11(23), 3941.
- [3] Rahimi, T., Abarghoee, A. H., & Adabi, J. (2021). Design and implementation of a high step-up DC-DC converter based on the conventional boost and buck-boost converters with high value of the efficiency suitable for renewable application. *Sustainability*, 13(19), 10699.
- [4] Abdel-Rahim, O., Elshaer, A., Salama, M. M. A., & Elbouchikhi, E. (2022). An efficient non-inverting buck-boost converter with improved step up/down ability. *Energies*, 15(13), 4550.
- [5] Seo, G.-S., & Le, H.-P. (2019). S-hybrid step-down DC-DC converter—Analysis of operation and design considerations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1), 265–275.
- [6] Ahrabi, R. R., Hosseini, S. H., Sabahi, M., & Aghaei, M. (2016). A novel step-up multiinput DC-DC converter for hybrid electric vehicles application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(5), 3549–3561.
- [7] Yi, F., & Wang, F. (2023). Review of voltage-bucking/boosting techniques, topologies, and applications. *Energies*, 16(2), 842.
- [8] Meshael, H., Elkhateb, A., & Best, R. (2023). Topologies and design characteristics of isolated high step-up DC-DC converters for photovoltaic systems. *Electronics*, 12(18), 3913.
- [9] Udumula, R. R., Hanumandla, D., & Bellapu, V. (2020). Closed loop voltage mode controlled high step-down/step-up positive output buck-boost converter. *Journal of Power Technologies*, 100(3), 255.
- [10] Bakeer, A., Chub, A., & Vinnikov, D. (2020). Step-up series resonant DC-DC converter with bidirectional-switch-based boost rectifier for wide input voltage range photovoltaic applications. *Energies*, 13(14), 3747.
- [11] Rajavel, A., & Prabha, N. R. (2021). Fuzzy logic controller-based boost and buck-boost converter for maximum power point tracking in solar array. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(4), 945–957.
- [12] Basha, C. H., & Murali, M. (2022). A new design of transformerless, non-isolated, high step-up DC-DC converter with hybrid fuzzy logic MPPT controller. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 50(1), 272–297. <https://doi.org/10.1002/cta.3153>
- [13] Attayah, B. T., Alzaidi, A. I., Fasel, N., & Rava, M. (2021). Enhancing the photovoltaic system output performance through the use of maximum power point tracking and fuzzy logic control. In *2021 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)* (pp. 68–72). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPEA51500.2021.9417752>
- [14] Ullah, K., Iqbal, T., Jan, N., Khan, H., & Kim, H. J. (2023). Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system. *Results in Engineering*, 20, 101466.
- [15] Belhadj, S. M., Ellabban, O., Abdelhameed, M. M., Elkhateb, A., & Baccar, W. (2025). Control of multi-level quadratic DC-DC boost converter for photovoltaic systems using type-2 fuzzy logic technique-based MPPT approaches.

Brainwaves in Biometric Identification: A Theoretical Framework and Novel Methodology

Agyhullámok a biometrikus azonosításban: elméleti keretrendszer és új módszertan

Réka Veronika Sallay, Arnold Őszi

* Óbuda University Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering, Budapest, Hungary
sallayrekaveronika@stud.uni-obuda.hu, oszi.arnold@bgk.uni-obuda.hu

Abstract — This paper provides a thorough overview of biometric identification methods, including fingerprints, facial recognition, iris scans, voice patterns, and brainwaves. The unique features are examined of each type and their success rates, False Acceptance Rates (FAR), and False Rejection Rates (FRR) are compared to highlight their strengths and weaknesses. A novel method utilizing frontal beta brainwaves is also introduced for biometric identification with electroencephalography (EEG). This approach offers better security and reliability, potentially setting a new standard in biometric systems. Although not described in detail, its benefits are outlined, and future advancements are anticipated in brainwave-based biometrics. Our goal is to help the understanding and application of biometric systems, offering new insights and possibilities for secure and reliable identification methods. This work aims to push the boundaries of biometric research and pave the way for future innovations in secure identification.

Keywords: brainwaves, biometric identification, beta brainwaves, EEG, FRR, FAR

Összefoglalás — Ez a tudományos tanulmány átfogó áttekintést nyújt a biometrikus azonosítás különböző módszereiről, beleértve az ujjlenyomatot, arcfelismerést, íriszszkennert, hangmintázatokat és az agyhullámokat. Vizsgáljuk minden egyes típus egyedi jellemzőit, és összehasonlítjuk sikerességi arányukat, a téves elfogadási rátát (False Acceptance Rate, FAR) és a téves elutasítási rátát (False Rejection Rate, FRR), hogy kiemeljük erősségeiket és gyengeségeiket. Ezen felül bemutatunk egy új, elektroencefalográfián (EEG) alapuló módszert, amely a frontális béta agyhullámokat használja biometrikus azonosításra. Ez a megközelítés nagyobb biztonságot és megbízhatóságot ígér, és potenciálisan új mércét állíthat fel a biometrikus rendszerek terén. Bár a módszer részletes technikai leírását ebben a cikkben nem fejlesztjük ki teljes részletességgel, vázoljuk előnyeit, és bizakodással tekintünk a jövőbeni fejlesztések felé az agyhullám-alapú biometria terén. Célunk a biometrikus rendszerek jobb megértésének és alkalmazásának elősegítése, új betekintéseket és lehetőségeket kínálva a biztonságos és megbízható azonosítási módszerek területén. Munkánk arra törekszik, hogy kitágítsa a biometriai kutatások határait, és megalapozza a jövőbeni innovációkat a biztonságos azonosításban.

Kulcsszavak: agyhullámok, biometrikus azonosítás, béta agyhullámok, EEG, FRR, FAR

1 INTRODUCTION

The science of biometrics dates back several centuries but was accepted first as a scientific system used by the police to identify criminals in the 19th century, when Alphonse Bertillon developed a method for identifying criminals based on body measurements. This field advanced significantly in the 20th century with the introduction of fingerprint recognition, and has continued to evolve with technological advancements. Currently, biometric identification is a crucial component of security systems, providing a reliable and efficient means of verifying identity in various applications, ranging from law enforcement to personal device security. This paper investigates the theoretical foundations of biometric identification, comparing different types of biometric data and their effectiveness.

Biometric identification is a method of recognizing individuals based on unique physical and behavioural characteristics. Such biometric data includes fingerprints, facial features, iris patterns, voice characteristics, and even brainwave patterns. Biometric identification is defined as the utilization of these unique traits to authenticate or identify individuals.

2 BIOMETRIC IDENTIFICATION TYPES

Biometric identification methods are essential tools for verifying individual identities by analysing unique physical and behavioural traits.

2.1 Fingerprint Recognition

Fingerprint recognition involves analysing the unique ridge and valley patterns found on an individual's fingertip. Each person's fingerprint is unique, making this method highly reliable for identity verification. The technology operates by capturing an image of the fingerprint, then processing, and comparing it to a stored template to verify identity. Despite its widespread use, fingerprint recognition

may be influenced by dermatological conditions or injuries. [1]

2.2 Iris Recognition

Iris recognition analyses the unique patterns in the coloured ring (iris) surrounding the pupil of the eye. The process involves capturing a detailed image of the iris, which is then converted into a digital template for comparison. Iris patterns are stable throughout a person's life, making this method highly reliable. However, it requires the subject to be relatively close to the camera, which can be a limitation in some scenarios. [2]

2.3 Facial Recognition

Facial recognition identifies individuals based on distinctive features of their faces, such as the distance between the eyes, nose shape, and jawline. Advanced algorithms analyse a captured image or video of a face and compare it to stored templates. While facial recognition is convenient and not intrusive, it can be affected by changes in appearance due to aging, makeup, or facial hair, and even varying lighting conditions. [3]

2.4 Voice Recognition

Voice recognition uses vocal traits for identity verification. Each person's voice has unique characteristics, such as pitch, tone, and cadence, which can be analysed and used for secure access to devices and services. The technology records a voice sample, extracts features, and matches them against a stored voiceprint. However, it can be influenced by background noise, or vocal changes caused by illness. [4]

2.5 Retina Scanning

Retina scanning examines the unique pattern of blood vessels at the back of the eye. This method requires close proximity to the scanning device, ensuring high accuracy. The process involves shining low-intensity light into the eye and capturing the reflection from the retina. While it is highly secure, retina scanning can be uncomfortable for users and requires heavily specialized equipment. [5]

2.6 Hand Geometry Recognition

Hand geometry recognition studies the shape and structure of an individual's hand, including the length and width of fingers and the contours of the palm. Hand geometry scanners capture an image of the hand and compare it to a stored template. [6]

2.7 Vein Recognition

Vein recognition maps the unique pattern of veins in a person's palm or finger. This method provides high security because vein patterns are difficult to replicate and are located beneath the skin's surface, making them less susceptible to external damage or alteration. The technology uses near-infrared light to capture an image of the veins, which is then processed and compared to stored templates. [7]

2.8 Gait Recognition

Gait recognition analyses an individual's walking pattern, which is unique and can be used for continuous identification and surveillance. This method captures and analyses the motion dynamics and rhythm of a person's gait through video footage or wearable sensors. However, it can be influenced by changes in walking conditions, such as injuries. [8]

2.9 Ear Recognition

Ear recognition focuses on the unique morphological features of an individual's ear. This method holds potential in various environments due to the distinctiveness of ear features and their stability over time. Ear recognition systems capture an image of the ear and compare it to stored templates. [9]

2.10 DNA Matching

DNA matching involves comparing genetic codes to verify identity, making it vital in forensic analysis and paternity tests. Each person's DNA is unique, except for identical twins, providing a definitive means of identification. DNA samples can be collected from biological samples containing blood, hair, skin cells, or other biological materials. While highly accurate, DNA matching is time-consuming and requires specialized laboratory equipment, making it unsuitable for real-time identification. [10]

3 FAR AND FRR BASED ANALYSIS

3.1 FAR

The False Acceptance Rate (FAR) is the probability that a biometric security system will incorrectly accept an unauthorized person as an authenticated user. It quantifies the likelihood of the system misidentifying an individual, allowing access to someone who should be denied. [11] Calculation of the FAR is presented in equation (1).

$$FAR = \frac{Nfp}{Nfp + Ntn} 100\% \quad (1),$$

where Nfp denotes the number of false positives, and Ntn represents the number of true negatives.

3.2 FRR

The False Rejection Rate (FRR) is the probability that a biometric security system incorrectly rejects an authorized person. It measures the likelihood of the system failing to recognize a legitimate user, denying them access. Calculation of the FRR is determined as shown in equation (2) [11]:

$$FRR = \frac{Nfn}{Nfn + Ntp} 100\%, \quad (2)$$

where Nfn denotes the number of false negatives, and Ntp corresponds to number of true positives.

3.3 Overall Error

By summing the FAR and FRR values up and dividing the resultant value by the total number of accesses, one may calculate the overall error rate (3). [11]

$$Error = FAR + FRR. \quad (3)$$

3.4 TAR and TRR

3.4.1 *True Acceptance Rate (TAR): The probability that a biometric system correctly accepts an authorized user. [12]*

$$TAR = 1 - FRR \quad (4)$$

3.4.2 *True Rejection Rate (TRR): The probability that a biometric system correctly rejects an unauthorized user. [12]*

$$TRR = 1 - FAR \quad (5)$$

4 FAR AND FRR RATES OF MOST USED BIOMETRIC IDENTIFICATION METHODS

4.1 The False Rejection Rate (FRR) and False Acceptance Rate (FAR) for Fingerprint Recognition Systems

Fingerprint recognition systems have been extensively studied due to their widespread use in security applications. Numerous studies have highlighted the performance of these systems under different conditions.

4.1.1 Robust Partial Fingerprint Recognition:

Baseline models show an FRR ranging from 14.67% to 17.57% at an FAR of 0.1% under challenging conditions such as a 10% occlusion ratio. Improved models have reduced the FRR to 9.99% under the same conditions. [13]

4.1.2 US-VISIT System:

The US-VISIT study demonstrated a True Acceptance Rate (TAR) of approximately 96%, corresponding to an FRR of approximately 4%, with an FAR of 0.09% for a large database of 6 million fingerprints. Using high-quality fingerprint images, the TAR increased to 98% (FRR of 2%) at an FAR of 0.01%. [14]

4.1.3 Optical Spatial-Frequency Correlation System (OSC):

This system achieved an FRR and FAR balance point (Equal Error Rate or EER) at around 0.527. Under real-world conditions, the performance of this system was found to be very high, with significant accuracy improvements compared to commercial systems. [15]

4.1.4 General Findings from Multiple Studies:

The performance of fingerprint systems can vary widely. For example, the TAR ranged from 56.10% to 99.01% when the FAR was held constant at 0.01% in various tests. State-of-the-art systems achieved TARs greater than 98%, indicating an FRR of less than 2% at this FAR threshold. [16]

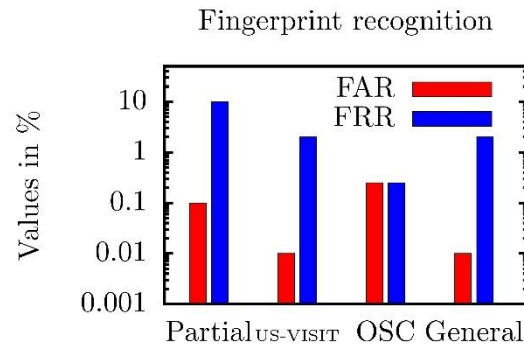


Figure 1: Statistical representation of the different FAR and FRR rates in fingerprint recognition

4.2 FRR and FAR for Iris Recognition Systems

Iris recognition is highly regarded for its precision and reliability. Multiple studies have examined the performance of these systems.

4.2.1 Study on Combined Feature Extraction Methods:

This study utilized databases such as CASIA V1.0 and MNU V.2. The reported results for the CASIA V1.0 database showed an FAR of approximately 0.02% and an FRR of around 0.19%. [12]

4.2.2 Review of Different Iris Recognition Techniques:

In a comprehensive review of various techniques, including the use of Gabor filters and wavelet transforms, the FRR and FAR were found to be highly dependent on the feature extraction and matching algorithms used. Typical values from reviewed studies showed FAR values ranging from 0.1% to 0.5% and FRR values from 0.5% to 1.5%. [18]

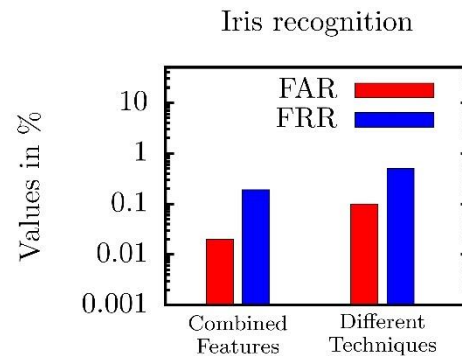


Figure 2: Statistical representation of the different FAR and FRR rates in iris recognition

4.3 Facial Recognition FRR and FAR Study Results

4.3.1 NIST Study on Face Recognition Algorithms:

The National Institute of Standards and Technology (NIST) has conducted extensive evaluations of facial recognition algorithms through its Face Recognition Vendor Test (FRVT) program. Their studies revealed significant variation in accuracy among different algorithms. In their 2019 evaluation, NIST found that the most accurate algorithms could achieve very low error rates: False Acceptance Rates (FAR) of approximately

0.25% and similarly low False Rejection Rates (FRR) for specific demographic groups. However, the performance varied considerably across demographics, with error rates sometimes differing by factors ranging from 10 to 100 times depending on the algorithm and the demographic group in question. [19]

4.3.2 Multimodal Biometric System Study:

A study published in the *International Journal of Intelligent Unmanned Systems* examined a multimodal biometric system combining facial and voice recognition using K-Nearest Neighbours (KNN) classifier. This system reported a FAR of 0.5% and an FRR of 0.75%, showcasing the improved accuracy when integrating multiple biometric modalities. [20]

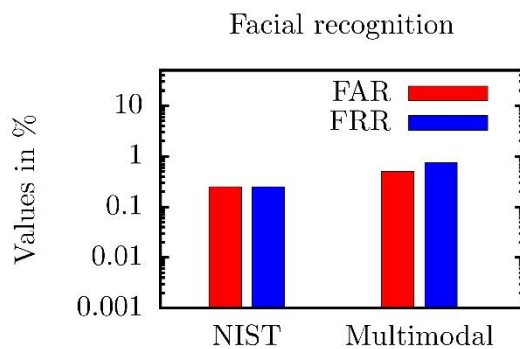


Figure 3: Statistical representation of the different FAR and FRR rates in facial recognition

4.4 FRR and FAR for Voice Recognition Systems

4.4.1 Multimodal Biometric System Using KNN Classifier:

In a study that incorporated both facial and voice recognition, the system achieved a FAR of 0.5% and an FRR of 0.75%. This study utilized algorithms such as the Viola-Jones method for face detection and Mel-frequency cepstral coefficients for processing voice data, which were integrated using a KNN classifier. [21]

4.5 FRR and FAR for Retina Scanning

4.5.1 FRR and FAR Values:

A study reported that retina scanning has a False Rejection Rate (FRR) of 1.8%, which underscores its high accuracy in identifying individuals correctly. The False Acceptance Rate (FAR) for retina scanning has been reported to be extremely low, with some findings suggesting an error rate as low as 1 in 10 million. [22]

4.5.2 Effect of Distance from the Sensor:

Retina scanning requires close proximity to the scanning device, similar to looking through a microscope. This necessity for closeness means that any deviation from the optimal distance may negatively impact the accuracy and effectiveness of the scan. This requirement necessitates user compliance and comfort with the scanning procedure, as maintaining the correct position is crucial for accurate readings. This need for precise positioning and the potential discomfort it causes may contribute to higher FRR if the user moves or fails to position their eye correctly. [22]

4.6 Hand Geometry Recognition: FRR and FAR Metrics

4.6.1 Hand Geometry and Vascular Patterns Study:

This study combined hand geometry and vascular patterns for biometric recognition, achieving high recognition accuracy. The reported Equal Error Rate (EER), representing the point at which FAR and FRR are equal, was 0.06%. While the study focuses on EER, this low value suggests that both FAR and FRR are minimal. [23]

4.6.2 General Hand Geometry Recognition:

Hand geometry systems typically exhibit FARs and FRRs ranging from 0.1% to 0.2%. These figures indicate high reliability in distinguishing between authorized and unauthorized users. [23]

4.6.3 Neural Network-Based Hand Geometry Recognition:

A research project employing neural networks for hand geometry recognition reported an FAR of 0.13% and an FRR of 0.14%. These values reflect the robustness of neural network classifiers in improving the accuracy of biometric systems. [24]

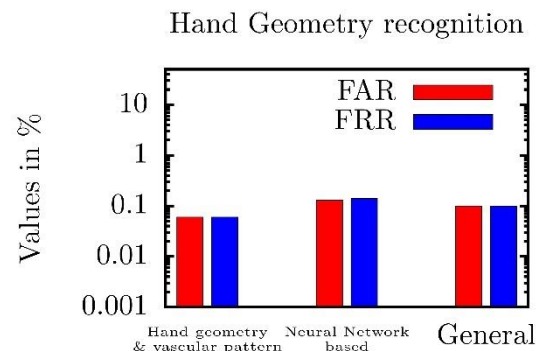


Figure 4: Statistical representation of the different FAR and FRR rates in hand geometry recognition

4.7 FRR and FAR of Vein Recognition

FRR and FAR results from recent studies on vein recognition, particularly finger vein and hand vein recognition.

4.7.1 Finger Vein Recognition:

A systematic review on finger vein recognition techniques reported that modern algorithms have improved significantly. The study indicated that some advanced methods achieve FRRs as low as 0.15% and FARs of around 0.1% [25]

Another study utilizing a convolutional neural network (CNN) for finger vein recognition reported an FRR of 0.11% and an FAR of 0.07%, highlighting the high accuracy and reliability of CNN-based methods. [26]

4.7.2 Hand Vein Recognition:

A study focusing on dorsal hand vein recognition using CNNs found that FRR and FAR could be reduced to 1.2% and 1.5%, respectively, when using a feature learning and transfer learning approach [27]

Another research highlighted that using a combination of texture and shape clues in hand vein recognition resulted in an FRR of 1.34% and an FAR of 1.05%, demonstrating the effectiveness of multimodal feature integration. [27]

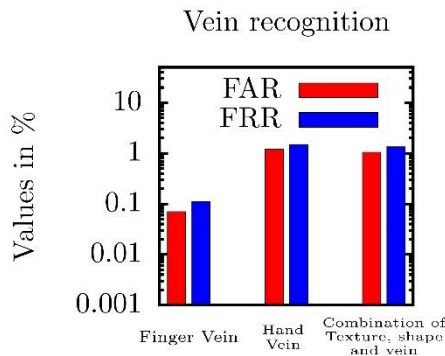


Figure 5: Statistical representation of the different FAR and FRR rates in vein recognition

4.8 False Rejection Rate (FRR) and False Acceptance Rate (FAR) of Gait Recognition

4.8.1 Security and Privacy Enhanced Gait Authentication:

This study reported an FRR of 4.17% and an FAR of 0% using gait data from specific datasets, including OU-ISIR. [28]

4.8.2 OpenGait Benchmark Study:

An in-depth analysis in the OpenGait study highlighted the practical challenges and performance variations across different environmental conditions. It reported that certain advanced models could achieve an FRR of 5.44% and FAR of 0.05% under optimized, controlled settings. [29]

4.8.3 Gait Recognition using CNNs:

A study focusing on convolutional neural network (CNN) models for gait recognition achieved an FRR of 3.2% and an FAR of 2.1%, demonstrating the potential of deep learning techniques in improving gait recognition accuracy. [30]

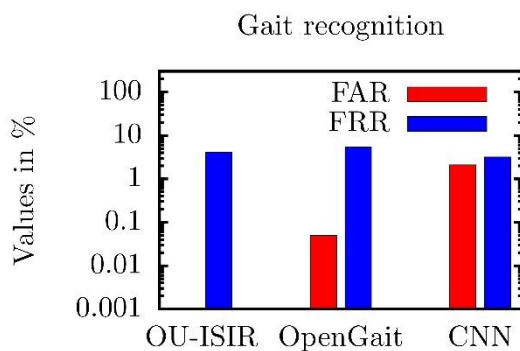


Figure 6: Statistical representation of the different FAR and FRR rates in gait recognition

4.9 An overview of the FAR and FRR rates

Table 1: Comparative summary of FAR and FRR rates

	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8
F	0.0	0.0	0.5	0.5	—*	0.1	0.0	2.1
A	1%	2%	%	%	%	%	7%	%
R								
FR	2%	0.1	0.7	0.7	1.8	0.1	0.1	3.2
R		9%	5%	5%	%	%	1%	%

The values presented in the table represent the most favourable for each type of biometric identification method.

