1ο Φοιτητικό Συνέδριο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Τρίπολη | Αμφιθέατρο «Αντώνιος Μπουκουβάλας» | 11 Ιουνίου 2025

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ:

Voidborne: A Godot-based Video Game Shaped by the MDA and DDE Frameworks

Vasileiadis Vasileios, MSc in Computer Science, University of the Peloponnese, Tripoli, dit2401cst@go.uop.gr

Karalis Spiridon, BSc in Informatics and Telecommunications, University of the Peloponnese, Tripoli, dit18070@go.uop.gr

June 11, 2025

Abstract

This work presents the design and development procedure of Voidborne, a 2D action-adventure game featuring pixel art graphics made with the Godot game engine. Our focus is on the creative and technical stages included in developing the main elements of the game, such as graphics, character design and game mechanics. The project is developed using the MDA and DDE Frameworks, that allows us to analyze how technological means, and graphic preferences form the player experience. Introducing our process helps us to provide understanding on the development of 2D games and the need of structured design thinking.

Keywords: 2D, Pixel Art, MDA, DDE, Game Mechanics, Godot

1 Introduction

Game development gives creators the freedom to experiment with unique game mechanics, visual graphics and player experiences. This work explores the design and development process of our 2D pixel art action-adventure game named Voidborne which was built using the Godot game Engine. Instead of focusing on the final output, we strongly highlight the journey behind the games production, from the game's conception and graphical choices to the implementation of the core mechanics of the game.

Our approach is shaped by two well-known theoretical models: The **MDA framework** (Mechanics, Dynamics, Aesthetics) [3], which organizes the players' experience from design goal to gameplay results and the **DDE** (Design, Development, Evaluation) **cycle** [5], which directed our iterative progress. Combining those two frameworks will help us to produce a case study in intentional reflective game design.

2 The MDA and DDE Frameworks

The **MDA framework** (Mechanics-Dynamics-Aesthetics) was first introduced by Hunicke, Leblanc, and Zubek (2004). MDA offers a structured method to understanding games by breaking them down into three parts [3]. **Mechanics** (the game's elements at the data representation and algorithmic layer), **Dynamics** (the way mechanics behave in real time when they interact with player inputs and outputs across time), **Aesthetics** (The player's desired emotional responses, when interacting with the game system). By connecting player experience with game design, this framework allows designers to predict how changes to mechanics of the game may impact player emotions.

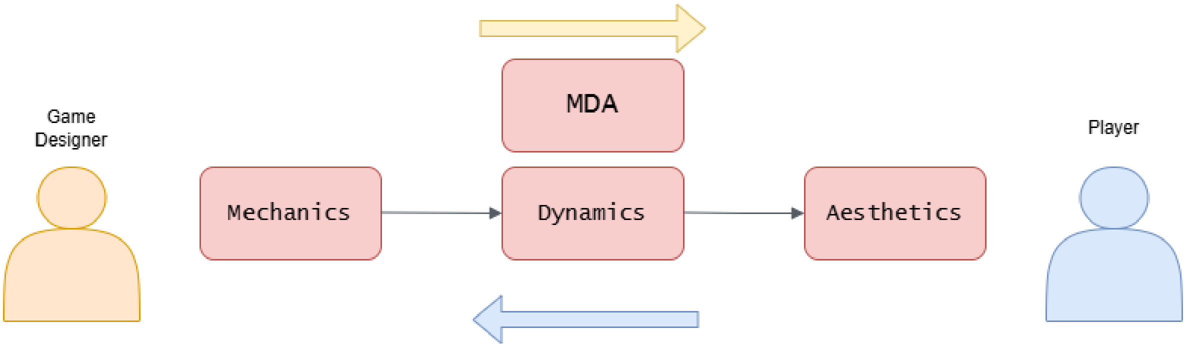


Figure 1: The MDA Framework

Accompanying MDA, the **DDE** (Design-Development-Evaluation) **cycle** provides a methodical approach for game development [5]. Breaking down to three phases, this repetitive cyclical approach guarantees that the game progresses according to user feedback, leading to a more captivating and effective final result. The **Design phase** includes the visualization of the game's concept. In this phase the designers visualize the game's aesthetic, the mechanics of the game and the user experience. The **Development phase** involves the actual creation of the game from creating the assets of the game and the visuals down to writing the code and implementing it. Lastly, **the Evaluation phase** where the focus is on gathering feedback from the users to improve the whole experience.

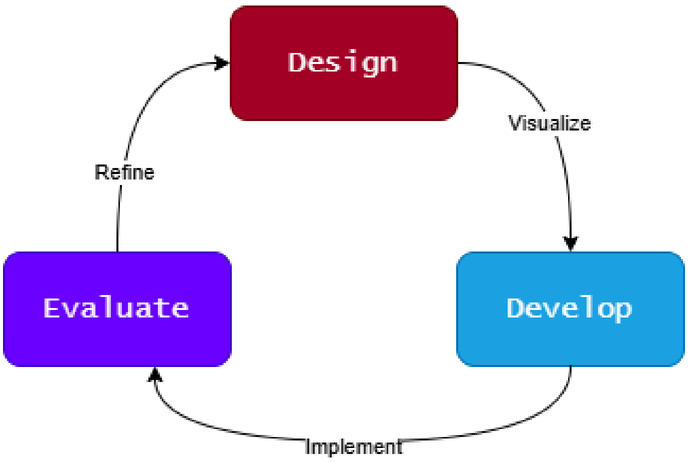


Figure 2: The DDE Cycle

3 Design and Art Direction

Digital art has experienced substantial changes due to the emergence of computer technologies. Specifically, pixel art keeps on as a unique and impactful medium in gaming [2][6]. Voidborne as mentioned above is a 2D action-adventure game that features pixel art graphics. Our main goal is to create an engaging experience through our visuals, mechanics and story rich design. Pixel art transcends the mere nostalgia for early gaming, it illustrates a deliberate design choice that emphasizes artistic limitations and innovative problem-solving. Pixel art has some key aspects that we want to mention:

- **Aesthetic Value**: Pixel art provides a unique visual identity, combining former elements with modern animation methods [2].

- **Technical Efficiency**: Pixel art is suitable for indie games because of its low-resolution requirements, which keep it computationally lightweight [6].
- **Emotional Connection**: The simplicity of pixel-based visuals allows for stronger player imagination and emotional engagement with characters and worlds [2].
- **Player identification**: Players can project their own ideas onto characters thanks to the abstract quality of pixel art, which reinforces their sense of personal connection to the game environment [6].
- **Nostalgia and Memory recall**: Many players relate pixel art with formative gaming experiences, reinforcing ties to classic and modern titles [2].