* No conclusive FAR value was reported for retina scanning. For further details, see section (4.5), as the number from 4.1 to 4.8 corresponds to the subsection numbers.

Comparison of FRR and FAR rates

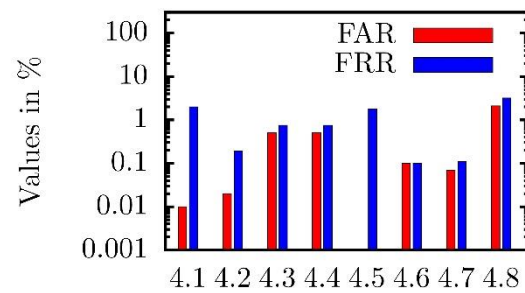


Figure 7: Statistical representation of the different FAR and FRR rates across different biometric identification methods

As observed, FAR and FRR rates are impressively small throughout every method of biometric identification type, however, these statistical numbers represent measurements taken in ideal laboratory conditions, where no attempts at impersonation were present. There are multiple weak points to each of the methods (as mentioned above in the definitions of the methods), some of which are easier to exploit than others.

Accordingly, the pursuit for a safer biometric identification method still continues. One possible solution to such an impossible task might be brainwave-based identification.

5 BRAINWAVE BIOMETRIC IDENTIFICATION - THEORETICAL BACKGROUND

5.1 Overview

Brainwaves are electrical patterns generated by the synchronized firing of neurons in the brain. There are several types of brainwaves, each associated with different

states of consciousness and mental activities. . These electrical signals generate electromagnetic waves, and their measurement through electroencephalography (EEG) unveils the dynamic landscape of neural activity. Neurons, the fundamental units of the brain, communicate through electrical impulses.

5.2 Types of brainwaves

When large groups of neurons fire in a coordinated manner, they produce distinct and measurable wave patterns. These patterns are categorized based on their frequency, measured in Hertz (Hz), and are related to distinct mental states.

5.2.1 Alpha brainwaves (8 – 13 Hz)

Alpha waves are associated with a relaxed and alert state of consciousness. They are typically observed when the mind is calm, such as during meditation or light relaxation. Alpha waves are also observed when the eyes are closed but the individual is not asleep. Increased alpha activity may enhance learning, concentration, and mental coordination. [33]

5.2.2 Beta brainwaves (13 – 30 Hz)

Beta waves are associated with active, analytical thought and concentration. They predominate during wakefulness, especially when engaged in problem-solving, decision-making, or focused mental tasks. Higher beta frequencies are associated with stress and anxiety, while lower beta frequencies are linked to heightened alertness and cognitive engagement.

Different categorization methods: Categorizing beta brainwaves involves various methods aimed at discerning distinct aspects of their activity, contributing to a nuanced understanding of cognitive states. This enables researchers and clinicians to interpret neural dynamics comprehensively. Several categorization methods for beta brainwaves encompass frequency bands, task-related changes, and spatial distribution.

Spatial Distribution:

Rolandic beta brainwaves: Rolandic beta waves originate in the sensorimotor cortex, playing a crucial role in motor planning and execution. These waves are implicated in motor functions and are often observed during movement preparation. [31], [34]

Frontal beta brainwaves: Frontal beta waves emanate from the frontal lobe, contributing to higher cognitive functions, decision-making, and executive control. Frontal beta activity is linked to active mental engagement, attentional control, and complex cognitive processes. [31], [34]

5.2.3 Gamma brainwaves (30 – 100 Hz)

Gamma waves are the fastest brainwaves and are associated with high-level cognitive functions, such as memory recall and problem-solving. They are further linked to peak states of concentration and heightened perception. Gamma waves are thought to play a role in integrating information across different brain regions and are associated with moments of insight and learning.[33]

5.2.4 Theta brainwaves (4 - 8 Hz)

Theta waves are commonly present during light sleep, deep relaxation, and meditation. They are also associated with creativity, intuition, and a dream-like state. Theta waves play a role in memory consolidation and are often

observed during the early stages of sleep or when engaged in activities requiring a focused, yet relaxed, state of mind. [38]

5.2.5 Delta brainwaves (0.4 – 4 Hz)

Delta waves are the slowest brainwaves and are most prominent during deep sleep. They are associated with the restorative and healing functions of sleep, including physical rejuvenation and immune system maintenance. Delta waves are crucial for overall well-being and are indicative of the deepest stages of non-REM sleep. [33]

5.3 Types of identification brainwave methods

Brainwave identification, a subtype of biometrics, uses the brain's unique electrical patterns as a distinguishing characteristic. Several methods have been used to extract these different patterns.

5.3.1 Power Spectral Density – PSD

PSD is a fundamental signal processing technique that decomposes a signal into its constituent frequency components. In the context of brainwaves, PSD provides a spectral representation of brain activity. By quantifying the power distribution across different frequency bands (delta, theta, alpha, beta, gamma), PSD offers insights into the overall brain state and cognitive processes. For identification, variations in the spectral power distribution across individuals can serve as discriminating features. [35]

5.3.2 Geometrical Approach

Geometrical features focus on the shape and form of brainwave signals. Fractal dimension metrics quantify the complexity and self-similarity of the EEG signal and serve as discriminative features. Additionally, techniques like principal component analysis (PCA) and independent component analysis (ICA) are applied to reduce dimensionality and extract underlying components. [36]

5.3.3 Machine Learning

Machine learning algorithms excel at finding patterns in complex datasets. Support Vector Machines (SVMs), Random Forests, and Artificial Neural Networks (ANNs) are commonly used for brainwave classification. These algorithms can learn to differentiate individuals based on extracted features. [32,37]

5.3.4 Time-Frequency Analysis with Wavelet Transform

The wavelet transform offers a powerful tool for analysing the time-frequency characteristics of brainwaves. By decomposing the signal into different frequency components at different time scales, it reveals how brain activity evolves over time. Wavelet coefficients can be used as features for classification, capturing both the spectral and temporal aspects of brainwave patterns. [38]

5.3.5 Dynamic Time Warping – DTW

DTW is a versatile algorithm for comparing time series data, making it suitable for beta wave analysis. It allows for non-linear alignment of two time series, accommodating variations in speed and rhythm. By calculating the distance between two beta wave sequences using DTW, it's possible to assess their similarity and determine if they originate from the same individual. [39]

5.3.6 Hidden Markov Models

HMMs are probabilistic models that are well-suited for capturing the temporal dynamics of brain signals. By modelling brainwave sequences as a hidden Markov process, it's possible to represent the underlying states and transitions between them. HMMs can be used for both classification and generation of synthetic brainwave patterns. [40]

5.3.7 Entropy Measures for Complexity Analysis

Entropy quantifies the degree of disorder or randomness in a system. Applied to brainwaves, it can quantify the complexity and variability of brain activity. Individuals might exhibit distinct entropy levels in their brainwave patterns, providing another feature for identification. [41,42]

5.4 Measuring brainwaves

Brainwave measurement technologies record and analyse the electrical activity produced by neurons in the brain. These techniques are critical for studying brain function and detecting neurological disorders. Various approaches have distinct advantages in terms of temporal and spatial resolution, invasiveness, and practical use.

5.4.1 EEG – Electroencephalography

Electroencephalography (EEG) is one of the most used brainwave measurement methods. It involves placing electrodes on the scalp to detect and record the electrical activity generated by neurons. EEG captures brainwaves in real-time, offering high temporal resolution, which makes it particularly useful for studying dynamic brain activities such as sleep, cognition, and epileptic seizures. The process begins with strategically placing electrodes on the scalp, usually following the International 10-20 system. The electrodes pick up electrical signals produced by neuronal activity, which are then amplified and recorded for further analysis. EEG is widely used in clinical diagnosis for conditions like epilepsy, sleep disorders, and brain injuries, as well as in research settings to study cognitive processes and brain functions. Despite its advantages, EEG has limited spatial resolution and is prone to artifacts from muscle movements and external electrical sources. [43]

5.4.2 MEG – Magnetoencephalography

Magnetoencephalography (MEG) measures the magnetic fields produced by neural activity, providing high temporal resolution comparable to EEG but with better spatial accuracy. MEG sensors detect the magnetic fields generated by neuronal activity, which are then recorded and mapped to localize the source of the brain activity. This technique is highly valuable for clinical applications, such as mapping brain function prior to surgery, especially for epilepsy patients. It is also used extensively in research to study brain dynamics and functional connectivity. While MEG offers improved spatial resolution over EEG, it is more expensive and requires specialized facilities. Additionally, MEG is sensitive to head movements, which can affect the quality of the data. [44]

5.4.3 fMRI - Functional Magnetic Resonance Imaging

Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) indirectly measures brain activity by detecting changes in blood flow and oxygenation levels, offering excellent spatial resolution. The fMRI process involves placing the subject in an MRI scanner, where a strong magnetic field is applied. The scanner detects changes in blood flow and oxygenation associated with neural activity, collecting data

over time to map brain activity. This method is particularly useful for identifying brain regions affected by stroke, tumours, or neurological disorders, and for investigating brain function and cognitive processes. However, fMRI has slower temporal resolution compared to EEG and MEG, is expensive, and may cause discomfort due to the confined space of the MRI scanner. [45]

5.4.4 NIRS - Near-Infrared Spectroscopy

Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) uses light to monitor changes in blood oxygen levels in the brain, providing a portable and non-invasive method for measuring brain activity. NIRS devices emit near-infrared light into the scalp, which penetrates the brain and is absorbed differently by oxygenated and deoxygenated blood. Detectors measure the reflected light, offering information about blood oxygen levels and, consequently, brain activity. NIRS is used in clinical monitoring, cognitive research, and portable applications such as field studies. Its advantages include portability, non-invasiveness, and real-time monitoring capabilities. [46]

5.4.5 fNIRS - Functional Near-Infrared Spectroscopy

Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) is a variation of NIRS that measures brain activity by detecting changes in blood oxygenation levels during cognitive tasks. The process involves emitting near-infrared light into the scalp, which is absorbed differently by oxygenated and deoxygenated blood. Detectors measure the reflected light, providing information on blood oxygen levels. fNIRS is applied in cognitive research, clinical applications, and portable applications such as field studies. [47]

5.4.6 PET - Positron Emission Tomography

Positron Emission Tomography (PET) involves injecting radioactive tracers to visualize brain activity, providing insights into metabolic processes and neurotransmitter functions. The process starts with injecting a radioactive tracer into the bloodstream, which accumulates in areas of high activity. The PET scanner detects the gamma rays emitted by the tracer, and the data are reconstructed into images showing tracer concentration. PET is used for clinical diagnosis, research, and drug development, offering unique insights into brain metabolism and chemistry. However, PET requires the injection of radioactive tracers, is expensive, and has slower temporal resolution compared to EEG and MEG. [48]

5.4.7 SPECT - Single Photon Emission Computed Tomography

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT) is analogous to PET but uses different tracers and detection methods. After injecting a radioactive tracer into the bloodstream, the SPECT scanner detects gamma rays emitted by the tracer, and the data are reconstructed into 3D images showing tracer distribution. SPECT is used in clinical diagnosis, neuroscience research to assess brain perfusion, detect seizures, and diagnose dementia. While SPECT provides functional imaging and can image deep brain structures, it requires radioactive tracers, has lower spatial and temporal resolution compared to PET and fMRI, and involves exposure to small amounts of radiation. [49]

6 INTRODUCING A NEW METHOD

6.1 Motivation

In the field of biometric identification, a new frontier is emerging that uses the unique electrical signals of the brain to validate individuals. This cutting-edge technique, known as brainwave-based biometric identification, takes advantage of the distinct properties of brainwaves. In this study, we focus on beta brainwaves, which range from 13 to 30 Hz, and are mostly connected with active, analytical cognition and high levels of cognitive engagement. These waves, with their complicated and individualized patterns that reflect a person's unique cerebral activity during cognitive tasks, offer a viable option for biometric identification.

While most brainwave-based biometric identification systems have generally centred on alpha brainwaves, which are associated with relaxation and alertness, focusing on beta brainwaves introduces a novel dimension to biometric identification research. Beta waves vary significantly between persons during tasks that require concentration and problem-solving, providing a rich source of data for creating robust identification algorithms.

Electroencephalography (EEG) is the most straightforward and accessible method for measuring brainwave activity, making it particularly suitable for practical biometric applications. EEG involves placing electrodes on the scalp to detect and record the electrical activity generated by neurons, offering real-time brainwave capture with high temporal resolution. This ease of use and non-invasive nature make EEG a preferable choice over other measurement techniques like MEG, fMRI, and PET, which can be more complex, expensive, and less accessible.

Implementing brainwave-based identification methods such as power spectral density, geometrical approaches, machine learning, time-frequency analysis with wavelet transform, dynamic time warping, hidden Markov models, and entropy measures for complexity analysis involves considerable computational load and time. These techniques require sophisticated processing to effectively extract, decode, and classify the unique brainwave patterns, ensuring reliable and secure biometric identification.

6.2 Our Novel Method

To enhance the investigation of brainwave-based biometric identification, we launched a comprehensive research program centred on the distinct patterns of frontal beta brainwaves. Our goal is to create a robust and reliable biometric identification system that makes use of the complexities of these brainwave patterns. To support this aim, we developed a simpler EEG circuit designed exclusively for this study. Our circuit is inspired by the following design [50], that is specifically built for alpha and beta brainwaves combined data acquisition.

Our custom-built simplified EEG circuit is designed to be both efficient and user-friendly, powered by two 9V batteries to ensure portability and ease of use. This circuit can capture the delicate electrical signals produced by neuronal activity in the frontal lobe, which are crucial for analysing beta brainwaves. We hope to take advantage of the distinct cognitive engagement patterns that occur during

concentration and problem-solving tasks by focusing on the frontal lobe.

The captured brainwave data is transmitted to a computer via a dedicated connection. We have developed a specialized software program that receives these signals in the form of audio files. This program is a critical component of our research setup, designed to handle the complex processing requirements of brainwave data. Upon receiving the audio files, the program converts them into the appropriate digital format for further analysis.

One of the key functionalities of our software is its ability to plot the measured brainwave data points, providing a visual representation of the neural activity. This visual output is essential for initial inspections and real-time monitoring during data acquisition sessions. Beyond plotting, the program also employs Fourier transform techniques to convert the time-domain signals into their frequency-domain counterparts. This transformation is necessary for isolating and analysing the specific beta wave frequencies, allowing us to delve deeper into the unique patterns associated with individual cognitive engagement.

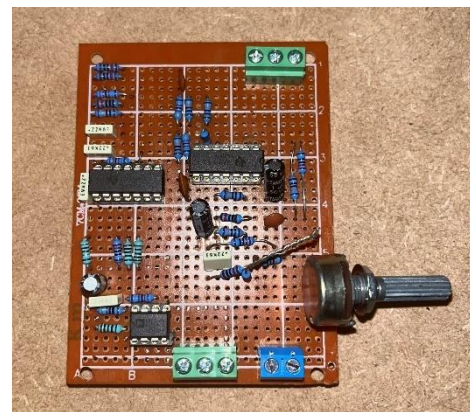


Figure 8: Our simplified EEG circuit in real life

Fig. 8 shows our simplified EEG circuit specifically to measure frontal beta brainwaves and convert them to a usable file format to computers.

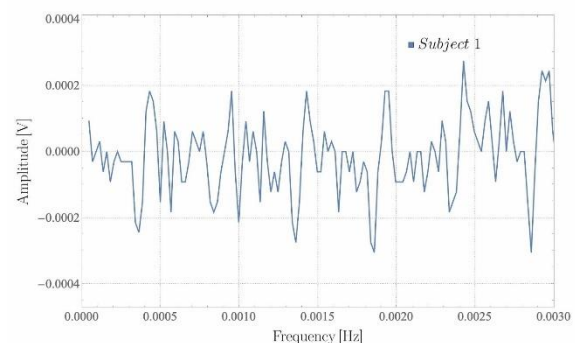


Figure 9: The representation of subject 1's measured frontal beta brainwave

Fig. 9 illustrates an example of the graphical representation of the, frontal beta brainwave in Fourier space, measured from Subject 1 using our custom device.

Currently our program can only measure for a short duration, due to data size constraints (approximately 44,100 samples per second).

7 FUTURE PLANS

As discussed before, the device currently can only measure for about half a second because of computational problems regarding the data size. In the future we aim to extend the recording duration to at least 10 minutes.

Also, we wish to compare the different measurement types, and identify differences and similarities between alpha, beta, and frontal beta brainwaves, to discover the brainwave-based identification method with the lowest FAR and FRR rate.

We also plan to take measurements from a bigger data pool and public to include a more diverse and statistically representative sample.

8 CONCLUSION

This study presents a theoretical exploration of brainwave applications in biometric identification, covering multiple frequency bands and introducing a novel method focusing on frontal beta brainwaves. Leveraging electroencephalography (EEG), this method expands the scope of biometric systems. Brainwaves, generated by synchronized neuronal activity, offer insights into various states of consciousness. Beta brainwaves, associated with analytical thought, are categorized based on frequency and subjected to different identification methods. EEG, a key measurement technique, captures and analyses brainwave patterns, contributing to advancements in biometric identification. Ongoing research focuses on beta brainwaves, employing a novel approach that diverges from existing methodologies. The paper concludes by presenting measurements of frontal beta brainwaves and Fourier transform analysis, highlighting our efforts to reduce signal noise and enhance salient features for improved identification accuracy.

9 REFERENCES

- [1] Maltoni, D., Maio, D., & Jain, A. K. (2003). *Biometric Systems and Applications*. CRC Press.
- [2] Aminu Ghali, Abdulrahman & Jamel, Sapice & Mohamad, Kamaruddin & Yakub Abubakar, Nasir & Mat Deris, Mustafa. (2017). A Review of Iris Recognition Algorithms. JOIV: International Journal on Informatics Visualization. 1.
- [3] Kaur P, Krishan K, Sharma SK, Kanchan T. Facial-recognition algorithms: A literature review. *Medicine, Science and the Law*.
- [4] R. A. Rashid, N. H. Mahalin, M. A. Sarijari and A. A. Abdul Aziz, "Security system using biometric technology: Design and implementation of Voice Recognition System (VRS)," 2008 International Conference on Computer and Communication Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008, pp. 898-902.
- [5] Panda, N. R., & Sahoo, A. K. (2022). A Detailed Systematic Review on Retinal Image Segmentation Methods. *Journal of digital imaging*
- [6] Ayurzana, Odgerel & Pumburei, Bumduuren & Kim, Hiesik. (2013). A study of hand-geometry recognition system. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings. 2
- [7] Wu, Wei & Elliott, Stephen & Lin, Sen & Sun, Shenshen & Tang, Yandong. (2019). A review of palm vein recognition. *IET Biometrics*.
- [8] Nixon, M. & Carter, J. & Cunado, D. & Huang, Ping & Stevenage, Sarah. (2006). Automatic Gait Recognition. 10.1007/0-306-47044-6_11.
- [9] Gupta, Phalguni & Purkait, Ruma. (2007). Ear Biometrics: A New Approach. 46-50. 1
- [10] Butler, J. M., McCord, B. R., & Holland, M. M. (2003). *Forensic DNA Typing: Biology, Technology, and Genetics of STR Markers*. Academic Press.
- [11] Nazareth, A. (2020). Demystifying false acceptance rate (far) and false rejection rate (FRR) in Electronic-KYC. Retrieved from <https://www.dicorm.com.my/post/demystifying-far-and-frr>
- [12] Abbasi, M. Improving identification performance in iris recognition systems through combined feature extraction based on binary genetics. *SN Appl. Sci.* 1, 730 (2019)
- [13] Jain, Anil & Ross, Arun & Prabhakar, Salil. (2004). An Introduction to Biometric Recognition. *Circuits and Systems for Video Technology*, IEEE Transactions on. 14. 4
- [14] Ayman Iskandar et al (2024). Biometric systems for identification and verification scenarios using spatial footsteps components. *Springer Link Volume 36*, pages 3817-3836
- [15] Patrick, Andrew. (2004). Usability and Acceptability of Biometric Security Systems.
- [16] Hiroyuki Yoshimura, (2011). Optical spatial-frequency correlation system for fingerprint recognition. Chapter metrics overview.
- [17] Nakanishi I. and Miyamoto C. 2010. On-Demand Biometric Authentication of Computer Users Using Brain Waves. In *Networked Digital Technologies*. F. Zavoral et al. Eds. Communications in Computer and Information Science (CCIS) series of Springer LNCS, 87 (Jul. 2010), 504--514.
- [18] Sarfraz, Muhammad & Alfaly, Nourah. (2022). Introductory Chapter: On Biometrics with Iris.
- [19] Romine, C. (2020). Facial Recognition Technology (FRT). Retrieved from <https://www.nist.gov/speech-testimony/facial-recognition-technology-frt-0>
- [20] Boutine, C. (2020). NIST study evaluates effects of race, age, sex on face recognition software. Retrieved from <https://www.nist.gov/news-events/news/2019/12/nist-study-evaluates-effects-race-age-sex-face-recognition-software>
- [21] Dinesh Kumar D.S. et al., (2019). Implementing and analysing FAR and FRR for face and voice recognition (multimodal) using KNN classifier.
- [22] Retinal scanning definition, faqs. (2022). Retrieved from <https://www.innovatrics.com/glossary/iris-retinal-scanning/>
- [23] GiTae Park and Soowon Kim, (2013). Hand Biometric Recognition Based on Fused Hand Geometry and Vascular Patterns. *MDPI, Physical Sensors*.
- [24] Clark, M. (2020). False acceptance rate (far) and false recognition rate (FRR). Retrieved from <https://www.bayometric.com/false-acceptance-rate-far-false-recognition-rate-frr/>
- [25] Kashif Shaheed et al (2018). A Systematic Review of Finger Vein Recognition Techniques, Kashif Shaheed et al., *MDPI, Information*.
- [26] Mohammad H. Alshayegi et al. (2022), Efficient hand vein recognition using local key point descriptors and directional gradients, *Springer Link*, volume 81, pages 15687–15705.
- [27] Rajendra Kumar et al., Dorsal Hand Vein-Biometric Recognition Using Convolution Neural Network., *Conference paper*, pp 1087-1107.
- [28] Tran, L., Nguyen, T., Kim, H., & Choid, D. (n.d.). Security and privacy enhanced gait authentication with Random Representation Learning and Digital Lockers. Retrieved from <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2108.02400>
- [29] Fan, C., Liang, J., Shen, C., Hou, S., Huang, Y., & Yu, S. (2022), OpenGait: Revisiting Gait Recognition Toward Better Practicality
- [30] M. Sivarathinabala et al., (2016). A Study on Security and Surveillance System Using Gait Recognition. *Springer Link* pp 227-252,

- [31] Kropotov, J. D. (2016). Beta and Gamma Rhythms. *Functional Neuromarkers for Psychiatry*, 107–119.
- [32] Palaniappan R. and Mandic D. P. 2007. Biometrics from Brain Electrical Activity: A Machine Learning Approach. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 29, 4 (2007), 738--742.
- [33] KOUDELKOVÁ, Zuzana a Martin STRMISKA. Introduction to the identification of brainwaves based on their frequency. In: *MATEC Web of Conferences* [online]. Majorca: EDP Sciences, (2018)
- [34] Juri D. Kropotov, (2009). *Quantitative EEG, Event-Related Potentials and Neurotherapy*, Academic Press
- [35] Cohen, L. (1995). *Time-Frequency Analysis of EEG Signals: A Tutorial*. *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(4), 33–46.
- [36] Jelinek, Herbert & Fernandez, Eduardo. (1998). Neurons and fractals: How reliable and useful are calculations of offractal dimensions? *Journal of Neuroscience Methods*. 81. 9-18.
- [37] Hu, Z.B., Buriachok, V., TajDini, M., Sokolov, V. (2021). Authentication System by Human Brainwaves Using Machine Learning and Artificial Intelligence. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEEA 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 83. Springer, Cham
- [38] Wavelet Transform in EEG Signal Analysis, Samar, V. J. et al. (1999). *Journal of Clinical Neurophysiology*.
- [39] Dynamic Time Warping for EEG Signal Comparison, Müller, M. (2007). *Information Retrieval for Music and Motion*.
- [40] Rabiner, L. R. (1989). Hidden Markov Models for EEG Signal Processing. *Proceedings of the IEEE*.
- [41] Burns, Thomas. (2015). Combining complexity measures of EEG data: multiplying measures reveal previously hidden information.
- [42] Costa, Madalena & Goldberger, Ary & Peng, Chung-Kang. (2005). Multiscale entropy of biological signals. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*.
- [43] Niedermeyer, E., & da Silva, F. L. (2004). *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. Lippincott Williams & Wilkins.
- [44] Hämäläinen, M., Hari, R., Ilmoniemi, R. J., Knuutila, J., & Lounasmaa, O. V. (1993). Magnetoencephalography—theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of Modern Physics*, 65(2), 413-497.
- [45] Logothetis, N. K. (2008). What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature*, 453(7197), 869-878.
- [46] Cui, X., Bray, S., Bryant, D. M., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2011). A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks. *NeuroImage*, 54(4), 2808-2821.
- [47] Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A. J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., & Wolf, M. (2014). A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *NeuroImage*, 85, 6-27.
- [48] National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Committee on the Mathematics and Physics of Emerging Dynamic Biomedical Imaging. *Mathematics and Physics of Emerging Biomedical Imaging*. Washington (DC): National Academies Press (US); 1996. Chapter 6, Positron Emission Tomography.
- [49] Hogg, Peter & Seeram, Euclid. (2013). *Practical SPECT/CT in nuclear medicine*.
- [50] cah6, user. "DIY EEG (and ECG) Circuit: 12 Steps (with Pictures) - Instructables." *Instructables*, 10 Aug. 2012, <https://www.instructables.com/DIY-EEG-and-ECG-Circuit/>.

Analysis of the Hungarian Unaccented Dactylic Finger-Spelling Alphabet Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

A magyar ékezet nélküli daktil ujjábécé elemzése egy adaptív neuro-fuzzy következtetési rendszerben (ANFIS)

Annamária Cserfalvi*, Márta Takács**, Gábor Simon-Nagy**

* Doctoral School of Applied Informatics and Applied Mathematics, Óbuda University, Budapest, Hungary

** John von Neumann Faculty of Informatics, Óbuda University, Budapest, Hungary

cserfalvi.annamaria@nik.uni-obuda.hu; takacs.marta@nik.uni-obuda.hu; nagy.gabor@nik.uni-obuda.hu

Abstract — This study presents the principles of fuzzy logic and the operation of the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). It then focuses on the analysis of the Hungarian, unaccented finger-spelling alphabet using the ANFIS approach. In the course of the research, a specific finger-spelling gesture was selected, through which the application of image processing techniques and the results obtained are demonstrated.

Keywords: hearing impairments, sign language, finger-spelling alphabet, fuzzy logic, ANFIS, image processing techniques, edge detection, image denoising, image enhancement, fuzzy clustering

Összefoglaló — A tanulmány a fuzzy logika alapelveit és az adaptív neuro-fuzzy következtetési rendszer (ANFIS) működését mutatja be. Ezt követően a magyar, ékezet nélküli ujj-betűző ábécé ANFIS-modell segítségével történő elemzésére összpontosít. A kutatás során egy konkrét ujj-betűző gesztus került kiválasztásra, amelyen keresztül bemutatásra kerülnek a képfeldolgozási technikák alkalmazása és az ezekből levezetett eredmények.

Kulcsszavak: hallássérült, jelnyelv, ujj-betűző ábécé, fuzzy logika, ANFIS, képfeldolgozási technikák, érzékelés, képzajmentesítés, képjavítás, fuzzy klaszterezés

1 INTRODUCTION

According to the World Health Organization (WHO), more than 1.5 billion people worldwide live with hearing impairments, which accounts for approximately 20% of the global population. Among them, nearly 35 million children are affected. Projections suggest that by 2050, this number is expected to rise to 2.5 billion, with about 766 million individuals requiring hearing rehabilitation. From a medical perspective, hearing loss is defined as a hearing threshold of 35 decibels (dB) or higher, as indicated by an audiogram. Around 80% of people with hearing loss live in low- and middle-income countries, and the prevalence increases with age. For instance, over 25% of people aged 60 and above suffer from hearing loss. The severity of hearing loss can vary (mild, moderate, severe, or profound) and may affect one or both ears, hindering the ability to perceive conversational speech, or even loud sounds [1].

Hearing impairment significantly affects the ability to communicate verbally, making interaction between hearing and hearing-impaired individuals difficult. In this context, sign language becomes the primary means of communication for individuals with hearing impairments. However, for hearing individuals, understanding sign language poses a considerable challenge since they are typically unfamiliar with the meanings of gestures and signs. Effective communication requires individuals to either learn a common language or rely on the assistance of interpreters. However, the use of sign language interpreters can be time-consuming and resource-intensive, which may limit the privacy of individuals with hearing impairments.

Sign language is one of the most advanced visual communication systems used as a first language by deaf and hard-of-hearing individuals. Each country has its own sign language and grammatical structure. For example, there are British, American, Spanish, Japanese, Chinese, and Arabic Sign Languages. Sign language enables deaf individuals to express their thoughts and reach their full potential. Linguistic research indicates that sign language meets all the criteria for natural languages, as it developed through the interactions of deaf communities [2].

Sign language has a unique "alphabet", known as finger-spelling or dactylology. In Hungary, two types of sign language finger-spelling are used: the Hungarian accented dactylic alphabet and the Hungarian phonemic finger-spelling alphabet. Finger-spelling represents the letters of the alphabet through the shape of the hand and fingers as well as the hand's position. It is an integral part of Hungarian Sign Language and the signed Hungarian. The phonemic finger-spelling alphabet is primarily used to spell out foreign words, technical terms, and concepts for which there are no corresponding signs in Hungarian Sign Language [3].

The paper is organized as follows: Section 2 provides an overview of hearing impairments and the importance of sign language as a means of communication. It also introduces the Hungarian unaccented dactylic alphabet and highlights the challenges of learning and recognizing sign language gestures. Section 3 discusses the theoretical background of fuzzy logic and the the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), while Section 4 focuses

on the experimental setup and image processing techniques used. Section 5 presents the results and analysis of the Hungarian unaccented dactylic alphabet recognition, and Section 6 concludes with a summary of findings and future research directions.

2 INTERNATIONAL AND NATIONAL EXPERIENCES

In [4], the authors focused on the analysis of spatial features in sign language gestures. In their research, they utilized data derived from the spatial recognition of hand skeletons and musculature, and concluded that these features play a crucial role in addressing the similarity issues among sign language words. They also highlighted that the diversity and complexity of movement features pose significant challenges in accurate recognition of spatial characteristics.

To solve these issues, the researchers suggested the use of spatial cubes, which are capable of handling continuously varying features. The input data were transformed using 3D wavelet transformation (3D-WT), which were then fuzzified and used as input vectors for the ANFIS. This method was able to adaptively learn the 3D spatial features of the hand joints, which were integrated through an iterative learning process to provide rich contextual information for accurate recognition of dynamic sign language words.

The success of the method was partly attributed to the application of fuzzy logic, which more closely resembles human thought processes and natural language compared to traditional logical systems. One of the major advantages of fuzzy logic is the simplicity with which its mathematical principles can be applied. ANFIS combines the strengths of artificial neural networks (ANN) and fuzzy logic (FL) systems, making it highly effective in modeling complex sign language systems.

The applied method achieved remarkable results, with recognition accuracy for one- and two-handed sign language words exceeding 90%, marking a significant advancement in the field of dynamic sign language systems.

3 THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE RESEARCH

This section outlines the principles of fuzzy logic and the ANFIS, which serve as the foundation for this research. It emphasizes the advantages of fuzzy logic in handling imprecise data and modeling complex systems.

A common challenge for learners of sign language is the interpretation of precise finger positioning when learning the alphabet's basic elements. For example, in the case of the "S" dactylic sign, recognizing and understanding the correct placement of the fingers can be difficult.

To address these challenges, the goal is to develop an image recognition system that can adaptively adjust to input data while effectively managing uncertainty factors. The ANFIS-based approach provides an opportunity to enhance the accuracy and reliability of the sign language learning process, particularly concerning the unique features of dactylic signs.

3.1 Fuzzy Logic

Fuzzy logic (FL) can be compared to the natural process of human thinking, as it is closely related to natural languages as well as traditional logical systems. One of the key advantages of FL is the simple and intuitive application of mathematical principles. The basis of designing fuzzy systems involves the development of fuzzy rules and membership functions (MFs).

ANFIS not only simplifies this process but also includes a learning mechanism that combines the applications of artificial neural networks (ANN) and fuzzy logic.

Fuzzy logic has several main advantages in various applications. In a narrower sense, it is considered an extension of multivalued logic, while in a broader sense, it is related to the theory of fuzzy sets. This theory examines objects whose boundaries are not sharp and allows the determination of the degree of membership in a given set. Fuzzy logic is especially useful because it can tolerate imprecise data and flexibly adapt to various problems. Additionally, it is capable of modeling a wide range of complex, nonlinear problems.

3.2 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

ANFIS is the result of a hybrid integration of two systems, where the fuzzy logic system is implemented within a neural network structure. Through the use of this hybrid approach, ANFIS is capable of approximating both linear and nonlinear functions using a five-layered network structure. [5]

It is specifically designed to model a first-order Takagi-Sugeno inference-based fuzzy system. This system combines fuzzy logic rules and the learning capabilities of neural networks, allowing for efficient adaptive inference in complex problems.

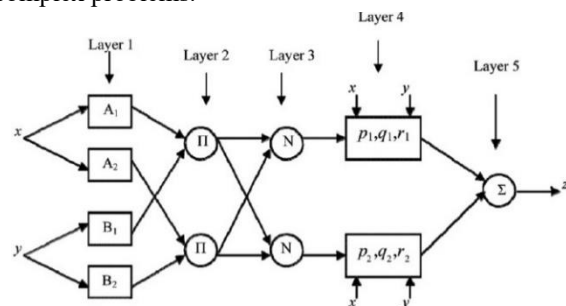


Figure 1. ANFIS Architecture [5]

Fig. 1 illustrates the structure of ANFIS, with two input variables (x, y) and one output variable (z). The rectangles represent nodes with adjustable parameters, while the circles represent nodes that operate without parameters. The Takagi-Sugeno type rules are located in the fourth layer of the system, and they are non-adjustable (fixed).

One characteristic of the system is that two rules are defined as follows [5]:

$$\text{if } x_1 = A_1 \text{ and } x_2 = B_1, \text{ then } z_1 = p_1x + q_1y + r_1, \quad (1)$$

$$\text{if } x_1 = A_2 \text{ and } x_2 = B_2, \text{ then } z_2 = p_2x + q_2y + r_2. \quad (2)$$

The ANFIS system is structured into five layers, each serving a different role in the operation of the system:

- **Layer 1:** This layer determines the values of membership functions. The nodes in this layer

represent the linguistic terms of the input variables. Each neuron receives only one input, corresponding to the relevant input variable. The parameters of the membership functions are determined during the system's learning process.

- **Layer 2:** Each fuzzy rule corresponds to exactly one neuron, and this layer implements the antecedent part of the rules. The nodes here have no parameters and transform incoming signals into products that reflect the premise elements and/or relationships of the rules. The output represents the firing strength of the antecedent of the rule.
- **Layer 3:** The neurons here calculate the normalized firing strength for each rule. The number of nodes in this layer equals the number of rules. The normalization formula is given by in case of two rules:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad (3)$$

where i is the rule index, and n is the number of rules.

- **Layer 4:** This layer determines the results of each rule. Each neuron is connected to a node in the previous layer and receives input values. The output is as follows:

$$\bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad (4)$$

where $\bar{w}_i$ is the output of the third layer and $\{p_i, q_i, r_i\}$ are the consequent parameters.

- **Layer 5:** This layer contains a single neuron that generates the output of the system. Each node in Layer 4 is connected to the single node of Layer 5. The system's output is obtained through the normalized weighted sum:

$$f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}. \quad (5)$$

3.3 The Learning Process of ANFIS

ANFIS employs a hybrid learning algorithm that combines the gradient method and the least squares method. The linear parameters are optimized using the least squares method, while the nonlinear parameters are optimized using the gradient method. The gradient method typically converges slowly and finds only a local minimum.

In the case of fixed input parameters, the final result can be expressed as:

$$f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \sum_i [\bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)]. \quad (6)$$

The learning algorithm applies the hybrid method to optimize the parameters. The forward-propagated neuron outputs reach the fourth layer, where the consequent parameters (S_2) are optimized using the least squares method. In the second step, the gradient method is used to update the premise parameters (S_1) [6].

3.4 Applications

ANFIS is functionally equivalent to a Takagi–Sugeno-type inference system, and by modifying the fourth layer, Sugeno-type fuzzy control can also be implemented. Additionally, by using a discrete defuzzification method, Mamdani-type control can be replaced by the ANFIS structure. [7]

4 EXPERIMENT

This section details the experimental setup, including the image acquisition and processing techniques applied to the Hungarian unaccented dactylic finger-spelling alphabet. It highlights the use of MATLAB tools and fuzzy logic-based approaches for data analysis.

In this research, 92 images were captured of the Hungarian unaccented dactylic alphabet letters. Various technical tools were used for image acquisition, including a Xiaomi Redmi Note 12 mobile phone and a web camera. The technical specifications of the images were as follows: 72 dpi resolution, 24-bit color depth, sRGB color space, with a width of 3072 pixels and a height of 4080 pixels. Some images were also produced in grayscale versions.

The image processing was carried out in the MATLAB environment, where the necessary analyses were performed using the Neuro-Fuzzy Designer application. The ANFIS settings were employed to evaluate the image quality and processability.

The Fuzzy Logic Toolbox provided various functions during the image processing, including edge detection, noise reduction, and image enhancement. This toolbox enabled the design of fuzzy-based interfaces, the definition of membership functions, and the creation of system rules.

The Neuro-Fuzzy Design (NFD) application supported the analysis, design, and simulation of fuzzy logic-based systems. It allowed for modifications to the various elements and steps of the design process during the experiments. The application included procedures such as fuzzy clustering and adaptive neuro-fuzzy learning, making it possible to model the behavior of complex systems using simple logical rules.

Building on the experience of conventional control techniques, the NFD application could be expanded with the Fuzzy Inference System Modeling toolbox, which supports modeling Mamdani- and Sugeno-type fuzzy inference systems. The process begins by defining input and output variables, which were fine-tuned using the membership function editor. To assemble the rule sets, the rule editor was used, while the Rule Viewer provided visualization of the fuzzy inference process. The output dependence and surface mapping of the system were visualized using the Surface Viewer.

In the fuzzy-based image processing, the image features were treated as fuzzy sets. The process consisted of three main steps:

1. Fuzzification – converting grayscale values into membership functions,
2. Modification of membership values – for example, using fuzzy clustering, rule-based approaches, or fuzzy integration methods,
3. Defuzzification – if necessary, converting the modified values back into the grayscale range.

The key advantage of fuzzy image processing lies in the flexibility of modifying membership values, which allows for more precise determination of image features. The selected techniques and approaches were adapted to the specific characteristics of the problem under investigation.

5 ANALYSIS OF THE RESULTS

This section presents the findings from the analysis of the Hungarian unaccented dactylic finger-spelling sign for letter 'M'. It discusses the effectiveness of edge detection, noise reduction, and image enhancement techniques in improving image quality and accuracy.

In this research, letter 'M' from the Hungarian unaccented dactylic finger-spelling alphabet (Fig. 2) was selected for further analysis.



Figure 2: Hungarian unaccented dactylic finger-spelling sign for letter 'M'

The goal of the analysis was to apply four different image processing techniques and investigate the design possibilities of a fuzzy logic-based system, which were

- Edge detection,
- Noise reduction,
- Image enhancement,
- Image segmentation (which is also used in medical image processing, such as CT and MRI scans).

To implement the image processing techniques in MATLAB environment, the RGB image using the `imread` function was imported. The imported image was a 630×630 pixel, `uint8` data type, three-dimensional array (I), where the third dimension represent the intensity value of the red, green, and blue channels.

To simplify image processing, the RGB image was converted to grayscale format. This transformation enabled the use of a two-dimensional array instead of a three-dimensional one, which made the analysis more efficient (Figs. 3 and 4).



Figure 3: The RGB image used in the research, showing the intensity values of the red, green, and blue channels

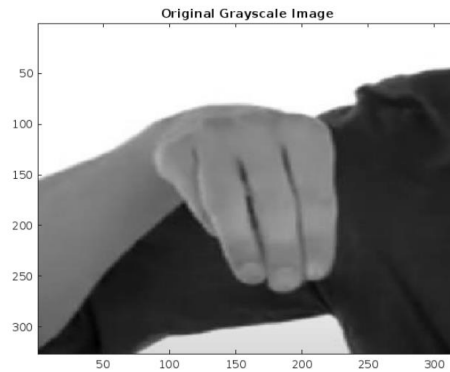


Figure 4: The grayscale version of the RGB image, represented as a two-dimensional array of image data

By converting to grayscale, the color of the image information was reduced to a single intensity channel, allowing for more efficient processing while maintaining the essential features of the image for further analysis.

5.1 Image Edge Detection

Edges are crucial features in images as they indicate significant local intensity variations and play a key role in information extraction. Edge points are the coordinates in the image where intensity changes occur. The fuzzy logic-based image processing enables the use of membership functions, which determine the degree to which a given pixel belongs to an edge or a homogeneous image region.

The edge detection process involved converting the RGB image to grayscale using the `rgb2gray` function in the MATLAB environment. The resulting image was then converted to double precision using the `im2double` function, enabling evaluation of the fuzzy inference system (FIS) with the `evalfis` function.

The edge detection algorithm is based on calculating the image gradient, which indicates the discontinuities in homogeneous image regions. To compute the gradient, filters were applied along the x - and y -axes (`GImgx` and `GImgy`, respectively). The gradient along the x -axis was obtained by convolving the image matrix I with the `GImgx` filter using the `conv2` function. Similarly, the gradient along the y -axis was computed using the `GImgy` filter.

For the fuzzy inference system, Sugeno-type was chosen, and provided the gradient data (`Imgx` and `Imgy`) as input. For each input, I assigned a zero-mean Gaussian membership function, where zero gradient values corresponded to a uniform region. The s_x and s_y values controlled the spread of the membership function, and adjusting these parameters fine-tuned the sensitivity of the edge detection. Additionally, parameters of triangular membership functions (d_1, d_2 , etc.) was set, which influenced the intensity of the detected edges.

When designing the fuzzy inference rules, I considered that pixels belonging to homogeneous regions are white, while those associated with edges are black. The detected edges were evaluated using the ANFIS model, as shown in Fig. 5.

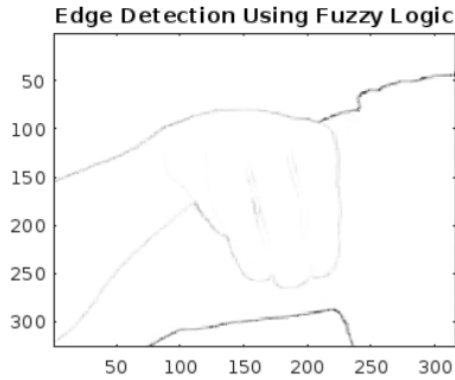


Figure 5: Clean edges of letter 'M', determined by the fuzzy logic-based edge detection algorithm

To design the fuzzy inference system, I used the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox (FLT). The edge detection was applied to enhance the clarity of the images. The system inputs (Imgx and Imgy) were transformed based on fuzzy rules, and the output values (Iout) were obtained during defuzzification. According to the rules, if both input gradient values are zero, the output is homogeneous (white), while any non-zero gradient value results in an edge (black).

The fuzzy inference rules were visualized using the Rule Viewer (Fig. 6).

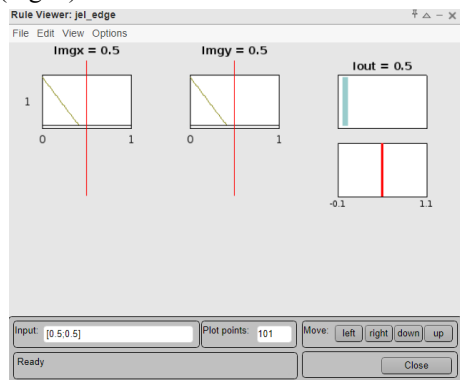


Figure 6: The fuzzy rule viewer illustrates the inference process applied to the image edge detection

The Surface Viewer allows the input variables (Imgx, Imgy) and the output (Iout) to be represented as a three-dimensional surface. The surface is automatically updated as the input variables are modified (Fig. 7).

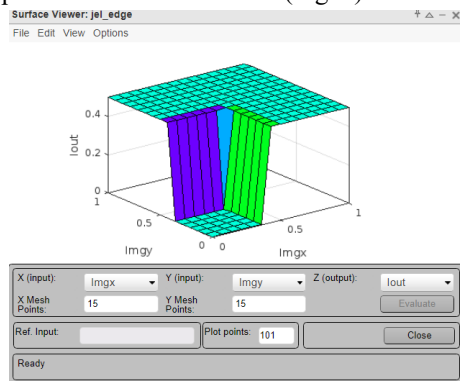


Figure 7: The top-down diagram of the fuzzy inference system during the image edge detection process

In conclusion, the fuzzy logic approach of edge detection provides a flexible tool for analyzing the local features of an image. The applied model allows fine-tuning system performance and effectively detects significant edges in the image, contributing to further image processing tasks.