Pixel Art also plays a significant role in character design. It requires a balance between simplicity and expressiveness. We strongly focused on creating unique characters based on pixel art theories such as:

- **Silhouette-based design**: Pixel art requires us to focus on solid outlines for better character readability [6].
- **Limited Color Palettes**: Using limited color schemes to produce remarkable visual effects [6].
- **Expressive Animation**: Pixel art animation requires the use of frame limits and key frames to create dynamic motions [6].
- **Emotional Expression Through Minimalism**: Players can use their creative imagination to add emotional depth to characters made with pixel art because they depend on straightforward yet powerful motions and expressions [2].

The **MDA framework** is useful because it allows us to concurrently consider the position of a game designer and a player. While designers view game mechanics as different player behaviors, players perceive them as the game's rules. While designers view dynamics as design rules for the interaction between players and game mechanics, players perceive them as the system that produces the desired game experience. Finally, the objective of gameplay itself for gamers is aesthetics. However, they are the ultimate emotional reactions or states that designers aim to evoke in players using game mechanics and dynamics [4]. Voidborne was designed with this methodology based on the MDA framework.

4 Development Process

The engine used for the development of Voidborne is **Godot**. This game engine is beginner-friendly, as it is essentially designed for 2D game development and greatly forwards the design of a prototype. These were the main features that led us to choose this specific engine.

Taking the above into consideration, regarding Godot, as well as the theoretical frameworks of **MDA** and **DDE**, we designed the core mechanics of the game. Originally, we considered what actions the player would be able to perform within the game environment. We presumed that the player would be able to execute the following actions:

- Move
- Jump
- Climb
- Dash
- Fight

These actions shaped the foundation of the gameplay.

The way we carried them out was with the use of the **state machine design pattern**. This pattern is especially helpful for controlling a character within a game, as each action can be observed as a separate state [1]. For example, idling is a different state from moving.

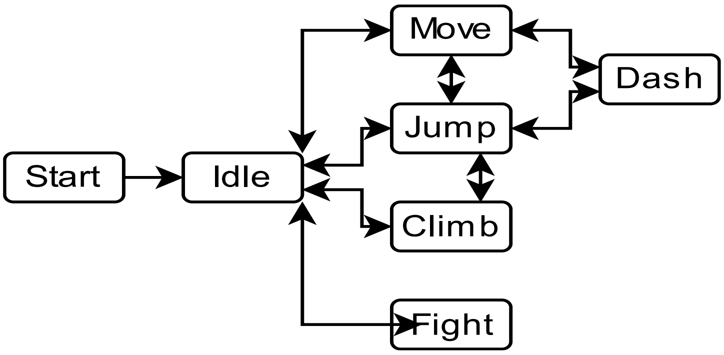


Figure 3: State Machine Design Pattern

Implementing this in Godot was relatively simple, considering the engine's simplicity of prototype development, as previously mentioned.

The **DDE framework** was especially helpful: we started by defining the variables for each state and, after going through the development and evaluation phases, we returned to the **design** phase and restructured the variables based on the feedback we received. Through this process, we continued designing other characters in Voidborne. The enemies and NPCs (non-Player Characters) present in the game were also implemented using the logic of the state machine. In combination with the **MDA framework**, and especially the **aesthetic** component, we customized the characters to achieve the experience and feeling we intended to convey to the user.

5 Conclusion

The creation of Voidborne was a challenging and complex process that required perfect and continuous collaboration between developer and designer. Trying to stay true to the theories and apply them to produce a perfect result, there was constant reevaluation of all stages of the game's creation. Our goal is to propose this combined framework for creating video games for students and small teams who want to start with game design and development. Forming our future plans, is the implementation of the whole game with applied design and development theories.

6 References

[1] Adams, E., Dormans, J. (2012). Game Mechanics: Advanced Game Design. United Kingdom: Pearson Education.

[2] Aleksić, V., & Simeunovic, V. (2024). The Pixel Art as Computer Graphics Artistic Expression in Digital Games. In *10th International Scientific Conference Technics, Informatics and Education-TIE 2024*. Faculty of Technical Sciences Čačak, University of Kragujevac.

[3] Hunicke, R., LeBlanc, M., & Zubek, R. (2004, July). MDA: A formal approach to game design and game research. In *Proceedings of the AAAI Workshop on Challenges in Game AI* (Vol. 4, No. 1, p. 1722).

[4] Kim, B. (2015). Game mechanics, dynamics, and aesthetics. *Library technology reports*, *51*(2), 17-19.

[5] MaxLearn Microlearning Platform. (2025, April 14). Design, Develop, Evaluate: The DDE Framework for Effective Learning Games. *Medium*.

[6] Zufri, T., Hilman, D., & Frans, O. (2022). Research on the application of pixel art in game character design. *Journal of Games, Game Art, and Gamification*, *7*(1), 27-31.

Πώς τα αντικειμενοστραφή μοτίβα σχεδίασης επηρεάζουν την ανάπτυξη ηλεκτρονικών παιχνιδιών: Μια Μελέτη Περίπτωσης στο Unity

Βασίλης Σακελλαρίου Κύρου, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, dit23037@go.uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει πώς τα αντικειμενοστραφή μοτίβα σχεδίασης επηρεάζουν την ανάπτυξη ηλεκτρονικών παιχνιδιών, μέσα από μια μελέτη περίπτωσης ενός project που υλοποιήθηκε με τη μηχανή ανάπτυξης παιχνιδιών Unity. Το State Pattern χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των διαφόρων συμπεριφορών του χαρακτήρα. Παρουσιάζεται ψευδοκώδικας ως σημείο αναφοράς για τη χρησιμότητα του μοτίβου και μετά με την γλώσσα προγραμματισμού C# θα φανεί η ορθή χρήση του μοτίβου. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ορθή χρήση μοτίβων σχεδίασης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το modularity, την επεκτασιμότητα και τη συντηρησιμότητα ενός παιχνιδιού, ακόμα και σε μικρής κλίμακας έργα.

Λέξεις-κλειδιά: Unity, μοτίβα σχεδίασης, αντικειμενοστραφής προγραμματισμός, ανάπτυξη παιχνιδιών

1 Εισαγωγή

Τα αντικειμενοστραφή μοτίβα σχεδίασης αποτελούν ανακυκλώσιμες λύσεις για συνήθη προβλήματα που προκύπτουν κατά την ανάπτυξη λογισμικού. Κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα Creational Patterns, τα Structural Patterns και τα Behavioral Patterns. Ο εν λόγω διαχωρισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την οργάνωση και την ανάπτυξη εφαρμογών, και ειδικότερα για την ανάπτυξη ηλεκτρονικών παιχνιδιών.

Η μηχανή ανάπτυξης παιχνιδιών Unity, σε συνδυασμό με τη γλώσσα προγραμματισμού C#, προσφέρει ένα ισχυρό και ευέλικτο περιβάλλον για την υλοποίηση τέτοιων μοτίβων. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα έτοιμων πόρων (assets, tutorials) ενισχύει περαιτέρω την ανάπτυξη παιχνιδιών, ακόμη και από μικρές ομάδες ή μεμονωμένους προγραμματιστές.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη της χρησιμότητας των αντικειμενοστραφών μοτίβων σχεδίασης, μέσα από μία μελέτη περίπτωσης ενός μικρής κλίμακας παιχνιδιού που αναπτύχθηκε στη μηχανή Unity. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται πώς η εφαρμογή του μοτίβου State (Behavioral) επηρέασε τη δομή, την οργάνωση και τη λειτουργικότητα του έργου.

2 Δομή του Project

Το έργο είναι ένα μικρής κλίμακας ηλεκτρονικό παιχνίδι shooter τρίτου προσώπου, στο οποίο ο παίκτης χειρίζεται έναν χαρακτήρα που μπορεί να πυροβολεί, να κινείται στον χώρο, να επαναφορτίζει το όπλο του και να στοχεύει. Η βασική ροή παιχνιδιού επιτρέπει στον παίκτη να βιώσει τις διάφορες καταστάσεις του χαρακτήρα, καθώς και να συνδεθεί με άλλους παίκτες μέσω διαδικτύου, με τη βοήθεια της υπηρεσίας Unity Relay.

Κατά την ανάπτυξη, δόθηκε έμφαση στη χρήση αντικειμενοστραφών μοτίβων σχεδίασης, με στόχο μια καθαρή και επεκτάσιμη αρχιτεκτονική. Συγκεκριμένα, το State Pattern εφαρμόστηκε για τη διαχείριση των βασικών συμπεριφορών του χαρακτήρα με 3 διαφορετικά State Machines για τις κινήσεις του χαρακτήρα, τις ενέργειές του και τις λειτουργίες του όπλου.

3 Εφαρμογή του State Pattern

3.1 Γενική Περιγραφή

Το State Pattern είναι ένα μοτίβο συμπεριφοράς (Behavioral Pattern) το οποίο επιτρέπει σε ένα αντικείμενο να αλλάζει συμπεριφορά ανάλογα με την εσωτερική του κατάσταση. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου ένα αντικείμενο περνάει από πολλές φάσεις, καθώς επιτρέπει τη διαχείριση των μεταβάσεων αυτών με καθαρό και επεκτάσιμο τρόπο, χωρίς να καταφεύγουμε σε περίπλοκα μπλοκ ελέγχου (όπως πολλαπλά `if` ή `switch`).

3.2 Υλοποίηση Ψευδοκώδικα με Διαδικαστική Λογική

Αν χρησιμοποιούσαμε ψευδοκώδικα για να αναπαραστήσουμε τις κινήσεις του χαρακτήρα, το αποτέλεσμα θα έμοιαζε με τον ψευδοκώδικα που ακολουθεί.

```
while game is running:
    input = getPlayerInput()
    switch state:
        case IDLE:
            playIdleAnimation()
            if input > 0:
                if input < runThreshold:
                    state = WALKING
                else:
                    state = RUNNING

        case WALKING:
            playWalkAnimation()
            currentSpeed = walkSpeed
            if input == 0:
                state = IDLE
            elif input >= runThreshold:
                state = RUNNING

          case RUNNING:
            playRunAnimation()
            currentSpeed = runSpeed
            if input == 0:
                state = IDLE
            elif input < runThreshold:
                state = WALKING

    moveCharacter(currentSpeed)
```

Listing 1: Game Loop με State Machine σε διαδικαστικό ψευδοκώδικα

Το πρόβλημα με αυτήν την προσέγγιση είναι ότι, για N διαφορετικές συμπεριφορές, απαιτούνται N `switch cases`, και εντός κάθε περίπτωσης έως και $N-1$ `if statements` για την εναλλαγή καταστάσεων. Αυτό οδηγεί σε έναν ιδιαίτερα περίπλοκο και δύσκολα συντηρήσιμο κώδικα, καθώς κάθε νέα συμπεριφορά απαιτεί τροποποίηση όλων των υπαρχόντων cases με τις αντίστοιχες συνθήκες μετάβασης. Η προσθήκη νέας λογικής γίνεται χρονοβόρα και συνήθως καταλήγει σε σφάλματα, ενώ η αναγνωσιμότητα και η επεκτασιμότητα του κώδικα υποβαθμίζονται σημαντικά.

3.3 Αντικειμενοστρεφής Προσέγγιση με State Pattern

Για να αποφύγουμε τα προβλήματα που προκαλεί η διαδικαστική (procedural) προσέγγιση, επιλέγουμε μία αντικειμενοστραφή υλοποίηση χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού C#, η οποία υποστηρίζεται από τη μηχανή Unity, εφαρμόζοντας το μοτίβο σχεδίασης State.

```
public abstract class MovementBaseState {
    public abstract void EnterState(MovementStateManager movement);
    public abstract void UpdateState(MovementStateManager movement);
}

public class MovementStateManager {
    public MovementBaseState currentState;
    public MovementBaseState idle, walking, running;

    public void Update() {
        GetInput();
        currentState.UpdateState(this);
    }

    public void SwitchState(MovementBaseState newState) {
        currentState = newState;
        currentState.EnterState(this);
    }
}

public class WalkingState : MovementBaseState {
    public override void EnterState(MovementStateManager movement) {
        // Do Something
    }

    public override void UpdateState(MovementStateManager movement) {
        if (Input.GetKey(KeyCode.LeftShift)) {
            ExitState(movement, movement.running);
        } else if (movement.direction.magnitude < 0.1f) {
            ExitState(movement, movement.idle);
        }
    }

    private void ExitState(MovementStateManager movement, MovementBaseState
    next) {
        movement.SwitchState(next);
    }
}
```

Listing 2: Απλοποιημένη υλοποίηση State Pattern στο Unity

Για να μπορέσει να λειτουργήσει το μοτίβο, απαιτείται μία διεπαφή ή μία αφηρημένη κλάση που να ορίζει δύο βασικές μεθόδους: `EnterState()` και `UpdateState()`. Στη συνέχεια, ένας διαχειριστής κατάστασης (State Manager) περιλαμβάνει αναφορές σε όλες τις πιθανές συμπεριφορές (καταστάσεις) και υλοποιεί τη μέθοδο `SwitchState()` ώστε να επιτρέπει την εναλλαγή μεταξύ αυτών.