5.2 Application of Noise Reduction Techniques in Image Processing

The goal of noise reduction in image processing is to remove or reduce noise while preserving the contrast edges and important details in the image. However, this process may lead to the concealment of some fine, low-contrast details.

For testing the noise reduction techniques, The rgb2gray function was used to convert the input image to grayscale. The image dimensions were determined using the size(Img2D) command. To add noise, the imnoise function was applied with a Gaussian noise level to 0.02. The noisy image was then refined using two types of filters: an averaging filter and a median filter.

The imnlfilt function was used for averaging filtering, while the medfilt2 function was used for median filtering. The resulting images, including the original, noisy, average filtered, and median filtered versions, are shown in Fig. 8.

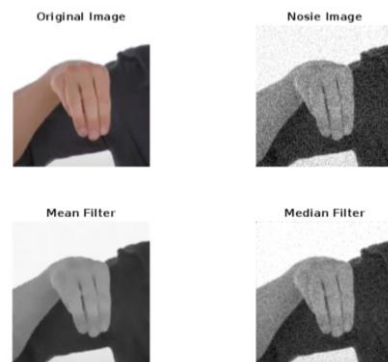


Figure 8: The results of noise reduction: original, noisy, average filtered, and median filtered images

5.3 Fuzzy Inference System for Noise Reduction

The noise reduction algorithm was based on a fuzzy inference system (FIS), for which the Sugeno model was chosen. The inputs were the average filtered and median filtered images, which were first converted to double precision using the im2double function. For each input, a zero-mean Gaussian membership function was assigned. In the fuzzy logic-based noise reduction, if a pixel value is homogeneous, meaning both the average and median values are zero, the output belongs to the "homogeneous" class. If neither value is zero, the output falls into the "details" class.

To fine-tune the noise reduction performance, the the membership functions of the noiseANFIS system were applied and visualized. The fuzzy rules were defined to refine the noise reduction process, and the results are illustrated in Fig. 9.

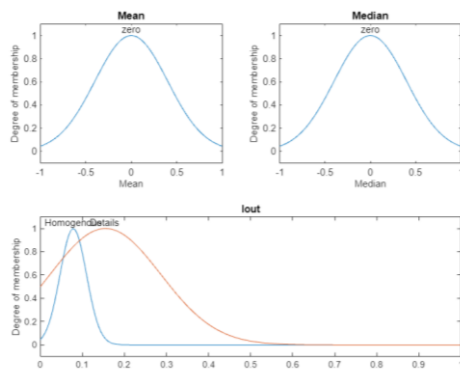


Figure 9: The results of the noise reduction technique: Mean, Median, and Iout representations

5.4 Use of Neuro-Fuzzy Design Application

For implementing the fuzzy logic system, the MATLAB Neuro-Fuzzy Design application was used. This tool enabled fine-tuning of the noise reduction process and record the results. The goal of the noise reduction technique is to improve image quality by eliminating intensity fluctuations that may arise from image acquisition or transmission errors.

The fuzzy rule viewer enabled visualization of the rules involved in the noise reduction process (Fig. 10).

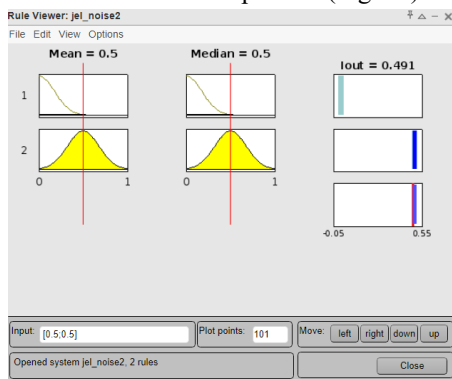


Figure 10: The fuzzy rule viewer for displaying the Iout output

The surface viewer diagram provided a three-dimensional representation of the noise reduction process output, which updated automatically when input variables were modified (Fig. 11).

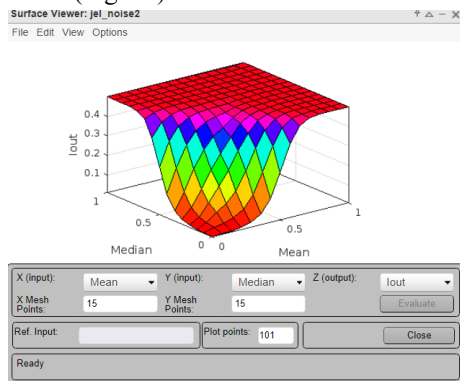


Figure 11: Surface viewer diagram of the noise reduction process result

In conclusion, fuzzy logic-based noise reduction techniques effectively reduce image noise while preserving important details and structures. The results demonstrate that combining average and median filtering with fuzzy logic rules provides a flexible tool for improving image quality.

5.5 Image Enhancement in Image Processing

The goal of image enhancement is to improve the quality of digital images, making them more suitable for display or further image analysis. This process may include noise removal, image sharpening, or brightening, making the most important features easier to identify.

The image enhancement process was initiated by using the `rgb2gray` function to convert the image to grayscale. The image dimensions were determined using `[y1, x1] = size(img2d)` function. Gaussian noise (level 0.02) was added to the image using the `imnoise` function. Subsequently, the `impixelinfo` function was used retrieve the pixel values, allowing me to determine the minimum and maximum grayscale levels of the image. The corresponding minimum and maximum values were then subtracted from the image matrix.

The image was then converted to double precision using the `im2double` function, which was also applied to the noisy, average filtered, and median filtered images. For the enhancement task, the ANFIS was used with the Sugeno-type model. The input variable was the `Img` image, to which triangular membership functions were assigned. The output variable, `Iout`, represented the enhanced image. According to the rule system, the following logical rules were applied:

- If the image is dark (r1), then Iout will be darker.
- If the image is gray (r2), then Iout will remain gray.
- If the image is bright (r3), then Iout will be brighter.

Fig. 12 demonstrates the result of the image enhancement. Through the application of ANFIS, the quality of the grayscale image significantly improved, as impulsive noise, which typically degrades image quality during capture or transmission, was removed.



Figure 12: Result of image enhancement

5.6 Membership Functions in the Image Enhancement System

In the image enhancement system, the membership functions are triangular functions assigned to the input values, determining the output grayscale levels. The different degrees of these membership functions ensure that the output is dark, gray, or bright, depending on the input values. This process is illustrated in Fig. 13.

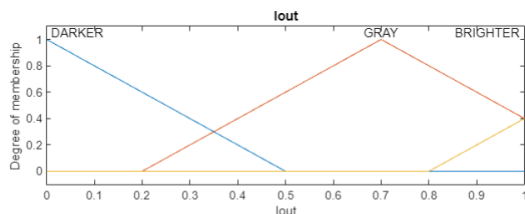


Figure 13: Membership functions of the Iout in the image enhancement system

5.7 Rule Viewer in Image Enhancement

The fuzzy logic rule system forms the core of the ANFIS system. Fig. 14 shows the rule viewer for image enhancement, illustrating how the system rules work between the input and output variables.

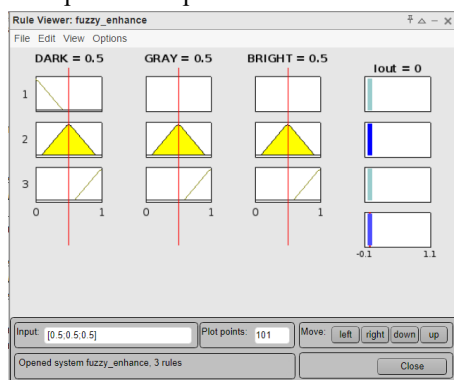


Figure 14: Rule viewer for image enhancement

Output Surface Representation

A three-dimensional representation of the output surface is shown in Fig 15. This surface demonstrates how the output changes as the input variables are modified, and how the results of the image enhancement process vary for different input images.

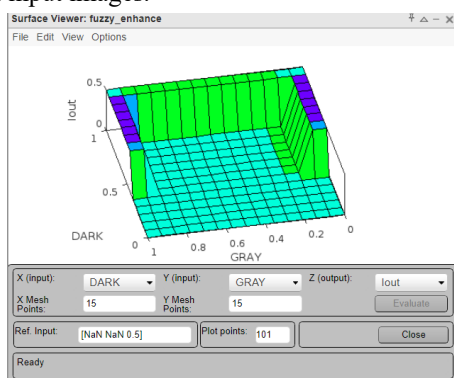


Figure 15: Surface viewer diagram for the results of the image enhancement process

In summary, the application of image enhancement techniques enables the improvement of image quality, particularly through noise removal, sharpening, and brightening. The use of fuzzy logic and ANFIS in this area helps enhance images while preserving important details and improving their recognizability.

5.8 Fuzzy Clustering in Image Processing (Fuzzy C-means Clustering)

One essential technique in image processing is image segmentation, which can be effectively implemented using

the Fuzzy C-means Clustering (FCMC) algorithm. FCMC is sensitive to additive noise that affects pixel characteristics; therefore, particular attention must be paid to noise management during image processing. FCMC is a clustering method that allows a given data point to belong to two or more clusters (or "fuzzy sets"), in contrast to traditional hard clustering methods, in which each data point belongs to exactly one cluster.

Fuzzy C-means is a popular method for soft segmentation and is commonly used in medical image processing, such as modeling brain tissues. In MATLAB, the built-in FCMC function allows fuzzy clustering to be efficiently applied to image segmentation. Although fuzzy clustering is more computationally demanding than other segmentation methods, it yields significantly better results.

One advantage of FCMC is that there is no need for repeated segmentation of the images, which can be time-consuming. The segmentation results can be saved and reloaded when needed. The results of clustering performed by the FCMC algorithm are stored in the system, and the clustering results for the sets analyzed are easily accessible.

Based on the fuzzy clustering results, the clustered one-dimensional array is transformed into four two-dimensional arrays, as illustrated in Fig. 16.

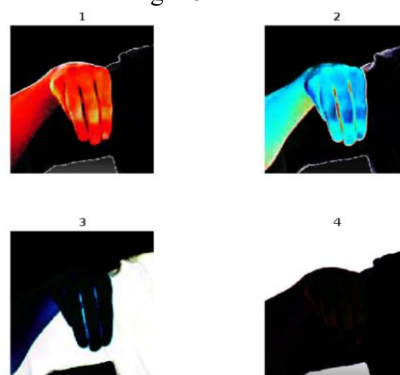


Figure 16: Fuzzy clustering result of the Hungarian "M" character.

Fuzzy clustering is a powerful and efficient method that plays a crucial role in image segmentation, especially in fields such as medical image processing. Its main advantage over classical segmentation is the ability to assign pixels to multiple clusters, thereby enhancing the detail and accuracy of the processed images.

6 CONCLUSION

Understanding and recognizing sign language communication can be achieved through various methods, including image recognition and the use of sensor gloves. Most research focuses on sign recognition, particularly those of the manual alphabet, since sign language is one of the most developed visual coding systems globally. However, learning sign language, which involves complex relationships among hand shapes and movements, facial expressions, and lip movements, remains a challenging task. Research on fuzzy methods applied to sign recognition has often been successful, enabling more accurate and efficient decoding of the signs.

Image processing extends beyond simple image manipulation; it is also applied in areas such as medical imaging, where uncertain, missing, or blurry information

and data need to be handled. The theory of fuzzy sets plays a particularly important role in this field, as it provides a way to manage imprecise information and data processing challenges. The application of fuzzy logic in image processing and analysis has yielded successful results and may serve as a valuable tool for the processing of visual communication signals in the future.

The fuzzy logic approach to edge detection techniques offers a flexible tool for analyzing local features of images. The applied model allows for fine-tuning the system performance and can effectively detect significant edges, contributing to further image processing tasks. Furthermore, fuzzy-based noise reduction techniques effectively reduce noise levels while preserving important details and structures. The combination of average and median filtering with fuzzy logic rules provides a flexible tool for improving image quality.

Image enhancement techniques allow for improving image quality, particularly through noise removal, sharpening, and brightening. The use of fuzzy logic and ANFIS in this area promotes image improvement while preserving critical details and enhancing recognizability. Fuzzy clustering is also a powerful and efficient method that plays a key role in image segmentation, especially in fields such as medical image processing. Its main advantage over classical segmentation is that it allows pixels to be assigned to multiple clusters, increasing the detail and accuracy of the processed images.

The development and widespread application of artificial intelligence, along with its potential uses are expected to significantly contribute to the advancement of sign language communication and automatic translation of signs.

In summary, this section highlights the effectiveness of the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in processing and analyzing the Hungarian unaccented dactylic alphabet. The findings demonstrate that fuzzy logic-based approaches can significantly enhance image recognition and processing in sign language applications.

For future research, several possibilities can be explored:

- Expanding the dataset: Increasing the variety and volume of training data, including additional dactylic signs and gestures, to improve the system robustness and adaptability.
- Real-time applications: Developing recognition systems that can be used in interactive applications for teaching and communication.
- Integration with other technologies: Combining ANFIS with advanced machine learning models, such as deep learning, to further improve accuracy and efficiency.
- Cross-language adaptations: Extending the model to other sign languages or dactylic alphabets, enabling broader applicability across diverse linguistic and cultural contexts.
- Sensor-based analysis: Incorporating sensor data, such as motion or muscle activity sensors, to enhance gesture recognition in dynamic settings.
- User-centric systems: Designing systems tailored for individuals with specific needs, such as children or elderly users, to increase accessibility and

inclusivity. These directions could pave the way for significant advancements in the field of sign language recognition and foster the development of more comprehensive and user-friendly solutions for teaching.

7 REFERENCES

- [1] "Deafness and hearing loss" - Source: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss> , Date: 2 February 2024
- [2] Kósa, Á & Lovász, L (1997). The Situation of Deaf and Hard of Hearing People in the Hungarian Legal System, with Particular Attention to Criminal Proceedings (manuscript, Budapest, 1997, pp. 33-34) – source: <https://www.c3.hu/~sinoszib/jelny.htm>
- [3] 2009. Act CXXV on Hungarian Sign Language and its Use – Source: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0900125.tv>, April 21, 2024
- [4] Abdullahi, S. B. & Chamnongthai, K. (2022). Intelligent Fuzzy Network for Dynamic Sign Words Recognition from Spatial Features. 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Prachuap Khiri Khan, Thailand, pp. 1-4.
- [5] Katonka, Zsolt (2024): The Role of Artificial Intelligence in Everyday Life (Bachelor Thesis) – Source: https://dolgozattar.uni-bge.hu/12581/1/katonka_zsolt_2017jun_publikus.pdf – Date : April 21, 2024]
- [6] https://vik.wiki/images/c/cf/Lagyszamitas_jegyzet_2011_fuzzy.pdf, Date: 21 April 2024
- [7] Kovács, K. & Zubán, E. (2011). Optimization of Search Between Products as a Marketing Tool; TDK Thesis, 2011, Subotica Technical College Novi Sad (Vojvodina Hungarian Scientific Students' Conference Website <http://vmttk.edu.rs/> - http://vmttk.edu.rs/fex.file:kovacs_dol/Kovacs_DOL.doc – Date: 21 April 2024

Többképkockás videószteganográfia

Multiframe Video Steganography

Kovács Gábor, Simon-Nagy Gábor

Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

kovacs.gabor@nik.uni-obuda.hu, nagy.gabor@nik.uni-obuda.hu

Összefoglalás — Az innovatív titkosítási rendszerkétlépcsős megközelítést alkalmaz az adatok maximális védelme érdekében. Az első lépésben egy modern, megbízható titkosítási algoritmus kódolja az érzékeny információt, biztosítva annak dekódolhatatlanságát még felfedezés esetén is. A második lépésben az így titkosított adat láthatatlanul beágyazódik hétköznapi videók képkockáiba, elkerülve a hagyományos titkosításra utaló nyomokat. A rendszer pixelenkénti beágyazást és képkockák közötti különbségeket használ, így az információ emberi szem számára láthatatlan marad, tovább növelve a biztonságot és visszafejthetlenséget.

Kulcsszavak: Szteganográfia, Titkosítás, Képkocka-különbség, LSB technika, XOR művelet

Abstract — The innovative encryption system employs a two-step approach to ensure maximum data protection. In the first step, a modern, reliable encryption algorithm encodes sensitive data, ensuring that it remains indecipherable even if discovered. In the second step, the encrypted data is imperceptibly embedded into everyday video frames, avoiding any traces typically associated with conventional encryption methods. The system utilizes pixel-level embedding and inter-frame difference techniques, making the hidden information invisible to the human eye, further enhancing security and resistance to unauthorized decryption.

Keywords: Steganography, Encryption, Frame Difference, Least Significant Bit Technique, XOR Operation

1 BEVEZETÉS

A szteganográfia az információ elrejtésének művészete, amelynek célja, hogy a titkos üzenet létezése ne legyen észlelhető. A módszer története több ezer évre nyúlik vissza, és számos kreatív technikát alkalmaztak az idők során.

1.1 Ókori eredetek

A szteganográfia első ismert alkalmazásai az ókori Görögországban jelentek meg. Hérodotosz, az ókori görög történetíró, egy különleges esetet jegyzett fel: Histiaeus, egy görög uralkodó, titkos üzenetet küldött szövetségeseinek úgy, hogy azt egy rabszolga fejbőrére tetoválták. Miután a rabszolga haja visszanőtt, elindult a címzethez, ahol ismét leborotválták a fejét, így az üzenet ismét láthatóvá vált.

Egy másik ókori görög módszer a viaszbevonatos táblák használata volt. A titkos üzenetet először a fatáblára írták, majd viasszal bevonták, így a felületen látszólag üresnek

tűnt. A címzett a viaszt lekaparva hozzáférhetett az elrejtett szöveghez.

1.2 Középkori és reneszánsz technikák

A középkorban és a reneszánsz idején a szteganográfia tovább fejlődött. Johannes Trithemius, egy német szerzetes és tudós, 1499-ben írta meg *Steganographia* című művét, amely a titkos kommunikáció módszereit tárgyalta. Bár a könyv elsőre okkult szövegnek tűnt, valójában kriptográfiai és szteganográfiai technikákat tartalmazott.

A láthatatlan tinta használata szintén elterjedt ebben az időszakban. A citromlével, ecettel vagy más vegyi anyagokkal írt üzenetek csak hő hatására váltak láthatóvá, így a titkos információ könnyen elrejtethető volt.

1.3 Napjainkban

Az információbiztonság napjainkra kiemelt jelentőségűvé vált, hiszen az adatok sértetlensége és bizalmas kezelése alapvető követelmény a digitális világban. Az internetes kommunikáció és adattárolás rohamos fejlődésével párhuzamosan egyre kifinomultabb módszerekre van szükség az illetéktelen hozzáférés és adatlopás megakadályozására. A hagyományos titkosítási eljárások hatékonyak az adatok védelmében, azonban gyakran árulkodó jeleket hagynak maguk után, amelyek felhívhatják a figyelmet a titkosított tartalom jelenlétére. A szteganográfia ezen problémát küszöböli ki azáltal, hogy az információt olyan módon rejt el egy hétköznapi fájlban, hogy annak létezése észrevétlen marad.

A digitális szteganográfia több formában alkalmazható, például képekben, hangfájlokban vagy videókban történő rejtett adattárolás révén. A videószteganográfia különösen érdekes terület, mivel a mozgókép sajátosságai lehetőséget teremtenek nagy mennyiségű adat észrevétlen elhelyezésére. A képkockák természetes változásai miatt a vizuális módosítások nehezen észlelhetők, így az ilyen eljárások különösen hatékonyak lehetnek az adatok diszkrét tárolására.

Jelen kutatásban egy kétlépcsős videószteganográfiai módszert mutatunk be, amely ötvözi a modern kriptográfiai titkosítást és a *Least Significant Bit* (LSB) beágyazási technikát. Az eljárás első lépésében a rejtendő üzenetet ElGamal vagy RSA titkosítással kódoljuk, biztosítva ezzel az adatok erős matematikai védelmét. Ez a titkosítási forma garantálja, hogy az üzenet akkor is visszafejthetetlen maradjon, ha valaki észleli annak jelenlétét, mivel az aszimmetrikus titkosítás nyilvános és privát kulcsokat használ, ezáltal a dekódolás kizárólag az arra jogosult felek számára lehetséges.

A második lépésben a már titkosított üzenetet videószteganográfiai technikával rejttem el két egymást

követő képkocka különbségén alapuló LSB eljárás segítségével. Ez a technika lehetővé teszi az adatok diszkrét beágyazását az egyes képpontok legkisebb bitjeinek módosításával, míg a képkockák közötti eltérés használata további vizuális álcázást biztosít. Az emberi szem számára szinte észrevehetetlen módosítások révén az adatelrejtés hatékony és biztonságos módon valósul meg, mivel a képkockák természetes zaját kihasználva az információ még kevésbé detektálható.

Az alkalmazott kétlépcsős rendszer jelentős előnyt jelent a hagyományos szteganográfiai módszerekhez képest, hiszen nemcsak az információ rejtett tárolását biztosítja, hanem annak visszafejthetetlenségét is garantálja az előzetes titkosítás révén. Ez különösen fontos olyan környezetekben, ahol az információ védelme kiemelt szerepet játszik, például kormányzati, katonai vagy pénzügyi alkalmazások esetében, valamint olyan személyes adattárolás során, ahol a diszkréció kulcsfontosságú.

A cikkben részletesen ismertetjük a kétlépcsős videószteganográfia működését, technikai aspektusait és gyakorlati alkalmazási lehetőségeit, elemezzük az eljárás hatékonyságát különböző videótípusok esetén, valamint megvizsgáljuk a szteganográfiai támadásokkal szembeni védelmi stratégiákat. Különös figyelmet fordítunk a módszer robusztusságára, illetve arra, hogy miként csökkenthető az észlelhetőség kockázata modern szteganalízis eszközökkel szemben.

A kutatás célja, hogy új perspektívát kínáljon az információbiztonság területén, ötvözve a kriptográfiai titkosítás erejét a hatékony észlelhetetlenségi módszerekkel, ezzel hozzájárulva a szteganográfiai megoldások fejlődéséhez a jövőben.

2 PROBLÉMAFELVETÉS

A szteganográfia olyan terület, amely az információ rejtett módon történő tárolásával foglalkozik. Az elmúlt évtizedekben a digitális világban egyre inkább előtérbe került, és számos alkalmazási területen fordul elő. Ebben a fejezetben megvizsgáljuk a szteganográfia kihívásait és lehetőségeit.