Κάθε επιμέρους συμπεριφορά κληρονομεί από την αφηρημένη κλάση (ή υλοποιεί τη διεπαφή) και ορίζει τη δική της λογική για τις μεθόδους `EnterState()` και `UpdateState()`. Παράλληλα, υλοποιείται και μία μέθοδος `ExitState()`, η οποία δέχεται ως παράμετρο τον διαχειριστή και καλεί μέσω αυτού τη `SwitchState()` για την αλλαγή της κατάστασης.

Με αυτόν τον τρόπο, υλοποιείται ένα σαφές και επεκτάσιμο State Pattern, το οποίο μας απαλλάσσει από έναν χαοτικό και δύσκολα συντηρήσιμο κώδικα γεμάτο `if` και `switch statements`. Έτσι, κάθε νέα συμπεριφορά μπορεί να προστεθεί ανεξάρτητα, χωρίς να αλλοιωθεί η υπάρχουσα λογική.

4 Επίδραση στην Ανάπτυξη

Τα πλεονεκτήματα των μοτίβων σχεδίασης στην ανάπτυξη παιχνιδιών είναι αρκετά. Κατά κύριο λόγο, συμβάλλουν στη διατήρηση καθαρού και οργανωμένου κώδικα, διευκολύνοντας τη συνεργασία μέσα σε μία ομάδα ανάπτυξης. Η υλοποίηση γίνεται πιο ξεκάθαρη, επιτρέποντας την εύκολη ενσωμάτωση νέων λειτουργιών ή τροποποίηση υπάρχων, χωρίς να καταρρέει η αρχιτεκτονική. Επιπλέον, επιταχύνεται σημαντικά ο χρόνος ανάπτυξης, καθώς η τήρηση των προτύπων των μοτίβων μειώνει τις πιθανότητες συγκρούσεων στον κώδικα.

Οι βασικές δυσκολίες εντοπίστηκαν στην αρχική οργάνωση της δομής του έργου, στην επιλογή των κατάλληλων μοτίβων ώστε να υπάρχει λειτουργικότητα και συνοχή στην αρχιτεκτονική, καθώς και στην εκμάθησή τους. Η σωστή εφαρμογή τους απαιτεί μελέτη και κατανόηση της φιλοσοφίας πίσω από κάθε μοτίβο, των τρόπων υλοποίησης και της επίδρασής τους σε ολόκληρο το φάσμα της τεχνολογίας λογισμικού.

5 Συμπεράσματα και Μελλοντική Επέκταση

Παρά τις δυσκολίες που προέκυψαν κατά την υλοποίηση, ο κώδικας πλέον είναι modular, επεκτάσιμος και εύκολα συντηρήσιμος. Αυτό σημαίνει πως ένας προγραμματιστής μπορεί εύκολα να προσθέσει νέες λειτουργίες στον χαρακτήρα, όπως το να σκύβει ή να αλλάζει όπλα. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του κώδικα επιτρέπει την ενσωμάτωση και άλλων σχεδιαστικών μοτίβων, καθώς κάθε τμήμα της λογικής είναι πλέον ανεξάρτητο και καλά οργανωμένο.

Αναφορές

[1] Apostolos Ampatzoglou and Alexander Chatzigeorgiou. Evaluation of object-oriented design patterns in game development. *Information and Software Technology*, 49(5):445–454, 2007.

[2] Ralph Johnson και John Vlissides Erich Gamma, Richard Helm. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley Professional, 1994.

[3] Martin Fowler. *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Addison-Wesley Professional, 2018.

[4] Joe Hocking. *Unity in Action, Third Edition: Multiplatform game development in C#*. Manning, 2022.

[5] Maria-Eleni Paschali, Christina Volioti, Apostolos Ampatzoglou, Anastasios Gkagkas, Ioannis Stamelos, and Alexander Chatzigeorgiou. Implementing game requirements using design patterns. *Journal of Software: Evolution and Process*, 33(12):e2399, 2021.

[6] Junfeng Qu, Yinglei Song, and Yong Wei. Design patterns applied for game design patterns. In *2016 17th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*, pages 351–356, 2016.

Modeling the User Interface as a Multi – Layer Graph

Gerasimos Tzivras, PhD Candidate, University of Peloponnese, Tripolis, gerasimostzivras3@gmail.com

11 June 2025

Abstract

This thesis introduces a novel approach for building adaptive user interfaces (UIs) through a multi-layer graph model that unifies structure, behavior, aesthetics, context, and privacy into a single, dynamic representation. Traditional and early adaptive UIs often struggle with rigidity, unpredictability, or privacy concerns. In contrast, this graph-based model continuously updates with user actions and environmental changes, enabling real-time personalization while preserving user control and trust. A dedicated privacy layer ensures that all adaptations respect user-defined constraints and data protection standards. The model supports integration with machine learning techniques like reinforcement learning and graph neural networks to intelligently optimize the interface over time. By combining user-centric design with a privacy-first architecture, this research offers a scalable and principled foundation for next-generation adaptive UIs - interfaces that learn, adapt, and remain ethically aligned with user expectations.

Keywords: Adaptive User Interfaces(AUI), Multi-layer Graph Model, Graph-Based UI Modeling, Personalized Interfaces, Human-Computer Interaction (HCI), User Behavior Modeling

1 Introduction

Traditional **user interfaces (UIs)** are often static, following a *one-size-fits-all* design that fails to accommodate diverse user needs. In domains like smart TVs, for example, UIs remain fixed and become increasingly cluttered as new features are added, leading to limited learnability, reduced usability, and greater cognitive overload for users. Without adaptation, all users receive the same impersonal experience, which can frustrate individuals with unique preferences or requirements. On the other hand, simply adding more features or settings for personalization can overwhelm users and does not truly *tailor* the interaction to each person. There is a clear need for interfaces that can adjust themselves dynamically to each user's habits and context, in order to improve usability and user experience.

Past attempts at **adaptive UIs** demonstrate both the promise and pitfalls of personalization. When done right, adapting an interface to a user's behavior can reduce visual search time and cognitive effort, leading to faster and more satisfying interactions. For instance, the classic adaptive Start menu in Windows XP would bubble up frequently used programs for easier access, illustrating how interfaces can become more efficient by *learning* from the user. However, many early adaptive interfaces suffered usability issues – an oft-cited example is menus that automatically reorder their items based on usage. In theory this adaptation should save time, but in practice it often **slowed users down and reduced satisfaction** due to the constantly changing layout. Users lost the sense of predictability and control: when the system's adjustments were unexpected, it added mental load rather than reducing it. These mixed results highlight a key challenge: **traditional UIs are too rigid, yet naive adaptive UIs can be unpredictable**. This research was motivated by the need to overcome these shortcomings – to design interfaces that adapt smoothly and intelligently, *without* hurting user comprehension or control.

Another critical motivation is the growing concern for **user privacy** in personalization. Conventional personalized systems (e.g. recommendation engines or adaptive websites) often rely on extensive user data collection and cloud-based processing, which can intrude on privacy and raise trust issues. Users today are wary of interfaces that "learn" about them if it means sensitive data might be misused or exposed. Indeed, studies show that usability and user trust are closely tied to privacy – interfaces that personalize without transparent privacy safeguards risk alienating users. Traditional adaptive systems typically did not put privacy first; they assumed data could be gathered freely to drive personalization. In the modern context of strict privacy regulations and savvy users, this is a major shortcoming. **Personalization must be balanced with privacy**. This thesis is motivated by the question: *Can we achieve rich, continuous UI personalization in a way that keeps the user's data safe and under their control?* Recent industry trends reinforce this need – for example, mobile platforms are exploring on-device personalization where a **personal knowledge graph** stays on the phone to provide context-aware services without sending raw data to the cloud. Such "privacy-first" approaches point to the future of adaptive interfaces, inspiring this research to make **user modeling and adaptation a local, user-controlled capability**.

These factors drove the inception of this research into continuously adaptive user interfaces that are *both* highly user-centered and privacy-preserving.

2 Problem Description

Research Problem: *How can we create user interfaces that continuously adapt to individual users – reflecting their preferences, behavior patterns, and context – while fundamentally safeguarding user privacy and agency?* In other words, the thesis tackles the lack of a cohesive approach that integrates **all key personalization factors** (UI structure, user behavior, aesthetics, context) under a privacy-first paradigm. Traditional personalization techniques tend to address pieces of this puzzle in isolation: for example, a system might adapt content based on behavior, or allow users to manually choose themes, or adjust to device context, but there has not been a unifying model to handle *structural, behavioral, visual, contextual, and privacy* aspects together in real-time. This fragmentation means current systems either adapt in a limited way or not at all, and they often require external data or ad-hoc logic that can violate privacy. The **core problem** can be summarized as a gap in **modeling and engineering adaptive UIs** – developers lack a general, principled way to represent all the necessary knowledge about the user and environment to drive adaptation. As a result, building a truly adaptive UI is complex and knowledge-intensive, requiring developers to capture diverse user characteristics and usage contexts without clear guidance. The thesis identifies this as a barrier: without a proper framework, it's difficult to constantly adjust the interface to the user in a consistent, maintainable, and privacy-conscious manner. By solving this, the work lays groundwork for a new class of interactive systems that intelligently tailor themselves to each user, **addressing the longstanding shortcomings** of both static and naive adaptive interfaces.

3 Recommended Solution

The thesis introduces a **multi-layer graph-based modeling approach** as a solution to this problem. The idea is to represent the UI and all relevant user-related information as a *graph* with multiple interconnected layers, each layer capturing a specific facet (structure, behavior, aesthetics, privacy, context). By using a graph, the approach can naturally encode relationships and constraints between these facets. This unified model serves as a knowledge base that the UI can consult and update continuously. In effect, the interface "understands" itself and its user through this graph: it knows how the interface is built, how the user is interacting with it, what the user likes visually, what privacy rules apply, and what context it's being used in. Having all this in one representation **solves the integration problem** – rather than separate subsystems for preferences or context, everything is woven into a single graph structure.

Crucially, this multi-layer graph model enables *continuous* adaptation. Because the state of the graph can be updated in real-time (for example, logging a new user action in the behavioral layer, or a context change in the context layer), the system can respond immediately by re-computing an optimal UI configuration. This overcomes the static nature of traditional UIs by ensuring the interface is always in sync with the user's current needs and situation. Moreover, embedding privacy as a dedicated layer means that **privacy-first design is baked into the solution**: *any adaptive decision must comply with the privacy constraints represented in the graph*. Thus, the system can personalize layout or content **without ever violating the user's privacy preferences**, because those preferences are part of the model itself. This approach addresses the core research problem by providing a mechanism to achieve rich personalization (leveraging user preferences and behavior patterns) in a **controlled, interpretable, and privacy-aware** way.

This technique is the primary methodological contribution, as it provides a novel way to represent and reason about the UI and user in tandem. The model consists of several **interconnected layers**, each encoding a different dimension of the adaptation problem, unified in a graph structure. The layers introduced include:

3.1 Structural Layer

Represents the UI's structure – the screens, interface elements, their layout, and navigation hierarchy. This layer is essentially a graph of UI components and their relationships (e.g. container relationships, workflows). It captures what can change in the interface (for instance, which panels can be shown/hidden or how content sections link together). By modeling the UI structure in graph form, we can apply graph algorithms or transformations to rearrange or modify the UI layout systematically when adaptation is needed (similar to a UI model at runtime).

3.2 Behavioral Layer

Logs and models the user's interaction patterns and behavioral history. Nodes in this layer might represent user actions (clicks, navigation events) or usage frequency of features, and edges might denote temporal sequences or causal links between actions. Over time, this forms a **behavior graph** that learns what the user tends to do, which features they use often, where they encounter difficulties, etc. This layer provides the dynamic signals for personalization – for example, identifying that a particular tool is rarely used and could be de-emphasized, or that the user consistently navigates through a certain sequence, which could be streamlined. The behavioral layer essentially encodes the *usage patterns* that inform how the UI should adapt to better suit the user.

3.3 Aesthetic Layer

Encodes the user's aesthetic preferences and UI presentation options. This includes visual theming, color schemes, font sizes, or layout densities that the user prefers (or that improve their experience). The aesthetic layer can be seen as a graph of style parameters or UI skins. By modeling aesthetics, the system can adapt not just the content and structure, but also the look-and-feel in response to user taste or needs (for example, switching to a high-contrast theme for a user who consistently chooses simpler visuals). Including aesthetics acknowledges that personalization isn't only about what features are shown but also *how* they are presented, as visual appeal and comfort can greatly affect usability.

3.4 Privacy Layer

Incorporates privacy constraints and user consent preferences as first-class elements of the model. This layer might contain nodes representing sensitive data elements or UI components that handle personal information, with annotations about who can see what or what data is allowed to be used for adaptation. By formalizing privacy rules in the graph, any adaptation logic can be **constrained** by these rules – e.g., the UI will not surface certain recommendations or will mask certain information if the privacy layer indicates the user has not permitted that use. This implements a *Privacy–First design*: adaptation must always consult this layer, thereby preserving user agency and trust. Technically, it could implement ideas from privacy-aware HCI like role-based views or content hiding when a co-located person is detected. The privacy layer ensures the system adheres to Privacy by Design principles, aligning with ethical AI guidelines while personalizing the experience.