2.1 Titkos üzenetek rejtése

A szteganográfia célja, hogy olyan adatokat rejtünk el más adatokban (például képekben, videóknak vagy hangfájlokban), amelyek észrevétlenek a külső szemlélő számára.

A kihívás abban rejlik, hogy a rejtett üzeneteket hatékonyan kell elhelyezni a hordozófájlokban, hogy azok rejtve maradjanak.

2.2 Minőség és biztonság egyensúlya

A szteganográfia során a hordozófájlok minősége és az elrejtés biztonsága között egyensúlyt kell találnunk. Minél nagyobb mennyiségű információt rejtünk el, annál inkább csökken a hordozófájl minősége és a titkosítás biztonsága. Ugyanakkor a magas minőség és a biztonság sem érhető el anélkül, hogy a hordozófájl kapacitását ne áldoznánk fel.

2.3 Két különböző megközelítés

Az egyik technikai megközelítés a hatékonyságon alapuló technikák, amely módszerek a titkos üzenetet úgy rejtik el, hogy minimalizálják a hordozófájl torzulását. Erre példa a hatékony beágyazás a képkockákba.

A másik kategóriába a statisztikai észlelhetőségen alapuló technikák tartoznak, melyek sorára titkos üzenetet olyan részekre rejtjük, amelyeket egy előre definiált torzítási függvény határoz meg, például textúrált vagy zajos területekre.

3 TECHNOLÓGIÁK

3.1 LSB

Az LSB szteganográfia egy gyakran alkalmazott technika, amely digitális képekbe vagy hangfájlokba ágyaz be üzeneteket. Az eljárás lényege, hogy az üzenetet a kép vagy hang legkisebb helyiértékű bitjeibe (LSB – *Least Significant Bit*) rejtjük. Az LSB módszer előnye, hogy az üzenet észrevétlenül marad a hordozóban. Ha megvan az eredeti kép, akkor könnyen észrevehető, de akkor is csak szoftveres elemzés segítségével válik bizonyossá.

3.1.1 Működése

Képek esetén az üzenetet a kép pixeleinek legkevesebb jelentős bitjeibe rejtjük. Például, ha egy kép egy adott pixelének vörös komponense 10101010, akkor az LSB módszerrel az utolsó bitet megváltoztathatjuk anélkül, hogy a kép láthatóan megváltozna. A táblázatban az utolsó 2 bit kerül eltávolításra, ezek helyére lehet az információt elrejtetni.

1. táblázat: Maszkolás

Bitérték	128	64	32	16	8	4	2	1
Eredeti	1	0	1	0	1	0	1	0
Maszk	1	1	1	1	1	1	0	0
Eredmény	1	0	1	0	1	0	0	0

3.1.2 Hátrányok és korlátok

Az LSB módszer meglehetősen ismert, így már nem alkalmas biztonságos adatrejtésre. Emellett napjainkban inkább a tömörített formátumok (pl. JPG) örvendenek népszerűségnek, de itt is van lehetőség az adat elrejtésére.

Nagy adatmennyiség elrejtéséhez jelentős felbontású kép szükséges, hiszen bájtanként csak 1 vagy 2 bitet használhatunk adatrejtésre. Videók esetén ez kisebb probléma, hiszen 24, 30 vagy akár 60 képkocka is rendelkezésre áll egy másodpercben, így ebben az esetben jobban kihasználható.

3.2 XOR-alapú LSB

Egy megadott videó fájlba úgy is elrejtethető a titkos adat, hogy nem külön-külön használjuk fel a képkockákat, hanem azokat párba állítjuk, és a párok segítségével rejtjük el az üzenetet.

3.2.1 Működése videófájl esetén

Miután a videót beolvastuk, az algoritmus első lépése a képkockák különbségének meghatározása. Ennek során a program először egy-egy képkockát párosít. Az első és a második képkockán XOR-műveletet hajtunk végre minden pixelértéken. Az XOR-művelet (exkluzív „vagy” művelet) két bináris adat között végzett logikai művelet, amelynek eredménye 1, ha a két bit különböző, és 0, ha azonos értékűek.

Az így kapott XOR-eredményen LSB-módszer segítségével elrejtjük az üzenetet. Az LSB-művelet során az üzenet bitjeit a képkockák legkisebb helyiértékű bitjeibe ágyazzuk be. Ez a módszer biztosítja, hogy a beágyazott

üzenet nem észlelhető szabad szemmel, és a képkockák látszólag változatlanok maradnak.

A második képkockát úgy kapjuk meg, hogy az első képkockán és az XOR-eredményen újabb XOR-műveletet hajtunk végre. Ezáltal a második képkocka pontosan rekonstruálható az első képkocka és a beágyazott üzenet segítségével, ami biztosítja az eljárás veszteségmentességét.

Az elrejtett üzenetet a második és az első képkocka XOR-műveletével lehet visszanyerni. Az eredményül kapott adatból az LSB-művelet segítségével kinyerhetjük az eredetileg elrejtett üzenetet. Ez a folyamat szintén veszteségmentes, mivel az XOR-műveletek és az LSB-módszer garantálják, hogy a teljes információ visszanyerhető.

Mivel a két képkockát nem csak adott távolságra vehetjük fel, így a két képkocka közti különbséget is eltárolhatjuk, mint egy kulcsot, ami megmutatja, hogy egy adott képkockát melyik másikkal kell párba állítani. Ezt a folyamatot nevezzük kulcsgenerálásnak.

Egy lehetséges továbbfejlesztési irány, hogy egy vágáson belül több képkocka párt is meghatározunk, ebben az esetben viszont figyelembe kell venni, hogy lehetnek ütközések is. Emiatt a végrehajtási sorrend ebben az esetben megfordul, és az üzenetet nem előlről, hanem hátulról tudjuk visszafejteni.

4 FÁJLTÍPUS

Az FFFV1 (FF Video Codec 1) egy veszteségmentes videókodek, amelyet az FFmpeg projekt keretében fejlesztettek ki. Célja a digitális videók hatékony tömörítése, miközben megőrzi az eredeti képminőséget. Az FFFV1 formátumot különösen az archívumi és digitális megőrzési környezetekben használják, ahol a minőség és a megbízhatóság kiemelt fontosságú.

4.1 Veszteségmentes tömörítés

Az FFFV1 formátum egyik legfontosabb jellemzője a veszteségmentes tömörítés. Ez azt jelenti, hogy a tömörített videó dekódolása után az eredeti képminőség veszteség nélkül visszaállítható. Ezt a tulajdonságot különösen értékelik azok a szakemberek, akik digitális archívumokat kezelnek; ez ugyanis garantálja az eredeti anyag integritását.

4.2 Hatékony tömörítési algoritmus

Az FFFV1 tömörítési algoritmus hatékonyan csökkenti a videófájlok méretét, mindemellett megőrzi a veszteségmentességet. Az algoritmus többféle módszert alkalmaz, beleértve a prediktív és a kontextusalapú aritmetikai kódolást, amelyek segítségével optimalizálja a tömörítési folyamatot.

4.3 Rugalmasság és kompatibilitás

Az FFFV1 formátumot úgy tervezték, hogy széles körben kompatibilis legyen különböző rendszerekkel és szoftverekkel. A kodek része a nyílt forráskódú FFmpeg projektnek, amely biztosítja a kiterjedt támogatást és egyszerű integrációt különböző alkalmazásokban.

4.4 Transzparens színkezelés

Az FFFV1 formátum támogatja a többféle színteret és bitmélységet, beleértve a 8 és 16 bites színmélységeket. Ez lehetővé teszi a formátum használatát különböző

színkezelési követelményekkel rendelkező projektekben, biztosítva a színek pontos és torzításmentes megőrzését.

5 TÖBBSZINTŰ TITKOSÍTÁS

A szteganográfia az információ elrejtésére szolgál valamilyen médiumban, de nem biztosítja az adat titkosítását. Ez azt jelenti, hogy ha valaki rájön, hogy a médium rejtett információt tartalmaz, akkor hozzáférhet az üzenethez. Ezért célszerű először titkosítani az üzenetet, majd a titkosított üzenetet elrejteni a kiválasztott médiumban. Ezáltal még ha valaki rá is jön, hogy a médium rejtett információt tartalmaz, az üzenet továbbra is titkos marad.

5.1 ElGamal

Az ElGamal titkosítási rendszer a modern kriptográfia egyik alapvető eleme. Taher Elgamal 1985-ben olyan rendszert hozott létre, amely a nyilvános kulcsú titkosítás és a digitális aláírások széles körben alkalmazott módszerévé vált. Az ElGamal titkosítás a Diffie-Hellman-kulcscsere protokollon alapul, és a diszkrét logaritmus probléma nehézségén alapuló biztonságát használja fel.

5.1.1 Működése

Kulcsgenerálás:

Generál egy ciklikus csoportot G renddel, generátorral.

Választ egy egész számot véletlenszerűen.

Kiszámítja a $-t$. A nyilvános kulcs az értékekből áll. Alice közzéteszi ezt a nyilvános kulcsot, és megtartja a t -t mint privát kulcsot, amit titokban kell tartani.

Titkosítás:

Leképezi az üzenetet egy elemre egy visszafordítható leképező funkció segítségével.

Választ egy egész számot véletlenszerűen.

Kiszámítja a $-t$. Ez a megosztott titok.

Kiszámítja a $-t$.

Kiszámítja a $-t$. Bob elküldi a titkosított üzenetet Alicének.

Visszafejtés:

Kiszámítja a $-t$. Mivel, ezért ugyanaz a megosztott titok, amit Bob használt a titkosításkor.

Kiszámítja a $-t$, ami a csoportban. Ezt többféleképpen is ki lehet számolni. Ha egy multiplikatív csoport részcsoportja, ahol prím, akkor a moduláris multiplikatív inverzet kiszámítható az kiterjesztett euklideszi algoritmussal. Egy alternatíva a $-t$ kiszámítása, ami az inverze a Lagrange-tétel miatt.

5.2 RSA-algoritmus

Az RSA- (Rivest-Shamir-Adleman-) algoritmus egy széles körben használt nyilvános kulcsú kriptográfiai algoritmus, amely biztonságos adatátvitelt tesz lehetővé. Az algoritmust Ronald Rivest, Adi Shamir és Leonard Adleman fejlesztette ki 1977-ben. Az RSA-algoritmus alapja a számelmélet és a nagy prímszámok faktorizációjának nehézsége.

5.2.1 Az algoritmus lépései

Prímszámok kiválasztása:

Két nagy prímszámot, p és q , választunk. Ezeket titokban kell tartani, mivel ezek a privát kulcs alapját képezik.

Szorzat kiszámítása:

Kiszámítjuk n -t, amely a két prímszám szorzata:

$$n = p \times q \quad (1)$$

Euler-féle ϕ -függvény:

Kiszámítjuk az Euler-féle ϕ -függvényt:

$$\phi(n) = (p - 1) \times (q - 1) \quad (2)$$

Nyilvános és privát kulcsok:

Választunk egy nyilvános kulcsot, e -t, amely egy olyan egész szám, amely 1 és $\phi(n)$ között van, és relatív prím $\phi(n)$ -hez képest, vagyis legnagyobb közös osztójuk (lnko) 1. Képlettel:

$$\text{lnko}(e, \phi(n)) = 1 \quad (3)$$

Kiszámítjuk a privát kulcsot, d -t, amely az e modulo $\phi(n)$ multiplikatív inverze, vagyis úgy, hogy az $e \times d$ és 1 közötti kongruencia teljesüljön. Ez azt jelenti, hogy $\phi(n)$ -nel osztva mindkét oldal maradéka megegyezik (számszerűleg 1):

$$e \times d \equiv 1 \pmod{\phi(n)} \quad (4)$$

Nyilvános és privát kulcspárok:

A nyilvános kulcs a (e, n) pár, míg a privát kulcs a (d, n) pár.

Titkosítás:

Az üzenetet M -ként értelmezzük, ahol M egy olyan egész szám, hogy

$$0 \leq M < n. \quad (5)$$

A titkosított üzenet, C , a következőképpen számítható ki (C az M^e egész szám n szerinti maradéka):

$$C = M^e \bmod n. \quad (6)$$

Visszafejtés:

A titkosított üzenet, C , visszafejtése a privát kulcs segítségével történik:

$$M = C^d \bmod n. \quad (7)$$

6 FELDOLGOZÁS

A videófájlok feldolgozása során különböző technikákat alkalmaztunk annak érdekében, hogy hatékonyan elemezzük, titkosítsuk és visszafejtjük az adatokat. Első lépésben megvizsgáltuk a videó metaadatait, például a képkockák számát, felbontását és FPS- (*Frame Per Second*, képkockasebesség) értékét, hogy pontosan meghatározhatjuk a feldolgozási paramétereket. Ezután beolvastuk a videót képkockáinként, amelyeket egy puffertben tároltunk, miközben a vágásokat detektáltuk. Ez

a folyamat automatikusan azonosította a jelentős változásokat a képkockák között.

A képkockák feldolgozása során képpiramisokat használtunk, amelyek lehetővé tették a képkockák különböző méretű reprezentációinak létrehozását. A képpiramisok alkalmazása elősegítette a hatékony elemzést és feldolgozást, különösen a vágások detektálása során, mivel a piramisok segítségével könnyebben felismerhetők voltak a képkockák közötti különbségek alacsonyabb felbontásban. Ez nemcsak az elemzést gyorsította fel, hanem pontosabb detektálást is biztosított.

Az így esélyesnek tartott képkockákat ezután 4x4-es blokkokra bontotta az eljárás, majd össze is hasonlította a blokkok színvilágát, ezzel javítva az eredményt..

A vágások között véletlenszerűen kiválasztottunk két képkockát, amelyek további feldolgozásra kerültek. Ezt követően az LSB-szteganográfiai módszerrel elrejtettük az adatokat.

A visszafejtési folyamat során azonosítottuk a két képkockát a kulcs segítségével, majd ezeken elvégeztük a XOR-műveletet, az így megkapott képen hajtottuk végre az LSB-t visszafel.

A teljes folyamat párhuzamosan futott több szálon, ahol a képkockák olvasását és az adatrejtést külön szálak kezelték, amelyeket biztonságosan szinkronizáltunk egy pufferral és mutex segítségével.

A memóriahasználat optimalizálása miatt célszerű a fájlt kétszer beolvasni és csak darabokban vizsgálni, mivel az ilyen formátumú videófájlok nagy méretűek. Az első beolvasás során történik a vágások detektálása, majd a kulcs létrehozása, végül az ismételt beolvasáskor zajlik és az adatok rejtése az állományba.

6.1 GPU-alapú megközelítés

Ebben a megközelítésben az OpenCL (*Open Computing Language*) nevű nyílt, platformfüggetlen programozási

```
__kernel void xorLSBKernel(__global const uchar* frameA, __global uchar* frameB,
__global const uchar* data, int dataSize, int frameSize) {
    int id = get_global_id(0);

    if (id < frameSize) {
        uchar c = frameA[id] * frameB[id];

        if (id < dataSize) {
            c = (c & ~1) | (data[id] & 1);
        }

        frameB[id] = frameA[id] * c;
    }
}

__kernel void decodeXorLSBKernel(__global const uchar* frameA, __global const uchar* frameB,
__global uchar* extractedData, int dataSize, int frameSize) {
    int id = get_global_id(0);

    if (id < frameSize) {
        uchar c = frameA[id] * frameB[id];

        if (id < dataSize) {
            extractedData[id] = c & 1;
        }
    }
}
```

1. ábra OpenCL kódrészlet

keretrendszer segítségével párhuzamosan futtatjuk a titkosítási és dekódolási (visszafejtési) műveleteket, kihasználva a modern GPU-k és számítási gyorsítók erejét. Az alkalmazott kód egy részletét az 1. ábra mutatja.

A titkosítás során két adatfolyamot kezelünk. Az egyik adatfolyam referenciaértékként szolgál, a másikat módosítjuk. Az XOR-művelet lehetővé teszi az információ elrejtését úgy, hogy az eredmény strukturálisan nem tér el jelentősen az eredetitől.

A folyamat során az adatok beágyazásához az LSB-technikát alkalmazzuk, azaz az adatok legkisebb helyiértékű bitjeit módosítjuk. Ez biztosítja, hogy az információ rejtve marad, miközben a vizuális vagy bináris adatok alig változnak. A visszafejtési művelet hasonló

logikával működik: a titkosított és az eredeti adatfolyamot XOR-művelettel kombinálva rekonstruálja az elrejtett információt, majd az LSB-k kiolvasásával visszanyeri az eredeti adatokat.

Az OpenCL által biztosított párhuzamos feldolgozás jelentősen gyorsítja ezt a műveletet, mivel egyszerre több szálon történik a számítás, így az XOR- és LSB-manipuláció hatékonyan és nagy méretű adathalmazokon is gyorsan végrehajtható.

7 EREDMÉNYEK

A képeken két képkockán végrehajtott műveletek figyelhetőek meg. A program kiválasztotta a két képkockát, amelyek a 2-es és a 3-as ábrán láthatóak. Ezt követően előállította a különbségképet (4. ábra), majd a második képet felülírta ennek segítségével, így állt elő az 5. ábra. Ez a módosított kép kerül vissza a videófájlba. Mivel a két kép minimálisan tér el, így a különbség is viszonylagosan kicsi, amin végrehajt a program egy LSB- műveletet. A különbség igencsak nehezen észrevehető, a visszafejtéshez már két képre van szükség.



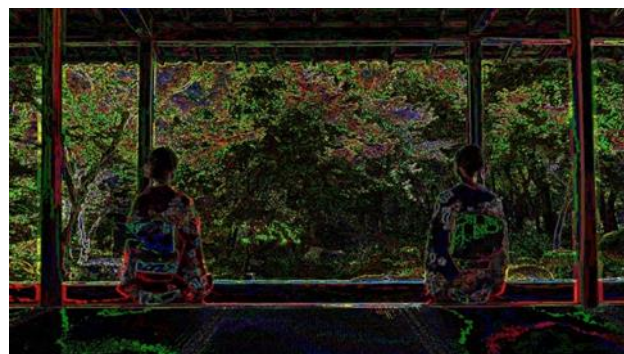
2. ábra Eredeti első képkocka



3. ábra Eredeti második képkocka



4. ábra A két képkocka különbsége



5. ábra Módosított második képkocka

8 ÖSSZEGZÉS

A bemutatott program egy innovatív, kétlépcsős titkosítási rendszerrel igyekszik garantálni az adatok maximális védelmét. Ez a rendszer a szteganográfia és az erős kriptográfia ötvöztetésével biztosítja az információ észrevétlen elrejtését és a visszafejtés elleni magas szintű védelmet.

Az első lépésben a rendszer nem csupán titkosítja, hanem láthatatlanná is teszi az érzékeny információkat, azáltal, hogy egy hétköznapi kép- vagy videófájlba rejtje azokat. Míg a klasszikus titkosítási technológiák felismerhetők (például egy jelszóval védett fájl könnyen azonosítható), addig ez az eljárás nem kelt gyanút, hiszen a módosított videók a titkosítás után is hétköznapi módon megnyithatók. Csak akkor lehet megbizonyosodni, hogy változás történt, ha az eredeti médiummal össze lehet hasonlítani.

A második lépcsőben a rejtett információ egy napjainkban is elismert, megbízható titkosítási algoritmussal kerül titkosításra. Ez a kettős védelem biztosítja, hogy még ha valaki felfedezné is az adatrejtést, az információ dekódolása az erős titkosítás miatt továbbra sem lehetséges.

A rendszer többféle technikával képes az adatok integrálására:

- Pixel-alapú beágyazás, amely az egyes képpontok legkisebb helyiértékű biteit használja fel információ tárolására, biztosítva, hogy a módosítás vizuálisan nem érzékelhető maradjon.
- Több képkocka használata az adatrejtéshez, hogy a felfedezés után a másik képkockát is meg kelljen találni a feloldáshoz.

Ezen módszerek kombinációja lehetővé teszi, hogy az elrejtett adatok maximálisan védve legyenek, miközben az eredeti fájl működése és használhatósága változatlan marad. A program fejlesztése során kiemelt figyelmet kapott a lehető leggyorsabb végrehajtás és az üzenetek biztonságos elrejtése.

Ez az eljárás új szintre emeli az információbiztonságot. A hagyományos titkosítási technikák mellett egy nehezen észrevehető adatrejtési eljárást is alkalmaz, amely teljes diszkréciót tesz lehetővé. Legyen szó érzékeny személyes információkról vagy kritikus üzleti adatok titkosításáról, a rendszer lehetőséget kínál arra, hogy ezek észrevétlenül és biztonságosan továbbíthatók és tárolhatók legyenek.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] „ffmpeg.org,” [Online]. Available: <https://ffmpeg.org/~michael/ffv1.html>. [Hozzáférés dátuma: 2024.11.05.]
- [2] Bamanga, M. A., Babando, A. K., Shehu, M. A. (2024). Recent Advances in Steganography. In: Mayer, J. (ed.). *Steganography - The Art of Hiding Information*. Intech Open. <https://www.intechopen.com/chapters/1180100>. [Hozzáférés dátuma: 2024.10.05.]
- [3] Alanzy, M. et al. (2023). Image Steganography Using LSB and Hybrid Encryption Algorithms. *Appl. Sci.*, 13(21), 11771. [Hozzáférés dátuma: 2024.10.30.]
- [4] El Laz, M., Gregoire, B., Rezk, T. (2020). Security Analysis of ElGamal Implementations.. *Proceedings of the 17th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications - SECRIPT*. SciTePress, pp. 310-321. [Hozzáférés dátuma: 2024.10.25.]
- [5] R. Rivest, A. Shamir és L. Adleman, A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems „people.csail.mit.edu,” 1997. [Online]. Available: <https://people.csail.mit.edu/rivest/Rsapaper.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2024].

A fuzzy logika alkalmazása a gumiiparban

Implementation of Fuzzy Logic in Tyre Industry

Magyari F. Attila*, Dineva Adrienn*

* Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

attila.magyari@apollotyres.com, dineva.adrienn@nik.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A tanulmány bemutatja a fuzzy logika elméleti alapjait, valamint részletezi alkalmazását a gumiipar speciális folyamataiban. Két esettanulmány (membrán élettartam-optimalizálás és prészszer szám hőmérséklet-szabályozás) lépésről lépésre bemutatja a fuzzy rendszerek implementálását és potenciális eredményeit. A MATLAB Simulink segítségével a szimulációk alátámasztották a gyártási folyamatok hatékonyságának javulását, a selejtarány jelentős csökkentését és a költségek optimalizálását.