3.5 Context Layer

Captures contextual information about the user's environment and device. Contextual factors include device type (phone, tablet, desktop), screen size, location, time of day, ambient conditions, or even the presence of other users (in shared device scenarios). This layer is essentially a context model (often represented as an ontology or graph in ubiquitous computing). By including context, the adaptation can be situationally aware – e.g., simplifying the UI on a small screen, or enabling voice interaction when the user is driving, or using a dark mode at night. The context layer works in tandem with the structural and behavioral layers to ensure the UI remains *usable and plastic* across different situations.

Each layer on its own addresses one aspect of adaptation, but **the real power is in their integration**. These layers are not isolated; they are nodes and subgraphs within one overarching graph, with cross-links between layers. For example, a node in the Structural Layer (say, a "Recommended Items" panel) might be linked to nodes in the Behavioral Layer (indicating how often the user interacts with recommendations), to nodes in the Aesthetic Layer (indicating the visual style of that panel), to the Privacy Layer (indicating that recommendations use the user's browsing history, which the user has allowed in private mode only), and to the Context Layer (perhaps the panel is only shown in certain contexts, like on a large screen or when at home). This **multi-layer graph** forms a knowledge graph of the user interface that the system can query and update. It acts as an internal model aligning the interface's configuration with the user's profile and environment. Notably, modeling the UI and user in this declarative, graph-based way brings advantages of *modularity* and reason*ing*: adaptation rules or machine learning algorithms can operate on the graph to decide how to change the interface, rather than using hard-coded imperative logic.

4 Conclusions

The methodological advance in this thesis is a **unified, graph-based modeling approach** to UI adaptation, which brings multiple streams of research together: graph theory for knowledge representation, user modeling for personalization, model-driven UI engineering for separation of concerns, and privacy-preserving system design. This approach enables **real-time, context-sensitive, user-specific adaptations** that are interpretable and controllable. It lays a foundation for building adaptive interfaces in a more systematic way, moving beyond ad-hoc personalization toward a principled framework supported by both theoretical models and AI algorithms. By demonstrating this multi-layer graph model, the thesis contributes a powerful tool for HCI researchers and developers to create the next generation of smart user interfaces.

In conclusion, the PhD research on graph-based continuously adaptive UIs lays a foundation for a future where human-computer interaction is far more personalized, fluid, and respectful of user autonomy than it is today. The motivation and solutions presented address pressing needs in usability and privacy, and the continuing work will push these ideas into practical reality. In the long run, this line of research can lead to **smart adaptive systems** that enhance productivity and user satisfaction across all domains of life, establish new standards for **ethical AI** in personalization, and open up vast **industry applications** from personal gadgets to enterprise software. By integrating user preferences, behaviors, and privacy from the start, we ensure that this future of adaptive interfaces is not only intelligent but also *human-centered*. The journey is just beginning, but the potential impact is enormous: a world where our interfaces truly understand us, and we no longer have to bend to technology – instead, our technology bends to us, in a safe and principled way.

5 References

[1] A. A. C. de Freitas and M. P. Barcellos, “An ontology-based approach to support the development of adaptive interface systems,” Ontobras/WTDO, 2024.

[2] E. Yigitbas et al., “Integrated model-driven development of self adaptive user interfaces,” Software Systems Modeling, vol. 19, no. 4, Jan. 2020.

[3] N. Toraman et al., “Conceptualization and survey instrument development for website usability,” MDPI, Oct. 2024.

[4] Y. Xue et al., “Adaptive user interface generation through reinforcement learning,” IEEE Access, Dec. 2024.

[5] A. Kobsa and J. Schrec, “Privacy through pseudonymity in user-adaptive systems,” DBLP, May 2003.

[6] L. Findlater and K. Z. Gajos, “Design space and evaluation challenges of adaptive graphical user interfaces,” AI Magazine, vol. 30, no. 1, 2009.

[7] M. Khan and S. Khusro, “Towards the design of personalized adaptive user interfaces for smart TV viewers,” J. King Saud Univ., Oct. 2023.

[8] A. Morrison, “Samsung and Apple’s knowledge-centric approaches to secure, personalized AI on phones,” DataScienceCentral, pp. 252–256, Nov. 2024.

[9] P. Smart, “Say goodbye to static user interfaces,” FastCompany, Sept. 2024.

[10] A. Wijesundara, “Privacy-aware smart home interface framework,” Ph.D. thesis, Open Univ. (UK), 2020.

Η Υπολογιστική Όραση στην Υπηρεσία της Κινητικής Αξιολόγησης Ηλικιωμένων: Η εφαρμογή Sit-to-Stand

Κωνσταντίνα Πάτση, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου , Τρίπολη, dit19179@go.uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της υπολογιστικής όρασης για την κινητική αξιολόγηση ηλικιωμένων μέσω της δοκιμασίας Sit-to-Stand (STS), μιας ευρέως χρησιμοποιούμενης μεθόδου για την εκτίμηση της λειτουργικής ανεξαρτησίας και την πρόβλεψη του κινδύνου πτώσεων. Ο βασικός στόχος είναι η σχεδίαση και υλοποίηση μιας αυτοματοποιημένης εφαρμογής χαμηλού κόστους, η οποία να καταγράφει, αναλύει και αξιολογεί την επίδοση των ηλικιωμένων κατά την εκτέλεση της δοκιμασίας STS. Η εφαρμογή αξιοποιεί το εργαλείο MediaPipe για την ανίχνευση του σκελετού σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τον υπολογισμό επαναλήψεων και την ακριβή χρονομέτρηση της εκτέλεσης. Επιπλέον, περιλαμβάνει δυνατότητες αποθήκευσης των δεδομένων που συλλέγονται κατά την αξιολόγηση. Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες πραγματικής χρήσης, αποδεικνύοντας υψηλή ακρίβεια, αξιοπιστία και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εν λόγω λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε απομακρυσμένα ή αγροτικά περιβάλλοντα, όπου οι ηλικιωμένοι έχουν περιορισμένη πρόσβαση σε δομές φυσικοθεραπείας και ιατρικής φροντίδας. Η συμβολή της έρευνας έγκειται στην ενίσχυση της δυνατότητας απομακρυσμένης παρακολούθησης της υγείας, στη μείωση του κινδύνου πτώσεων και στη διατήρηση της αυτονομίας των ηλικιωμένων. Η εργασία αυτή υποστηρίζει τη μετάβαση προς ένα σύστημα υγειονομικής φροντίδας με έμφαση στην πρόληψη και την τεχνολογική καινοτομία.

Λέξεις κλειδιά : Υπολογιστική Όραση, Sit-to-Stand, Κινητική Αξιολόγηση, MediaPipe.

1 Εισαγωγή

Η γήρανση του πληθυσμού αποτελεί μια από τις σημαντικότερες κοινωνικές και υγειονομικές προκλήσεις της εποχής μας. Με την αύξηση του προσδόκιμου ζωής και τη μείωση των γεννήσεων, ο αριθμός των ηλικιωμένων αυξάνεται ραγδαία, δημιουργώντας πιεστικές ανάγκες για αποτελεσματικές λύσεις στον τομέα της υγείας και της φροντίδας. Ένας από τους βασικότερους στόχους για τη διασφάλιση της ποιότητας ζωής των ηλικιωμένων είναι η διατήρηση της κινητικής τους ανεξαρτησίας και η πρόληψη πτώσεων, οι οποίες αποτελούν μία από τις πιο συχνές αιτίες τραυματισμών σε αυτή την ηλικιακή ομάδα [1].

Η αξιολόγηση της φυσικής κατάστασης των ηλικιωμένων γίνεται συχνά μέσω κλινικών δοκιμασιών, με την STS να ξεχωρίζει ως μία από τις πιο διαδεδομένες και αξιόπιστες [2]. Παρόλα αυτά, οι παραδοσιακές μέθοδοι εκτέλεσης και αξιολόγησης της STS απαιτούν τη φυσική παρουσία ειδικού και συχνά ειδικό εξοπλισμό, κάτι που περιορίζει την ευρεία εφαρμογή της, ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές ή για άτομα με περιορισμένη κινητικότητα.

Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της υπολογιστικής όρασης και της τεχνητής νοημοσύνης προσφέρει νέες δυνατότητες για την αυτοματοποιημένη και απομακρυσμένη παρακολούθηση της κινητικής απόδοσης. Η χρήση εργαλείων όπως το MediaPipe καθιστά δυνατή την ακριβή παρακολούθηση της ανθρώπινης κίνησης μέσω κάμερας [3], χωρίς την ανάγκη επιπλέον αισθητήρων ή επαφής με τον χρήστη. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην αξιοποίηση αυτών των δυνατοτήτων, με την ανάπτυξη μιας φιλικής προς τον χρήστη εφαρμογής για την ανάλυση της STS.

2 Στόχοι και Κίνητρα της Έρευνας

Παρά την καθιερωμένη χρήση της δοκιμασίας STS στην αξιολόγηση της κινητικότητας, η εφαρμογή της στην καθημερινή πράξη παραμένει περιορισμένη λόγω της εξάρτησης από την παρουσία εξειδικευμένων επαγγελματιών και της ανάγκης για συγκεκριμένο εξοπλισμό [2]. Η ανεπάρκεια διαθέσιμων εργαλείων που να προσφέρουν αυτοματοποιημένη, οικονομικά προσιτή και εύκολη στη χρήση αξιολόγηση δημιουργεί σοβαρά εμπόδια στην ευρεία εφαρμογή της STS, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιβάλλοντα κατοικίας ηλικιωμένων.

Η πρόκληση, επομένως, εστιάζεται στην ανάγκη για ανάπτυξη μιας λύσης που να επιτρέπει την αντικειμενική και αξιόπιστη αξιολόγηση της κινητικότητας χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση και με ελάχιστες τεχνικές απαιτήσεις. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη μιας εφαρμογής βασισμένης στην τεχνολογία υπολογιστικής όρασης, με χρήση της πλατφόρμας MediaPipe [3], για την ανάλυση της STS δοκιμασίας. Η εφαρμογή έχει σχεδιαστεί ώστε να αναγνωρίζει και να καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τις κινήσεις του χρήστη, υπολογίζοντας με ακρίβεια τον αριθμό των επαναλήψεων και τη διάρκεια εκτέλεσης.

Ο κύριος σκοπός είναι η δημιουργία ενός εργαλείου που να προάγει την αυτονομία του ηλικιωμένου και να επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση από επαγγελματίες υγείας, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των πτώσεων και στην πρόληψη λειτουργικής επιδείνωσης. Η προσέγγιση αυτή έρχεται να καλύψει ένα κρίσιμο κενό στην κινητική αξιολόγηση και να υποστηρίξει βιώσιμες λύσεις φροντίδας τρίτης ηλικίας.

Η δοκιμασία STS αποτελεί ένα από τα πιο απλά και ευρέως τεκμηριωμένα τεστ λειτουργικής αξιολόγησης των ηλικιωμένων, καθώς αντικατοπτρίζει βασικές καθημερινές κινητικές απαιτήσεις, όπως η μετακίνηση από καθιστή σε όρθια θέση. Το τεστ, και ειδικότερα η εκδοχή “30-second Chair Stand Test”, βασίζεται στην εκτέλεση του μέγιστου δυνατού αριθμού επαναλήψεων (κάθισμα-ανόρθωση) μέσα σε 30 δευτερόλεπτα, χωρίς τη χρήση των χεριών. Ο αριθμός των επαναλήψεων αποτελεί δείκτη δύναμης, ευκινησίας και ισορροπίας, ενώ έχει αποδειχθεί κλινικά χρήσιμος για την πρόγνωση του κινδύνου πτώσης και της γενικής λειτουργικής κατάστασης [4].

Για την αντικειμενική ερμηνεία των αποτελεσμάτων, έχουν προταθεί τιμές αναφοράς ανά ηλικιακή ομάδα και φύλο. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις φυσιολογικές βαθμολογίες που αναμένονται, σύμφωνα με το Centers for Disease Control and Prevention (CDC):

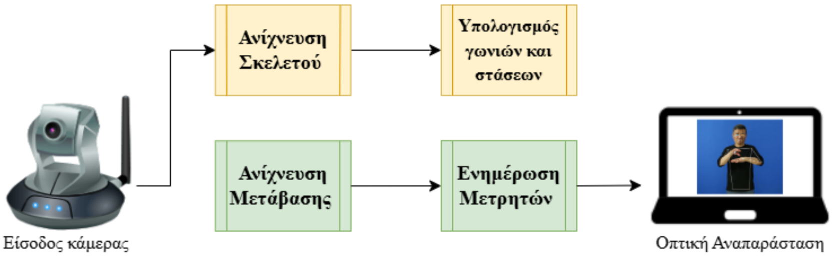
Ηλικιακή Ομάδα	Άνδρες (επαναλήψεις / 30’’)	Γυναίκες (επαναλήψεις / 30’’)
60-64	14	12
65-69	12	11
70-74	12	10
75-79	10	10
80-84	10	9
85-89	8	8
90-94	7	4

Πίνακας 1. Μέσες βαθμολογίες του STS για κάθε ηλικιακή ομάδα

Αποτελέσματα κάτω από τις αναμενόμενες τιμές υποδηλώνουν αυξημένο κίνδυνο για λειτουργική έκπτωση και μειωμένη ανεξαρτησία, ενώ η χαμηλή απόδοση στο STS έχει επίσης συσχετιστεί με χαμηλή VO_2 max και γενική αδυναμία αντοχής, ιδιαίτερα σε πληθυσμούς με χρόνια νοσήματα όπως η ΧΑΠ [5]. Παρά την απλότητα του τεστ, η κλινική του χρησιμότητα είναι σημαντική, καθώς προσφέρει εύκολη, γρήγορη και ασφαλή ένδειξη της φυσικής κατάστασης, χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού ή ειδικού προσωπικού [6].