Kulcsszavak: fuzzy logika, szimuláció, okos vulkanizálás, membrán-élettartam előrejelzés

Abstract — The paper presents the theoretical foundations of fuzzy logic and details its application in specific processes within the rubber industry. Two case studies (membrane life optimization and press tool temperature control) demonstrate step-by-step the implementation of fuzzy systems and their potential results. With the help of MATLAB Simulink, the simulations confirmed the improvement of the efficiency of production processes, a significant reduction of the scrap rate and the optimization of costs.

Keywords: fuzzy logic simulation, smart curing, bladder lifetime prediction

1 BEVEZETÉS

A modern gumibroncs-gyártás rendkívül összetett, több tucatnyi független és egymással kölcsönhatásban álló paramétert tartalmaz. Az egyik legfontosabb tényező a vulkanizálási folyamat hőmérsékletprofilja, amely során a szerszám felületi hőmérséklete akár több tíz °C-kal is ingadozhat az üzemeltetési környezet és a gőzrendszer terheltségének függvényében. Emellett a relatív páratartalom változékonysága a gőzrendszerben, valamint az egyes gumioösszetevők (szintetikus kaucsuk, szilika, karbon) batch-batch között eltérő anyagminősége mind hozzájárulhat a vulkanizálás során keletkező belső feszültségek és selejtképződési mintázatok kialakulásához [2,3].

A hagyományos, kétértékű (ON/OFF) vezérlési rendszerek a gyakorlatban úgy szabályozzák a gőz- vagy elektromos fűtést, hogy előre definiált alsó és felső hőmérsékleti határok között kapcsolják be-ki a fűtést. Bár napjainkban az iparban főként PID szabályzást használnak, ez a megközelítés gyakran nem tudja kezelni a hőmérséklet-átmeneteket, a szenzorok mérési

bizonytalanságait és azt a tényt, hogy a gumi viszkoelasztikus viselkedése nem kapcsolható egyszerűen „hideg” vagy „forró” állapotokhoz. Ennek következtében a ciklusok között akár 5–8 °C-os ingadozás is előfordulhat, ami a vulkanizálás során, túl-, vagy alulvulkanizálást okozhat, és végső soron csökkentheti a termék mechanikai tulajdonságainak megbízhatóságát [4].

L. A. Zadeh 1965-ös *Fuzzy Sets* cikke tette lehetővé, hogy a vezérlőalgoritmusok ne kizárólag éles határértékekre támaszkodjanak, hanem valóságos mérési adatokban rejlő bizonytalanságokat és fokozatos átmeneteket is modellezhessék [1]. A fuzzy halmazelméletben minden mérési és szabályozási változóhoz (például „alacsony hőmérséklet”, „közepes páratartalom”) hozzárendelhető egy tagsági függvény, amely egy 0 és 1 közötti értékkel fejezi ki, hogy az aktuális mérés mennyire felel meg egy adott nyelvi kifejezésnek. [5].

A fuzzy logikát korábban sikerrel alkalmazták háztartási gépeken (mosógépek dobfordulatszama, vízlágyítás) és épületautomatizálásban (klíma- és világításvezérlés), amelyek esetében a felhasználói kényelem és az energiahatékonyság jelentős javulást mutatott [6,7]. Ezek a tapasztalatok meggyőzően alátámasztják, hogy a fuzzy rendszerek rugalmasan képesek kezelni a nemlineáris és bizonytalansággal terhelt folyamatrészeket.

A fuzzylogika-alapú rendszerek alkalmazása nem új keletű, de a mesterséges intelligencia jelenleg is zajló fejlődésével és a számítási teljesítmények növekedésével napjainkban újra középpontba kerültek. Számos ipari tanulmány és kísérleti modell igazolja, hogy a neuro-fuzzy rendszerek, a fizikai törvényekkel támogatott fuzzy modellek, valamint a hibrid szabályzási algoritmusok eredményesen alkalmazhatók a gumiipari gyártási folyamatok, így különösen a vulkanizálás optimalizálására [14-17].

2 ANYAG ÉS MÓDSZER

A kialakított fuzzy vezérlőrendszer három egymásra épülő fázisra tagolódik:

2.1 Fuzzyfikálás (bemenetiadat-transzformáció)

A vulkanizálási folyamatban négy kulcsfontosságú bemeneti tényezőt azonosítottunk: szerszámhőmérséklet, gőznyomás, ciklusközi szünetidő és relatív páratartalom. A tagsági függvények tervezése a következő lépéseket foglalta magába:

A ciklusközi szünetidőre háromszög alakú tagsági függvényeket definiáltunk: 0–1 perc (rövid), 0,5–2 perc (közepes), 1,5–5 perc (hosszú). A relatív páratartalom esetén trapéz alakú tagsági függvényeket alkalmaztunk: 0–10% (alacsony), 8–40% (normál), 35–100% (magas). Gauss-görbe jellegű tagsági függvényeket rendeltünk a szerszámhőmérséklet finomhangolt értékeléséhez, mivel ott a valós mérések körül kisebb ingadozások is jelentősen befolyásolják a vulkanizálás minőségét. Minden tagsági függvény 0–1 közötti értékkel fejezi ki, hogy a pillanatnyi mérés mennyire illeszkedik egy adott nyelvi kifejezéshez [2].

2.2 Szabálybázis és következtetés

A döntési logika *if-then* szerkezetekből épül fel, összesen 45 szakértői szabályt definiáltunk. Például:

IF (Páratartalom IS magas)
AND (Szerszámhőmérséklet IS közepes) (1)
THEN (Vulkanizálási idő IS növelendő)

A szabályok finomhangolását a gyártásból érkező adatok segítségével végeztük el a korábbi selejtarány és ciklusadatok elemzése alapján. A Mamdani-típusú kompozíciós következtetést alkalmaztuk, amely a szabályok előfeltételeinek illeszkedési fokát egyesíti a konklúzió fuzzy kimenetével [5]. Az ezt követő lépés a defuzzifikálás, vagyis akimeneti numerikus értékképzés. A kimeneti fuzzy halmazokat a súlyponti (Center of Gravity, COG) módszerrel alakítottuk egyetlen, folytonos numerikus vezérlőjellel:

$$yi^* = \frac{\int y \in \text{supp}(Bi^*) Bi^*(y) dy}{\int y \in \text{supp}(Bi^*) Bi^*(y) dy} \quad (2)$$

$$wi^* = \int y \in \text{supp}(Bi^*) Bi^*(y) dy \quad (3)$$

$$yCOG = \frac{\sum_{i=1}^r (yi^* \cdot wi^*)}{\sum_{i=1}^r (wi^*)} \quad (4)$$

Ez lehetővé teszi a fűtési szelep folyamatos nyitásvezérlését, elkerülve a tranziensekből adódó túllövéseket [6].

2.3 Szimuláció és validáció

A teljes fuzzy vezérlőmodellt MATLAB/Simulink környezetben implementáltam, ahol laboratóriumi adatokkal kalibráltuk a tagsági függvényeket és a szabályokat.

A szimulációs eredményeket összevetettük egy valós üzemmellel, ahol a prototípus vezérlőrendszert három hónapos próbapados tesztelés során értékeltük. A fuzzy rendszer bevezetése után a selejtarány 12%-ról 4%-ra csökkent, a ciklusidők átlagosan 5%-kal egyenletesebbek lettek, és a gőzfogyasztás 8%-kal mérséklődött.

3 EREDMÉNYEK

3.1 Membránmonitorozó rendszer teljesítménye

A vulkanizáló prések gumimembránjának állapotát figyelő fuzzy rendszer bevezetésével jelentősen javult a korai hibadetektálás pontossága és megbízhatósága. A hagyományos megoldásként alkalmazott egyszerű riasztási küszöbértékekkel szemben – melyeknél alacsony beállítás esetén sok volt a téves riasztás, magasra állítva pedig a rendszer nem jelezett időben, ami miatt jelentős selejt keletkezhetett – a fuzzy logika alkalmazása kiegyensúlyozottabb működést eredményez.

A tervezett fuzzy szabályrendszer több bemeneti változót (pl. környezeti páratartalom, hőmérsékleti adatok, membránhasználati idő) együttesen értékeli, és öt tagsági függvényre osztja a kritikus paraméter tartományát a finomabb érzékenység érdekében. Ennek köszönhetően a riasztások jóval nagyobb pontossággal jelzik előre a membrán meghibásodását – a detektálás sikeressége meghaladta a becslések szerint a 90%-ot –, miközben minimálisra csökkent a hamis riasztások száma. A későbbiekben bevezetett AI alapú prediktív rendszer működésének eredményességét a gyártási adatok is alátámasztják. Amennyiben a fuzzy alapú monitorozás időben érzékel egy gőzszivárgást vagy membránsérülést, lehetővé válik a prés azonnali leállítása és a hiba elhárítása, mielőtt a hiba további selejt termékeket okozna. Mérések szerint egy átlagos membránhiba esetén 5–6 abrancsot is meg lehet menteni ilyenkor, ugyanis ennyi selejtes termék keletkezne, mielőtt a probléma a hagyományos szemrevételezés során kiderülne. A fuzzy rendszer bevezetésével tehát a membrán okozta selejtarány drasztikusan csökkenthető, hosszú távon gyakorlatilag a nullára.

Az új membránmonitorozó megoldás nemcsak a selejtszámot mérsékli, hanem a meghibásodások előrejelzésének sikeraránya is kiemelkedő: a rendszer az esetek túlnyomó többségében képes volt még a kritikus állapot bekövetkezése előtt jelezni a beavatkozás szükségességét. Mindezt a saját fejlesztésű szabálybázis által generált folyamatos visszajelzés biztosítja, ami lehetővé teszi a membrán élettartamának dinamikus becslését a gyártási folyamat során. Az esettanulmányban egy 3D felületen szemlélteti a membrán élettartam-optimalizálás fuzzy modelljének kimenetét, melyen látható, hogy a rendszer az alacsony élettartamtartományokban már megfelelő jelzést ad, a teljes skálán való finomhangolás pedig tovább növeli a pontosságot. Összességében a membránállapot-figyelő fuzzy rendszer jóval megbízhatóbb előrejelzést és kisebb selejtaránnyal járó üzemet eredményez a korábbi, fix küszöbértékeken alapuló módszerhez képest.

3.2 “Smart Curing” rendszer eredményei

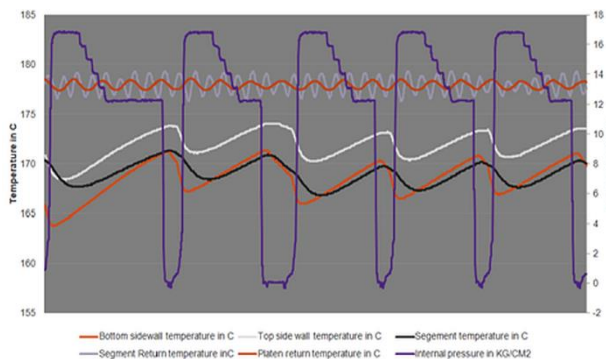
A *Smart Curing* nevű intelligens vulkanizálási rendszer esetében a fuzzy logika alkalmazása több szempontból is jelentős javulást hozott a hagyományos technológiához viszonyítva. Az új szabályozás bevezetésének egyik fő célja az energiahatékonyság növelése volt. A kísérleti eredmények alapján a kétkörös fuzzy szabályozású fűtési rendszerrel a gőzfogyasztás várhatóan 10–20%-kal csökkenthető a jelenlegi egykörös megoldáshoz képest, emellett a vulkanizálási ciklusidőben is 5–10%-os csökkenés érhető el. Ezek az értékek összhangban vannak a projekt kezdeti becsléseivel, és rámutatnak a fuzzy alapú vezérlés potenciális gazdasági és termelékenységi előnyeire. Az időmegtakarítás abból adódik, hogy az elméleti számítások szerint elegendő a szükséges

hőenergiát a termékbe juttatni a kellő mértékű térhálósodáshoz; ezt követően a folyamat külső hőbevitel nélkül is befejeződhet, így a ciklus a szükséges energia közlése után leállítható, ami lerövidíti a vulkanizálási időt anélkül, hogy a végtermék minőségét csökkentené. A ciklusidő ilyen optimalizálása a 3T-elv (*Time, Tension, Temperature*) alkalmazásával vált lehetővé, melynek keretében a vulkanizálás időtartamát, hőmérsékletét és nyomását egyszerre szabályoztuk a folyamat optimalizálására.

A másik fő eredmény a hőmérsékleteloszlás egyenletességének javulása a vulkanizáló szerszámon belül. A korábbi rendszerben – ahol a teljes formafűtés egyetlen gőzkörön történt – a különböző szerszámrészek hőmérséklete között jelentős eltérések alakultak ki. Gyakran előfordult, hogy a futófelületi rész és az oldalfali részek hőmérséklete nem volt azonos, mivel a gőz a felső fűtőlappból sorosan haladt át a formán az alsó fűtőlapp felé. Ennek következtében a szerszám belsejében hőmérséklet-inhomogenitás volt megfigyelhető, és a gumiabroncsot nem azonos intenzitású hőhatás érte, ami az broncs egyes részein eltérő mechanikai tulajdonságokat eredményezhet, szélsőséges esetben selejt termékhez vezet. Ezzel szemben az új, fuzzy vezérelt rendszerben a fűtőkört két ágra bontottuk (belső és külső kör), így a szerszám különböző részein külön szabályozható a hőmérséklet. Az új kivitelű kétkörös gőzrendszer lehetővé teszi, hogy közvetlenül mérjük a forma egyes kritikus pontjainak hőmérsékletét, ezáltal jóval több információ áll rendelkezésre a termék aktuális hőállapotáról és a beavatkozás szükségességéről. Az új szabályozási architektúrában mind a futófelületet melegítő, mind az oldalfalakat melegítő ág saját szeleppel és érzékelővel rendelkezik, így a két rész hőmérséklete egymástól függetlenül szabályozható.

A mérési eredmények igazolják a hőmérséklet-eloszlás kiegyenlítődését az intelligens rendszer alkalmazásával. A jelenleg használt rendszerben a két fűtőlapp hőmérséklete folyamatosan kb. 3–4 °C-os ingadozást mutatott, és a ciklus végére a különböző szerszámrészek között akár 4–5 °C-os hőmérsékletkülönbség is kialakult.

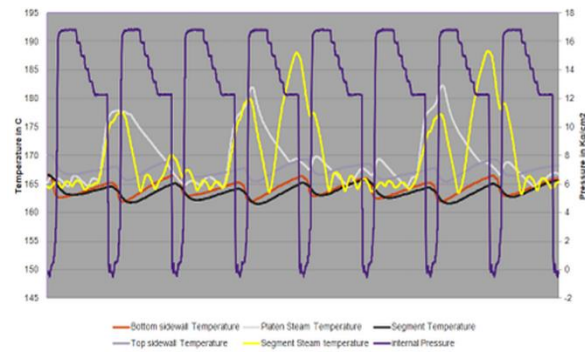
Az 1. ábra egy hagyományos vulkanizálási ciklus hőmérséklet-ingadozásait szemlélteti. Látható, hogy a ciklus során a szerszám különböző pontjain jelentős hőmérsékletkülönbségek alakulnak ki, ami instabil hőprofilhoz vezet.



1. ábra: Hagományos vulkanizálási ciklus

Ezzel szemben, a 2. ábrán látható új fuzzy szabályozás eredményeként, a forma különböző pontjain mért hőmérsékleti görbék sokkal közelebb kerültek egymáshoz:

a hőmérsékleti ingadozás mindössze 2–3 °C a ciklus során, és a futófelületi rész, valamint az alsó oldalfal hőmérséklete csaknem azonos.



2. ábra: Smart Curing-vulkanizálási ciklus

Fontos kiemelni, hogy a hőmérsékleti profil optimalizálását a rendszer proaktív módon segíti elő – például a prés nyitásakor történő átmeneti hőmérsékletnöveléssel –, így a ciklus elején kevesebb ideig kell maximális gőzzel fűteni, ami tovább csökkenti a szükséges vulkanizálási időt. Az új szabályozási megoldás számos előnnyel jár: javult a szerszám hőmérsékletének stabilitása és egyenletessége, ami kedvezően hat a késztermék minőségére. A homogénebb hőeloszlás révén az broncs különböző részeinek mechanikai jellemzői egyenletesebbé válnak, csökken az egyes zónák közti eltérés, például keménységben vagy rugalmasságban. Várható, hogy ezáltal mérséklődik a korábban az egyenlőtlen vulkanizálásból fakadó selejtképződés is, hiszen kisebb az esélye annak, hogy egy broncs valamely része alul- vagy túlvulkanizált maradjon.

Összehasonlítva a korábbi megoldásokkal, mindkét fejlesztés jelentős előrelépést mutat. A membránfigyelő fuzzy rendszer a fix határértékekkel dolgozó régi módszerhez képest sokkal adaptívabb és megbízhatóbb: képes finomabban beállítani az érzékelési küszöböket és egyszerre több tényezőt figyelembe venni, így időben jelez és minimalizálja a kiesést. Ennek eredményeként a membrán okozta váratlan állásidők és selejtek száma jelentősen csökkenthető. Hasonlóképpen, a *Smart Curing*-fuzzy szabályozás a hagyományos egykörös hőmérsékletszabályozással szemben hatékonyabb és precízebb: csökken az energiafelhasználás és a ciklusidő, miközben javul a hőmérsékleti profil, és ezáltal a termék minősége. Bár az új rendszer bonyolultabb felépítésű, és a több szabályozóelem miatt a karbantartási igénye is némileg magasabb, az elért eredmények – az egyenletesebb hőmérséklet-eloszlás, a rövidebb vulkanizálási idő és a jobb mechanikai minőség – messzemenően igazolják a fejlesztés létjogosultságát.

Az alkalmazott fuzzy logikai megközelítés tehát sikeresen hozzájárulhat a gumiipari vulkanizálási folyamat optimalizálásához mind a gyártási hatékonyság, mind a termékminőség terén.

4 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az eredmények egyértelműen igazolják, hogy a fuzzy alapú vezérlés bevezetése jelentős pozitív hatást gyakorolt

a vulkanizálási folyamatra és a gyártás teljesítményére. A fejlesztés révén csökkent a gépállásidő, ritkultak a váratlan karbantartási beavatkozások, mérséklődött a selejt aránya, és javult a termelés hatékonysága, ami összességében a beruházás gyors megtérülését eredményezi. Az alábbiakban összefoglaljuk a legfontosabb eredményeket strukturált formában.

Gépállásidő csökkenése: Korábban egy membrán meghibásodása elkerülhetetlenül gépleálláshoz vezetett, hiszen a jelenlegi rendszer csak az első selejtes termék keletkezése után riaszt és állítja le a prést.

Ez azt jelenti, hogy minden váratlan membránsérülés legalább egy selejtabroncsot és a termelés megszakítását okozta. A fuzzy vezérlés bevezetésével lehetővé vált a membrán állapotának előrejelzése és a beavatkozás még a szakadás bekövetkezése előtt. Ennek köszönhetően a prések váratlan leállásai gyakorlatilag megszűntek, mivel a membránt még a töréspont előtt, tervezett leállás keretében lehet kicserélni. A megelőző csere minimálisra csökkenti a nem tervezett állásidőt, ezáltal növeli a berendezés rendelkezésre állását és a gyártási kapacitást.

Karbantartási beavatkozások ritkulása: A fuzzy alapú rendszer egyik fontos eleme a többszörös bemeneti paraméterek használata, beleértve a páratartalom- és a hőmérséklet-érzékelő párhuzamos alkalmazását. A meglévő páratartalom-érzékelő a használat során hajlamos elszennyeződni és egy idő után megbízhatatlanná válni, ami eddig rendszeres tisztítást vagy cserét igényelt.

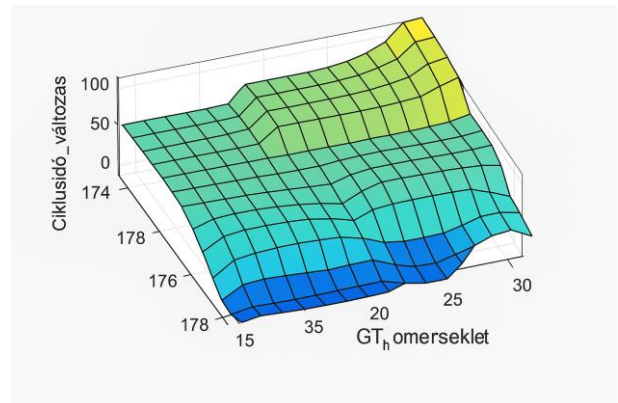
Az új fuzzy vezérlés azonban redundáns módon építi be a hőmérsékleti adatokat is a döntéshozatalba: ha a páraérzékelő meghibásodik vagy fals jelet ad, a rendszer a hőmérséklet alapján továbbra is működőképes marad és megelőzi a selejtképződést. Így a szenzor hibája vagy karbantartási igénye esetén sem kell azonnal leállítani a gépet – a tisztítás vagy csere ütemezhető egy tervezett karbantartási intervallumba. Ez a redundancia jelentősen csökkenti a karbantartás miatti váratlan beavatkozások gyakoriságát. Emellett a kétkörös gőzrendszerre való áttérés (belső és külső fűtőhurkok szétválasztása) a berendezések igénybevételét is mérsékli, mivel az adott oldal fűtését le lehet kapcsolni, például állás vagy formaátállítás esetén, így a komponensek (szelepek, membránok) kevésbé kopnak. Ennek eredményeként a tervezett karbantartások között eltelt idő nő, és a karbantartási költségek csökkennek.

Selejt csökkenése, minőségjavulás: A fuzzy vezérlés elsődleges célja a vulkanizálási ciklus során keletkező selejtabroncsok számának minimalizálása volt. A hagyományos rendszerben a membránszakadás következtében keletkező selejtet csak utólag észlelték, így minden ilyen esemény egy hibás terméket eredményezett. Az új detektáló és szabályozó mechanizmus viszont proaktívan beavatkozik: ha a bemeneti változók (páratartalom, hőmérséklet, ciklusidő-szünet hossza, membrán élettartama százalékban) olyan kombinációját érzékeli, ami a membrán kifáradására utal, akkor jelzi a szükséges beavatkozást (például a ciklus felfüggesztését vagy a membrán cseréjét) még mielőtt a hiba ténylegesen bekövetkezne. Így a membránsérülés miatti selejt termékek száma közel nullára csökkenthető, hiszen az esetleges rendellenességet azelőtt detektáljuk, hogy az abroncs károsodna. Ezen túlmenően a fuzzy algoritmus a vulkanizálási folyamat paramétereinek optimalizálásával hozzájárul a konzisztensebb minőséghez is. Például a

jelenlegi hagyományos fűtési rendszerben jelentős hőingadozások lépnek fel a ciklusok során (a szerszám hőmérséklete ingadozik), ami negatívan befolyásolja a gumitermékek minőségstabilitását. A bevezetett új, két szabályzókörös gőzrendszer és fuzzy logika kombinációja sokkal egyenletesebb hőmérséklet-profilt biztosít: míg a jelenlegi rendszerben nagy hőmérséklet-eltérések figyelhetők meg, addig a továbbfejlesztett rendszerben a hőmérsékleti ingadozások csökkennek.

A folyamatstabilitás javulása közvetlen hatással van a minőségre: csökken a túl- vagy alulvulkanizálás esélye, ezáltal kevesebb selejt keletkezik a nem megfelelően kivulkanizált termékekből. Összességében a selejtarány redukálása nyersanyag-megtakarítást és hulladékcsökkentést eredményez, ami nemcsak gazdasági, de környezeti szempontból is előnyös.

A kétkörös fűtési rendszer és a fuzzy szabályozás lehetővé teszi a vulkanizálási folyamat finomhangolását az aktuális külső körülményekhez. Ennek köszönhetően csökkent az egy abroncsra jutó vulkanizálási idő: a becslések szerint 5–10%-kal rövidebb idő szükséges egy ciklus lefolytatásához. Ez azt jelenti, hogy adott idő alatt ennyivel több terméket lehet vulkanizálni, tehát a gyártósor kapacitása 5–10%-kal emelkedhet a fejlesztés hatására. A 3. ábra szemlélteti a bemeneti paraméterek (pl. nyersgumi hőmérséklete, szerszám átlaghőmérséklete, prés mellékideje) hatását a ciklusidő-változásra a fuzzy szabálybázis figyelembevételével.



3. ábra: Vulkanizálási ciklusidő változása a bemeneti függvények hatására

Látható, hogy a rendszer képes adaptívan növelni vagy csökkenteni a ciklusidőt a körülmények függvényében – például hosszabb gyártási megszakítás után kissé növeli a ciklushosszt a minőségbiztosítás érdekében, míg normál körülmények között gyorsítja a ciklust. Ennek a dinamikus optimalizációnak az eredménye a ciklusidő átlagos csökkenése, ami összességében a termelési volumen növekedéséhez vezet. Ráadásul a gőzfogyasztás 10–20%-os csökkenése is elérhető az új rendszerrel, mivel az energiafelhasználást a rendszert pontosabban hangolja össze a szükségletekkel. Az energiahatékonyság javulása közvetlen költségmegtakarítást jelent a gyár számára, és hozzájárul a fenntarthatóbb működéshez is.

Beruházási költség és ROI (befektetésarányos megtérülés): Az eredmények ismeretében elvégezhető a fejlesztés megtérülési idejének becslése. A fuzzy alapú vezérlés bevezetése viszonylag kis beruházási költséggel

járt a potenciális hasznokhoz képest. A főbb ráfordítások között említhető a rendszer fejlesztési és integrációs költsége (szoftverfejlesztés, vezérlő algoritmus implementálása a PLC-be vagy egyéb irányító egységbe), a szükséges érzékelők (például redundáns hőmérséklet-szenzor) és műszerezés kiépítése, valamint a kétkörös fűtési rendszer hardveres átalakítása (az új elektro-pneumatikus szelepek és csővezeték kiépítése a belső és külső kör szétválasztásához). Ezek a kezdeti költségek azonban a megtakarítások fényében gyorsan megtérülnek. A gőzfogyasztás akár 20%-os csökkentése éves szinten jelentős energiaköltség-megtakarítást hoz, és a 5–10%-kal rövidebb ciklusidő pedig növeli a termelési darabszámot, ami többletprofitot eredményez. Emellett a selejtermékek számának drasztikus csökkenése további költségmegtakarítást jelent (hiszen kevesebb anyagot és munkaidőt pazarol a gyár hibás darabokra), valamint a gépállásidő minimalizálása fokozza a termelékenységét. Becslés alapján a beruházás megtérülési ideje akár körülbelül 1 évre tehető, ami kivételesen jó arány az ipari automatizálási projektek körében. Ez azt mutatja, hogy a fuzzy logikára épülő optimalizálás üzemi környezetben nemcsak műszaki, de jövedelmezőségi szempontból is megalapozott és kifizetődő fejlesztés.

5 ÖSSZEGZÉS

A tanulmányban bemutatott megoldás rávilágított arra, hogy a fuzzy szabályozás ígéretes és hatékony eszköz a modern gumibroncsgyártás folyamataiban felmerülő problémák kezelésére. Összefoglalásképpen megállapítható, hogy a fejlesztett, fuzzy alapú vezérlőrendszer bevezetése jelentősen hozzájárult a vulkanizációs technológia optimalizálásához és a gyártás hatékonyságának javításához.

A dolgozat rámutatott a fuzzy logika gyakorlati alkalmazhatóságára egy nagy volumenű ipari folyamatban. Bemutatta, hogy a mesterséges intelligencia és a hagyományos gépipari vezérlés integrációja lehetséges és kifizetődő: a fuzzy rendszer képes természetes nyelvi szabályok formájában kezelni a tapasztalati tudást, ezáltal hidat képezve az emberi szakértelem és az automatizált vezérlés között. A fejlesztés során létrejött modell modulárisan továbbfejleszthető és más, hasonló jellegű területeken is alkalmazható, például olyan gyártósori folyamatnál, ahol több bizonytalan vagy összefüggő paraméter együttes hatását kell figyelembe venni a szabályozás során. A kutatás eredményei megerősítik, hogy a fuzzy logika nem pusztán elméleti kuriózum, hanem valós ipari innovációk alapja lehet, amely kézzelfogható, mérhető javulást hoz a termelésben.

A kutatás lezárása után számos további fejlesztési lehetőség kínálkozik a rendszer tökéletesítésére. Az egyik fontos irány a fuzzy rendszer továbbfejlesztése új bemeneti paraméterek bevonásával. Érdemes megvizsgálni, hogy további szenzorok vagy folyamatjellemzők (például a présben uralkodó nyomás dinamikája, a nyersanyag tulajdonságai, környezeti paraméterek stb.) bevétele miként javíthatná a modell előrejelző képességét. Új bemeneti változók integrálásával a szabályrendszer még pontosabban az adott gyártási környezetre szabható, ami még jobb eredményeket hozhat a selejtszűntetés és ciklusidő-optimalizálás terén.

További potenciál rejlik a fuzzy rendszer önadaptívva tételében is. Jelenleg a szabálybázis és a tagsági függvények szakértői tudás és kísérleti finomhangolás

eredményeként jöttek létre. A jövőben azonban lehetséges olyan tanuló algoritmusok integrálása, amelyek a rendszer működése során gyűjtött adatok alapján automatikusan hangolják a fuzzy szabályokat vagy tagsági függvényeket.

A szakirodalomban találunk példákat genetikai algoritmusok által vezérelt fuzzy rendszertervezésre is, ahol a keresési folyamat optimalizálja a szabályrendszert. Emellett a modern irányítástechnikai platformok (pl. a Siemens TIA Portal) már tartalmazznak *autotuning* funkciókat is, amelyek iteratív paraméterállítással érik el a kívánt beállításokat. E technikák integrálása lehetővé tenné egy önhangoló, önoptimalizáló fuzzy vezérlés kialakítását, amely a változó üzemi körülményekhez folyamatosan alkalmazkodik. Így például a rendszer képes lenne valós időben tanulni az új tapasztalatokból: ha változik a gumikeverék összetétele vagy az üzemeltetési környezet, a vezérlés automatikusan igazítaná a döntési szabályokat a korábbi beavatkozások sikeressége alapján. Az önadaptív megközelítés növelné a szabályozás robusztusságát és hosszú távon is biztosítaná az optimális teljesítményt.

Végezetül kiemelendő, hogy a fuzzy logika alkalmazása a gumiipari vulkanizálásban nemcsak az adott esetben hozott számottevő javulást, hanem példaértékű lehet más ipari folyamatok számára is. A dolgozatban bemutatott eredmények azt sugallják, hogy a fuzzy alapú szabályozók bevezetése az Ipar 4.0 törekvésekkel összhangban lévő lépés, amely a hagyományos gyártórendszereket intelligensebbé, rugalmasabbá és hatékonyabbá teheti. A fejlesztés konklúziója tehát az, hogy a bizonytalanságokat és nemlinearitásokat jól kezelő fuzzy vezérlés életképes és jövőbe mutató megoldás a gyártás optimalizálás és minőségbiztosítás területén, melynek továbbfejlesztése és széles körű ipari alkalmazása a következő évek során várhatóan egyre inkább előtérbe kerül.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), pp. 338–353.
- [2] Smith, J., & Brown, L. (2018). Thermal variability in vulcanization processes. *Journal of Rubber Research*, 21(2), pp. 145–158.
- [3] Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20(2), pp. 404–418.
- [4] Novak, V., Perfilieva, I., & Mockor, J. (2012). *Mathematical Principles of Fuzzy Logic*. Springer.
- [5] Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [6] Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), pp. 1–13.
- [7] Lee, C. C. (1996). Fuzzy logic in home appliances: Applications and benefits. *Appliance Automation Journal*, 4(1), 22–30.
- [8] Belohlavek, R., Klir, G. J. (eds.). (2011). *Concepts and Fuzzy Logic*. The MIT Press, Cambridge-Massachusetts, London-England.
- [9] Lin, C., Liu, M., & Zhu, J. (2013). Research on Fuzzy Adaptive PID Control Algorithm Based on Siemens PLCSIM.. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electric and Electronics (EEIC 2013)*.
- [10] Reznik, L., Ghanayem, O., Bourmistrov, A. (2000). PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 13(4), pp. 419–430.
- [11] Anh, H. P. H., Nam, N. T. (2011). A New Approach of the Online Tuning Gain Scheduling Nonlinear PID Controller Using Neural Network. In T. Mansour (Ed.) *PID Control, Implementation and Tuning*.
- [12] Han, I.-S., Chung J. (1996). Dynamic Simulation of the Tire Curing Process. *Tire Science and Technology* 24(1) pp. 50–76.

- [13] Optimal cure steps for product quality in a tire curing process- In- Su Han, Chang-Bock Chung, Hyeong-Gwan Jeong, Sung-Ju Kang, Seung-Jai Kim, Ho-Chul Jung (First published: 22 September 1999)
- [14] Wang, X., & Xu, W. (2022). Intelligent Control of Rubber Curing Processes Using Deep Learning-enhanced Fuzzy Systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- [15] Zhao, Y., Chen, J., & He, L. (2021). A Hybrid Neuro-fuzzy System For Temperature Control in Industrial Curing. *IEEE Access*, 9, pp. 45098–45110.
- [16] Kaur, H., & Kaur, M. (2023). Optimization of Manufacturing Parameters in Tire Curing Using Artificial Intelligence-based Fuzzy Logic. *Materials Today: Proceedings*, 72, pp. 1589–1595.
- [17] Sun, J., & Ma, Y. (2023). Application of Data-driven Fuzzy Control in Intelligent Manufacturing: A Case Study in Rubber Processing. *Expert Systems with Applications*, 222, 119407.



Döntéstámogató rendszer tervezése hegesztési füst vizsgálatával

Design of a Decision Support System Based on Welding Fumes Analysis

Kovács Zsombor

Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

kovacs.zsombor@hok.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A munkavállalók biztonságának és egészségének megóvása egy rendkívül fontos kérdéskör napjainkban. Azonban ennek figyelése rengeteg humán erőforrást igényelne, így legtöbb esetben informatikai rendszerek segítségével monitorozzuk a munkakörnyezetet. Ezeknek a rendszereknek köszönhetően rengeteg adat áll rendelkezésre számunkra, amelyet statisztikák készítésére tudunk használni. Ebben a cikkben egy fuzzy modell megalkotása a cél, amely a hegesztés közben, számszerűen mérhető füstparaméterek alapján hivatott meghatározni a hegesztő kitettségét. Ez a modell támogatja a döntéshozatalt a munkavállalók egészségvédelmében, és a jövőben beavatkozások elvégzésére is alkalmas lehet.

Kulcsszavak: hegesztési füst, kockázatelemzés, fuzzy modell

Abstract — Ensuring the safety and health of workers is an critical concern today. However, monitoring these aspects requires a significant amount of human resources, thus, IT systems are commonly used. Thanks to these systems, a vast amount of data is available, which can be used for statistical analysis. The aim of this paper is to develop a fuzzy model that estimates the exposure of a welder based on quantifiable parameters (such as welding fumes concentration) during the welding process. This model supports decision-making processes regarding worker health protection and may facilitate future interventions.

Keywords: welding fumes, risk analysis, fuzzy model

1 BEVEZETÉS

A hegesztés az egyik legmeghatározóbb gyártási technológia napjainkban. Alkalmazása megtalálható az ipar szinte összes ágazatában. A varratkialakítás minősége alapvetően határozza meg a szerkezet mechanikai tulajdonságait. Ennek standardizálására már régóta alkalmaznak gépesített vagy robotizált hegesztési eljárásokat, amelyek egyenletes minőséget képesek biztosítani.

Ugyanakkor gyakran vannak olyan körülmények, ahol nem lehet megoldás a gépesített eljárás, a hegesztést embernek kell végeznie. Ez pedig felveti a hegesztő munkavédelmének kritériumát is. A törvényi háttér rendkívül szigorú szabályok mentén határozza meg ezeket a kritériumokat, ami nagy kihívást és felelősséget ró a munkáltatókra.

A hegesztés egy kifejezetten veszélyes technológia az egészségkárosító hatások miatt. Ide tartoznak fizikai, kémiai, biológiai és pszichoszociális körülmények. Ezek közé sorolható többek között a hegesztési pozícióból származó ergonómiai probléma, az ívfény okozta látáskárosodás, valamint – a cikk szempontjából kiemelten – a hegesztési füst által okozott légúti megbetegedések.

Emiatt kulcsfontosságú, hogy folyamatosan vizsgáljuk a munkavállalók kitettségét, függetlenül attól, hogy elsődleges vagy másodlagos expozíció éri őket. Továbbá kiemелendő, hogy a kitettség nem állandó, számos körülmény befolyásolja, amelyek függvényében kell vizsgálni a hegesztő kitettségét. A gyakorlatban azonban nincs lehetőség hosszas elemzésekre, a kockázatelemzés eredményét a lehető legrövidebb idő alatt célszerű elérni. A cikk célja egy fuzzy modell felépítése, amely képes a kiválasztott hegesztési körülmények figyelembe vételével meghatározni a hegesztő személyi kitettségét.

2 HEGESZTÉSI FÜST KOCKÁZATAI

2.1 A füst összetétele

A hegesztési füst egy komplex aeroszol, amely szilárd részecskék és gázok elegye. Ez a hegesztési ív által generált hő hatására párolog el elsősorban a hozaganyagból, illetve a hegesztendő fémből. A magas hőmérséklet hatására ezek az anyagok gőz állapotba kerülnek, majd a környező levegővel érintkezve gyorsan lehűlnek, és mikroszkopikus részecskékké kondenzálódnak, amelyek belélegezve komoly egészségügyi kockázatot jelenthetnek.

A füstben található szilárd részecskék jelentős része oxidált formában fordul elő, és kémiai összetételük jelentős mértékben függ az alkalmazott hegesztési eljárástól, a felhasznált anyagoktól és a munkakörnyezet paramétereitől. A leggyakrabban előforduló komponensek közé tartozik a vas-oxid, amely vassal történő hegesztés során keletkezik, valamint a mangán-oxid, amely a hozaganyagokban gyakori ötvözőelem. Ezenkívül előfordulhatnak króm- és nikkel-oxidok, főként rozsdamentesacél hegesztése során, amelyek belélegzése különösen veszélyes, mivel hosszú távon akár karcinogén hatású lehet. Emellett jelen lehetnek szénalapú vegyületek, például szénkorom vagy egyéb szerves eredetű szennyeződések.

Nemcsak a részecskék, hanem a különféle gázok is jelentős szerepet játszanak a hegesztési füst káros hatásaiban. A hegesztési eljárás típusától függően különféle toxikus gázok keletkezhetnek, mint például szén-monoxid (CO), szén-dioxid (CO₂), nitrogén-oxidok (NO és NO₂), valamint ózon (O₃). A szén-monoxid erősen mérgező, mert gátolja az oxigén szállítását a vérben. A nitrogén-oxidok és az ózon erősen irritálják a légutakat, gyulladást okozhatnak, és tartós expozíció esetén maradandó tüdőkárosodást is eredményezhetnek. Egyes esetekben ezek a gázok akár központi idegrendszeri zavarokat, fejfájást, szédülést vagy akár súlyosabb mérgezési tüneteket is előidézhetnek [1].

2.2 Részecskeméret

A hegesztési füst egyik legfontosabb komponense a benne található szilárd részecskék összessége, amelyek a füst jól látható, sűrű, gomolygó részét alkotják. Ezek a részecskék nem csupán optikai jelentőséggel bírnak, hanem komoly egészségügyi kockázatot is jelentenek a hegesztők és a környezetükben tartózkodók számára. A részecskék a fémek párolgása, oxidációja, illetve különböző kémiai reakciók eredményeképpen keletkeznek, majd a levegőben lebegve szállítódnak. Számos nemzetközi kutatás és toxikológiai vizsgálat foglalkozik a szilárd részecskék biológiai hatásaival, különösen azokkal, amelyek hosszabb ideig a légutakban vagy a szervezet más részeiben maradnak.

Méret szerint a szilárd részecskéket három fő frakcióba szokás sorolni. Az első csoportba tartoznak az ún. inhalábilis részecskék, amelyek 100 µm alatti mérettartományba esnek. Ezek képesek a szájon és orron keresztül bejutni a szervezetbe. Egy részük már a felső légutakban – például az orrüregben, a garatban vagy a gégefő környékén – kiszűrődik és lerakódik, azonban jelentős mennyiség továbbjut a mellkas irányába. Ezeket a részecskéket torakális frakciónak nevezzük, mivel eljutnak a légcsövön keresztül egészen a hörgőkig. A még ennél is kisebb, 4 µm-nél kisebb méretű szemcsék képesek mélyen behatolni a tüdőbe, ahol letapadhatnak, és közvetlenül érintkezhetnek a gázcsere végző sejtek felületével. Ez különösen veszélyes, mert a lerakódott anyagok gyulladást, sejtkárosodást, és hosszú távon hegesedést vagy daganatos elváltozásokat is előidézhetnek.

A legnagyobb kockázatot azonban az ún. nanorészecskék jelentik, amelyek mérete 1 és 100 nm közé esik. Ezek olyan aprók, hogy nemcsak mélyen a tüdőbe képesek behatolni, hanem át is tudnak hatolni a sejtfalakon is. Ennek következtében bekerülhetnek a vérkeringésbe, és így a test bármely részébe eljuthatnak, akár a központi idegrendszerbe, a májba, vesébe vagy egyéb létfontosságú szervekbe. A sejtszinten kifejtett hatásuk – például oxidatív stressz vagy DNS-károsodás – súlyos, sokszor visszafordíthatatlan egészségkárosodáshoz vezethet. Emellett a nanoméretű részecskék az immunrendszere is hatással lehetnek, gyulladást okozhatnak, és fokozhatják más betegségek kialakulásának kockázatát is.

Ebből is látható, hogy a részecskeméret vizsgálata kifejezetten fontos, mivel a belélegezhető frakciónál nagyobb méretű részecskék esetében az egészségkárosító hatás jelentősen alacsonyabb [2][3].

2.3 Hegesztési füst által okozott megbetegedések

Az első dokumentált eset, amely egyértelműen összefüggésbe hozható a hegesztési füst által kiváltott egészségkárosodással, 1938-ból származik. Ebben a korai beszámolóban még csupán ártalmatlannak vélt, légutakban lerakódott porról írtak, és a veszélyeket alábecsülték. Az orvostudomány fejlődésével és az ipari egészségvédelem előretörésével azonban fokozatosan világossá vált, hogy a hegesztési füst nemcsak kellemetlen, hanem potenciálisan súlyosan károsító hatással van az emberi szervezetre. Különösen az utóbbi évtizedekben kapott nagyobb figyelmet a hegesztők munkakörnyezetének vizsgálata és az ezzel járó egészségügyi kockázatok feltérképezése [4,5].

A hegesztők körében megfigyelt, úgynevezett hegesztőbetegségek közé tartozik többek között a foglalkozási asztma, amelyet a belélegezett irritatív anyagok váltanak ki, és amely rohamokban jelentkező légszomjat, köhögést, sípoló légzést okozhat. Szintén gyakori a fémláz (más néven füstláz vagy hegesztési láz), amelyet főként cink-oxid belélegzése vált ki, és influenzaszerű tüneteket – láz, izomfájdalom, hidegrázás – eredményez. A hegesztési füst hosszú távú belélegzése krónikus légúti gyulladásokhoz vezethet, például krónikus bronchitis kialakulásához, amely tartós köhögéssel, váladékképződéssel és légszomjjal jár. Emellett a légutakban lerakódó szilárd részecskék okozhatnak pneumokoniózt, ami egy ipari porok által kiváltott tüdőbetegség, valamint fibrózt, azaz tüdőszövet-hegesedést, ami a légzőfelület csökkenéséhez és a gázcsere romlásához vezet.

3 HEGESZTÉS MUNKAVÉDELME

A hegesztéssel összefüggő biztonságos munkavégzést garantáló előírásokat a 143/2004. (XII. 22.) GKM rendelet, illetve az 5/2020 (II. 06.) ITM rendelet tartalmazza.

Ezek a szabályozások fogalommeghatározások mellett konkrét előírásokat is megfogalmaznak a munkatér kialakításával szemben, melyeket maradéktalanul be kell tartani a munkavégzés megkezdéséhez.

A rendeletek kitérnek a megfelelő szellőztetés kialakítására, annak elhelyezésére, figyelmet fordítva arra, hogy az ne akadályozza a védőgáz útját. Emellett az expozíciós határértékeket is meghatározzák a koncentrációk függvényében.

A szabályozások célja nemcsak a munkabalesetek és az akut expozíciós tünetek megelőzése, hanem a hosszú távú egészségkárosodások elkerülése is. Ezen rendeletek előírják továbbá, hogy a munkavállalók számára rendszeres egészségügyi vizsgálatokat kell biztosítani, különösen akkor, ha fokozott expozíciónak vannak kitéve. Ezenkívül kötelező az egyéni védőeszközök – például légzésvédő maszkok – biztosítása és azok rendszeres karbantartása, illetve a használatuk ellenőrzése. A rendeletek részletesen meghatározzák, milyen feltételek mellett kell helyi elszívó berendezéseket alkalmazni, milyen légszűrő-arány szükséges adott munkaműveletekhez, valamint milyen mérésekkel kell igazolni a határértékek betartását.

A rendelet előírja továbbá, hogy a munkáltatónak biztosítania kell a munkatér rendszeres monitorozását. Ezt megteheti folyamatosan aktív szenzorok segítségével, amely folyamatos adatrögzítést tesz lehetővé. Az így

kapott adatokat a cikkben tárgyalt fuzzy modell bemeneteként is fel lehet használni [6,7].

4 FUZZY LOGIKA A DÖNTÉSTÁMOGATÁSBAN

A fuzzy logika célja, hogy matematikailag nehezen leírható vagy számszerűsíthető problémákat kezeljen. Ennek alapja, hogy nem csupán bináris értékekkel dolgozik, hanem képes az igen és a nem közti átmenetet is ábrázolni, így könnyen fordítható le az emberi nyelv kifejezéseire.

Ehhez tagsági függvényeket alkalmazunk, amelyek képesek kategorizálni a bemeneti értékeket és az alkalmazott szabályrendszer alapján egy döntési javaslatot adnak kimenetként [8].

A szakirodalom két fajtáját különbözteti meg a döntéshozatalnak. Az egyik a leíró, a másik pedig a normatív döntéshozatal. Fontos meghatározni, hogy a döntéstámogató rendszerünk pontosan melyiket támogatja [9].

A leíró döntéshozatal (*descriptive decision making*) célja, hogy egy átfogó képet mutasson a döntéshozó számára, amelyből képes megérteni az összefüggéseket és feltárni a lehetséges kimeneteket. Nem ad döntési javaslatot, csupán információval szolgál. [9]

A normatív döntéshozatal (*normative decision making*) konkrét döntési javaslatot készít. A folyamatokat matematikai modellekbe ülteti át, és ez alapján keresi a megfelelő megoldást, ezért szorosan kapcsolódik az optimalizációelmélethez.

A fuzzy logika mindkét szemlélethez kapcsolódik és támogatja azt. Alapvetően leíró döntéstámogatásnak tekinthető, mivel nem feltételez tökéletes racionalitást, jól modellezi az emberi gondolkodást, a bizonytalanságot és inkább a nyelvi kifejezéseket támogatja a működése során mint például: *kevés, közepes, sok*.

A fuzzy logika egyik legnagyobb előnye, hogy képes kezelni az információhiányból vagy szubjektivitásból fakadó bizonytalanságokat is, ezáltal lehetővé teszi olyan komplex helyzetek modellezését, amelyekben a hagyományos logikai rendszerek csődöt mondanak. Nem klasszikus értelemben vett optimalizációt végez, azonban egy reális képet ad, valamint iránymutatást ad a döntés meghozatalához [10].

5 KÖRNYEZETI TÉNYEZŐK HATÁSA A VIZSGÁLT SZEMÉLY KITETTSÉGÉRE, A FUZZY MODELL BEMENETEI ÉS KIMENETEI

A jelen modell célja a munkavállaló hegesztő füst általi kitettségének meghatározása. Ehhez azonban először kulcsfontosságú kijelölni azokat a paramétereket, körülményeket, amelyek befolyásolják ezt a kitettséget. A szubjektivitás kezelése érdekében megfelelően kell particionálni a bemeneti paramétereket, hogy megfelelő tagsági függvényeket kapjunk. Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek ezeket a tényezőket, illetve felosztásukat. Mivel ezek a tényezők nem merev határokkal elválaszthatók, hanem fokozatosan változnak, elengedhetetlen a fuzzy logika alkalmazása, amely lehetővé teszi az átmeneti értékek és bizonytalanságok kezelését. A bemeneti paraméterek megfelelő particionálása kulcsfontosságú, hiszen minden tényezőt

olyan kategóriákra kell bontani (például: alacsony, közepes, magas), amelyekhez tagsági függvényeket rendelünk, ezáltal biztosítva azt, hogy a nyelvi jellegű bemenetek – mint például a „gyenge szellőzés” vagy a „hosszú munkavégzés” – is matematikailag értelmezhetők legyenek.

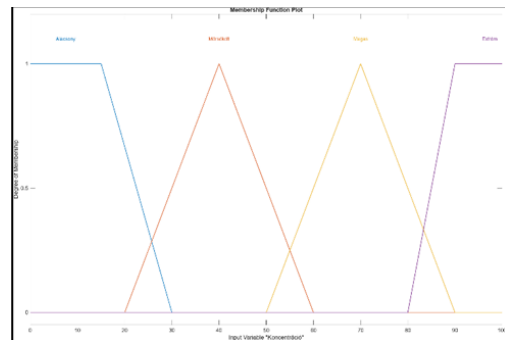
5.1 Szállópor-koncentráció

A hegesztési füst koncentrációja alapvetően befolyásolja a hegesztő kitettségét, mivel a füstben lévő finom részecskék a tüdőbe kerülve súlyos egészségkárosító hatást gyakorolnak. Egy átlagos irodai környezetben a szállópor-koncentráció mértéke $4-6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ érték körül mozog, a hegesztés során ez az érték nagyságrendi ugrásokat mutat és akár $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t is elérheti.

A koncentráció értéke egzakt módon meghatározható és folyamatosan mérhető, így pontos adat áll rendelkezésre a modell számára. Azonban a kapott értéket árnyalja a hegesztési eljárás, az alkalmazott segédanyagok típusa, így ezekre vonatkozóan nem állítható fel minden körülmények között érvényes szabály.

Ezért az alábbi tagsági függvények meghatározhatók (1. ábra):

- Alacsony
- Mérsékelt
- Magas
- Extrém



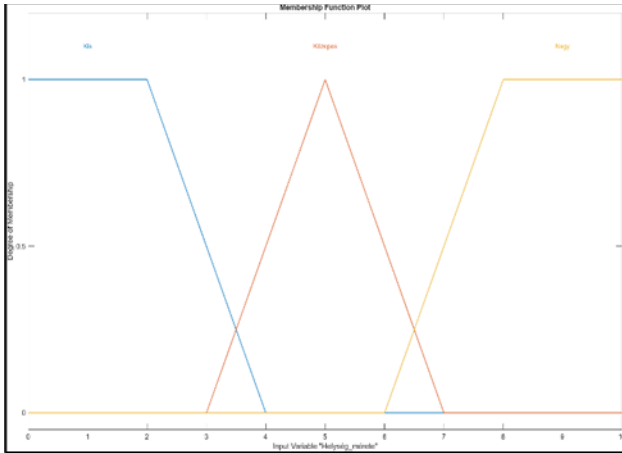
1. ábra: Koncentráció tagsági függvénye

5.2 Szellőztetés hatékonysága

A füstelszívás hatékonysága szintén egy kulcselem a biztonságos munkavégzéshez, mivel elvezeti a káros anyagokkal dúsult füstöt, megtisztítja azt, valamint friss levegőt juttat vissza a munkavégzés helyére. Ennek a hatékonysága több tényező miatt is romolhat. Ilyen a anyag karbantartás, alultervezett berendezés miatti teljesítménykorlát vagy a szűrők telítettsége.

Emiatt a hatékonyságát legjobban az keletkezett füst és megtisztított levegő arányával lehet reprezentálni, így három csoport különíthető el a tagsági függvényekhez (2. ábra):

- Gyenge
- Közepes
- Jó



2. ábra: Szellőztetés hatékonyságának tagsági függvénye

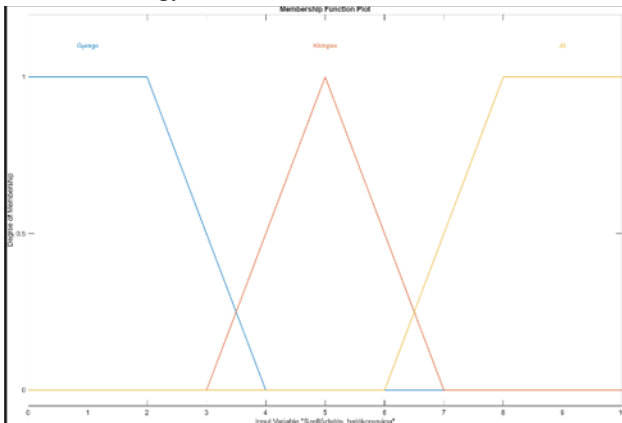
5.3 Helyiség mérete

A munkaterület térfogata szorosan összefügg az előző két kategóriával. Mivel egy kis, zárt helyiség sokkal veszélyesebb munkakörnyezet lehet, nagyobb elszívási kapacitás kell, hogy a levegő ne telítődjön káros anyaggal. Nagy, nyitott terek esetén a koncentráció sokkal lassabban érne el a határértéket.

Vannak olyan hegesztési helyzetek, ahol csak külön óvintézkedés mellett lehet munkát végezni, ilyen például a zárt tartály belsejében végzett munka, mivel itt nehéz megoldani a megfelelő szellőztetést.

Egy hegesztő helyiség optimális térfogata sok kísérletet és mérést igényel, ezért inkább általános meghatározásokat adtunk meg (3. ábra):

- Kis
- Közepes
- Nagy



3. ábra: Helyiség méretének tagsági függvénye

5.4 Expozíciós idő

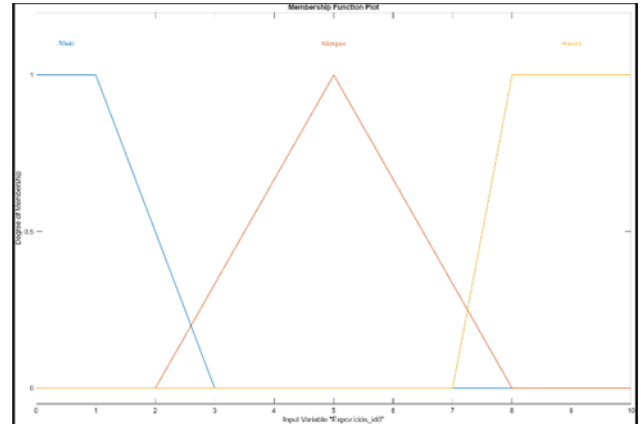
A hegesztő kitettsége nagy mértékben függ az expozíciós időtől. Minél hosszabban tartózkodunk a térben, annál több káros anyagot szívunk be, ezért fontos, hogy a lehető legkisebb értéken tartsuk ezt az időt. Ezt gyakori szünetek elrendelésével érhetjük el, amikor a munkavállaló az expozíciós téren kívül tartózkodik.

Ugyanakkor meg kell említeni, hogy az expozíció nem csupán a hegesztőre vonatkozik. A hegesztőt elsődleges expozíció éri, mivel az ő tevékenységéből eredő koncentrációt szívja be, azonban a környezetben

dolgozók, illetve a kiszolgáló személyzet is érintett: az őket érő hatást másodlagos expozíciónak nevezzük.

A tagsági függvényeket ebben az esetben az alábbi kategóriákban határoztam meg (4. ábra):

- Rövid
- Közepes
- Hosszú

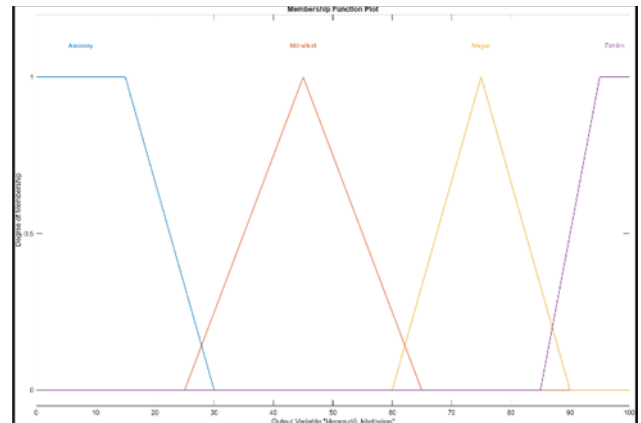


4. ábra: Expozíciós idő tagsági függvénye

5.5 A hegesztő kitettsége – Kimenet

A modell kimenete a fentebb tárgyalt körülmények alapján kerül meghatározásra, amely szintén szubjektív értelmezés szerint a következő lehet (5. ábra):

- Alacsony
- Mérsékelt
- Magas
- Extrém



5. ábra: Kimenet tagsági függvénye

5.6 Szabályrendszer

A modell működését alapvetően határozza meg a létrehozott szabályrendszer. A szabályrendszer kialakításánál figyelembe vételre kerültek azok a kulcsfontosságú tényezők, amelyek a szakirodalom és gyakorlati megfigyelések alapján a legnagyobb hatással vannak az expozíció mértékére. Ezek összeállítása saját ismeretekre és tapasztalatokra alapszik, így ennek validálása további kutatásokat és szakértői megkereséseket igényel. A szabályok célja, hogy olyan döntési logikát hozzanak létre, amely képes az adatokból levezethető összefüggések alapján becslést adni a munkavállaló kitettségi szintjére.

Az alkalmazott szabályrendszer nem fedi le teljes egészében az összes lehetséges kombinációt, mivel alapfeltételekkel éltünk úgy, mint *extrém koncentráció és hosszú expozíciós idő esetén a kitettség szintén extrém*. Az ezek alapján megalkotott szabályok az 1. táblázatban szerepelnek. A jelenlegi szabálybázis egy statikus verzió, de már ebben a formában is képes jól közelíteni a reális expozíciós szinteket, különösen akkor, ha a bemenetek precízen meg vannak határozva és a tagsági függvények helyesen tükrözik az értelmezési tartományokat. A táblázatban szereplő szabályok tehát nemcsak döntési útmutatót adnak, hanem átláthatóvá is teszik a rendszer működését a felhasználó számára, elősegítve annak elfogadottságát és gyakorlati alkalmazhatóságát.

1. táblázat: Fuzzy modell szabályrendszere

Koncentráció	Szellőztetés hatékonysága	Helyiség mérete	Expozíciós idő	Kitettség
Extrém	-	-	Hosszú	Extrém
Magas	Gyenge	-	Hosszú	Extrém
Magas	Gyenge	Kicsi	-	Extrém
Mérsékelt	Gyenge	-	Hosszú	Magas
Magas	Gyenge	Közepes	-	Magas
Magas	Közepes	-	Közepes	Magas
Mérsékelt	Gyenge	-	Hosszú	Extrém
Mérsékelt	Közepes	-	Hosszú	Magas
Mérsékelt	Gyenge	Kicsi	-	Magas
Magas	Gyenge	-	Rövid	Magas
Mérsékelt	-	-	Közepes	Mérsékelt
Alacsony	Gyenge	-	Hosszú	Mérsékelt
Alacsony	Közepes	-	Hosszú	Mérsékelt
Mérsékelt	Jó	Nagy	-	Mérsékelt
Magas	Jó	-	Rövid	Mérsékelt
Alacsony	Jó	-	Rövid	Alacsony
Alacsony	Jó	Nagy	-	Alacsony
Alacsony	Jó	-	Közepes	Alacsony
Alacsony	Jó	-	Közepes	Mérsékelt
Mérsékelt	Jó	Nagy	Rövid	Alacsony
Mérsékelt	Jó	Nagy	Rövid	Mérsékelt

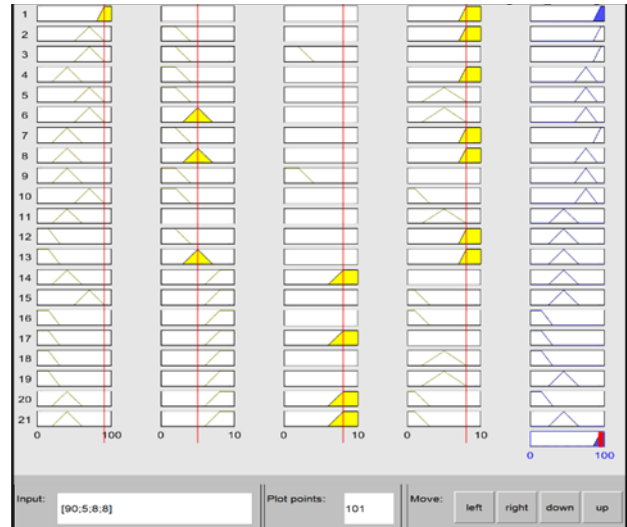
6 MODELL EREDMÉNYEK

6.1 Tesztelés

A modell tesztelése során azt vizsgáltuk, hogy a paraméterekre adott válasz milyen mértékben egyezik az előzetesen feltételezett kitettségi szinttel.

Egy konkrét példában azt elemeztük, hogy extrém koncentráció és hosszú expozíció esetén van-e hatása a másik két paraméternek. A modell alapján magas koncentrációban megfelelően hosszú ideig tartózkodva nem lehet elégséges védelmet biztosítani.

- Koncentráció: 90
- Szellőztetés hatékonysága: 5
- Helyiség mérete: 8
- Expozíciós idő: 8



6. ábra: A teszt értékére adott válasz

A 6. ábra alapján a kitettség értéke 94,1 volt a beállított paraméterek mellett, amely a szabályok alapján várható volt. A szellőztetés és a helyiség adatok változtatása pedig ebben az esetben semmilyen hatással nem volt a kapott értékre.

6.2 Bemenetek hatása a kimenetre

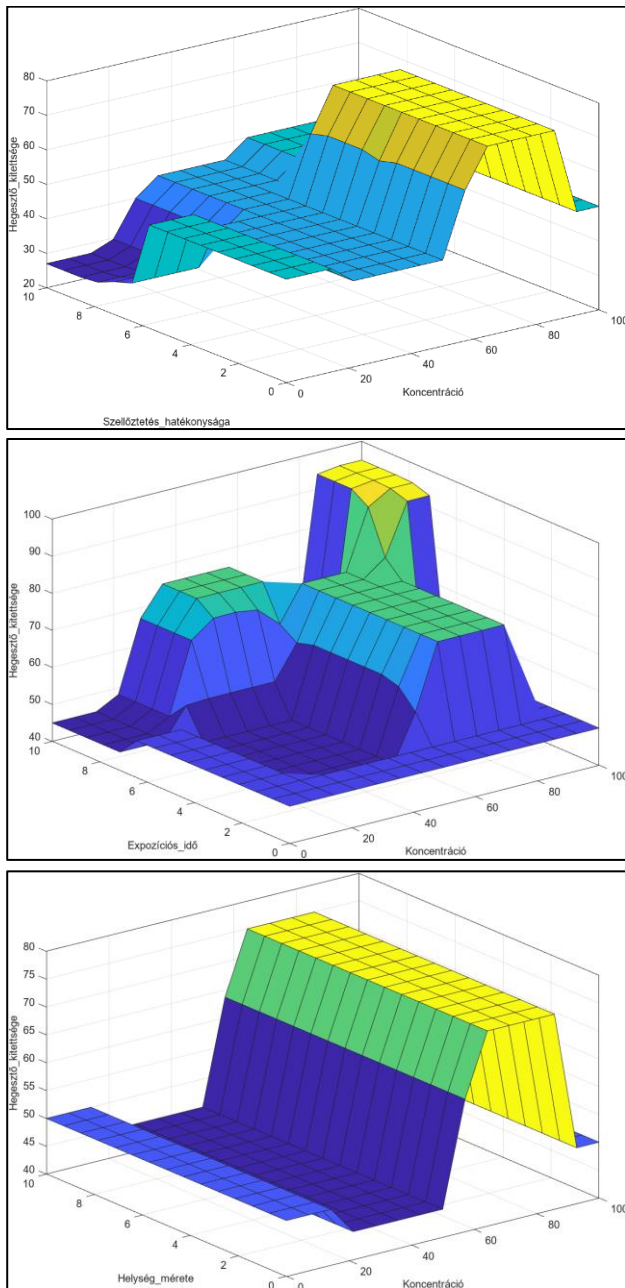
A MATLAB segítségével a bemenetek hatása a kitettségre könnyen vizualizálható. Az összehasonlítások során a koncentráció súlyát vizsgáltuk a többi bemenethez mérten. Ennek eredményeképpen kaptuk a 7. ábrát.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben a hegesztő személy kitettségét vizsgáltuk egy fuzzy modell elkészítésével. Ennek keretében kijelöltünk négy paramétert, amelyek befolyásolhatják ezt a kitettséget, és ezek kockázatát egyszabályrendszer kidolgozásával határoztuk meg.

A modell megfelelőségének validálására eddig kevés vélemény áll rendelkezésre szakértők részéről, így ebből a szempontból további kutatások és interjúk szükségesek.

A modell jelen esetben alkalmas arra, hogy a kitettség meghatározásán keresztül javaslatot adjon a döntéshozónak a további intézkedésekhez. Azonban a modell validálása után cél azt továbbfejleszteni, és egy beavatkozásra képes rendszert felépíteni. Ez képes lenne valós időben értékelni a kockázatot és jelzéseket adni a hegesztő vagy a hegesztést felügyelő személy számára, extrém esetben pedig akár a folyamat megszakítására is alkalmas lehet.



7. ábra: A bemeneti paraméterek hatása a kimenetre

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Berlinger Balázs, "Munkahelyi levegőben megjelenő hegesztési füstök toxikus fém tartalmának meghatározására szolgáló mintavételi és analitikai eljárások továbbfejlesztése és összehasonlító vizsgálata", 2009, ELTE Kémiai Doktori Iskola
- [2] Dr. Gáti József, "Hegesztési Zsebkönyv", 2023, Budapest, Cokom Mérnökiroda Kft.
- [3] Peter Brand, Kalus Lenz, Uwe Reisinger, Thomas Kraus, "Number Size Distribution of Fine and Ultrafine Fume", 305-313 o., 2013, Oxford University Press
- [4] Halshka Graczyk, Nastassja Lewinski, Jiayuan Zhao, "Characterization of Tungsten Inert Gas (TIG)", 205-219 o., 2015, Oxford University Press
- [5] Kjell Torén, "Occupational exposure to dust and to fumes, work as a welder and invasive pneumococcal disease risk", Occup Environ Med. 2020 Feb;77(2):57-63.
- [6] 143/2004. (XII. 22.) GKM rendelet a Hegesztési Biztonsági Szabályzat kiadásáról, [Online]
- [7] 5/2020 (II.6.) ITM rendelet, [Online]
- [8] Zadeh, L. A. (1965) Information and control. Fuzzy sets. Vol. 8, No. 3, pp. 338-353
- [9] Joan M. C. Sousa, Uzey Kaymak, "Fuzzy decision making in modeling and control", World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems, 2002
- [10] Váczai Dániel, Tóth-Laufer Edit, Szádeczky Tamás, "Az emberi tényező fuzzy alapú kiberbiztonsági kockázatelemzése a minősített információszivárgás szempontjából", Bánki Közlemények, 4. évfolyam, 1. szám, 2021