3 Τεχνική Προσέγγιση και Υλοποίηση

Η προτεινόμενη λύση (Εικόνα 1) βασίζεται στην υλοποίηση μιας εφαρμογής, η οποία χρησιμοποιεί τεχνολογίες υπολογιστικής όρασης για την καταγραφή και αξιολόγηση της δοκιμασίας STS. Η υλοποίηση αξιοποιεί την πλατφόρμα MediaPipe της Google [3], η οποία επιτρέπει την ανίχνευση των βασικών αρθρώσεων του ανθρώπινου σώματος μέσω απλής κάμερας, σε πραγματικό χρόνο, χωρίς εξωτερικούς αισθητήρες. Κατά τη διάρκεια της δοκιμασίας, ο χρήστης κάθεται σε μια καρέκλα και καλείται να εκτελέσει επαναλαμβανόμενες μεταβάσεις σε όρθια θέση και πάλι πίσω. Η κάμερα καταγράφει τη διαδικασία και η εφαρμογή αναγνωρίζει την κίνηση μέσω της μεταβολής της θέσης συγκεκριμένων αρθρώσεων, κυρίως των γονάτων και των ισχίων. Με τη χρήση αλγορίθμων χρονικής ανάλυσης, καταγράφεται η διάρκεια κάθε επανάληψης και υπολογίζεται το συνολικό σκορ κινητικής απόδοσης [1].



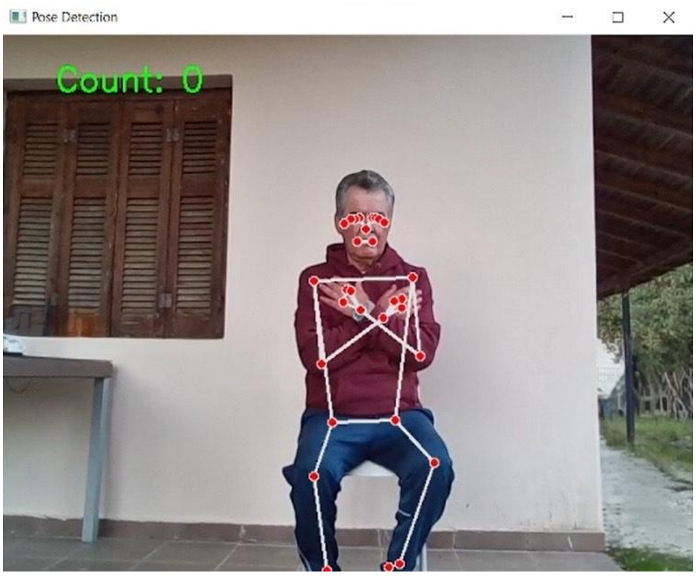
Εικόνα 1. Σχεδιάγραμμα χρήσης του Sit-to-Stand

Η εφαρμογή είναι σχεδιασμένη για να λειτουργεί αυτόνομα, χωρίς την ανάγκη παρεμβάσεων από εξειδικευμένο προσωπικό. Επιπλέον, περιλαμβάνει δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε τοπικό ή απομακρυσμένο server, επιτρέποντας την επανεξέταση από ιατρούς ή φυσικοθεραπευτές. Η διεπαφή χρήστη είναι απλή και κατανοητή, προσαρμοσμένη στις ανάγκες ηλικιωμένων, ενώ παρέχεται και ακουστική υποστήριξη για οδηγίες χρήσης. Η επιλογή της βιβλιοθήκης MediaPipe προσφέρει χαμηλό υπολογιστικό κόστος, ακρίβεια στις μετρήσεις και δυνατότητα φορητής εφαρμογής, καθιστώντας τη λύση κατάλληλη για χρήση εντός ή εκτός δομών υγείας. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Python με υποστήριξη βιβλιοθηκών για επεξεργασία βίντεο, ενώ η αξιολόγηση βασίστηκε σε προτυποποιημένο σενάριο χρήσης.

4 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Η εφαρμογή αξιολογήθηκε σε περιβάλλον ελεγχόμενης χρήσης, με τη συμμετοχή χρηστών που προσομοίωσαν το προφίλ ηλικιωμένων ατόμων (βλ. Εικόνα 2). Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, καταγράφηκε υψηλή ακρίβεια στην ανίχνευση των κινήσεων, καθώς και συνέπεια στους υπολογισμούς του αριθμού επαναλήψεων και του συνολικού χρόνου εκτέλεσης της δοκιμασίας Sit-to-Stand. Η χρήση της υπολογιστικής όρασης μέσω MediaPipe αποδείχθηκε αποτελεσματική τόσο σε όρους αναγνώρισης κινήσεων όσο και από πλευράς απόδοσης σε συσκευές μεσαίων δυνατοτήτων.

Τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν με επιτυχία και επανεξετάστηκαν για να αξιολογηθεί η ακρίβεια και η χρηστικότητα της εφαρμογής από τρίτο χρήστη. Η διεπαφή χρήστη κρίθηκε φιλική και κατανοητή, ενώ οι ακουστικές οδηγίες συνέβαλαν στην αποτελεσματική καθοδήγηση των συμμετεχόντων. Δεν απαιτήθηκε η παρουσία επαγγελματία υγείας, γεγονός που επιβεβαιώνει τη δυνατότητα αυτόνομης χρήσης. Η συνολική αποτίμηση δείχνει ότι η εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στο πλαίσιο πρόληψης όσο και στη διαχρονική παρακολούθηση κινητικών επιδόσεων. Η δυνατότητα καταγραφής ιστορικού δεδομένων, η απλότητα χρήσης και η δυνατότητα ενσωμάτωσης σε συστήματα τηλεϊατρικής καθιστούν την προτεινόμενη λύση κατάλληλη για απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές όπου οι υποδομές είναι περιορισμένες.



Εικόνα 2. Παράδειγμα χρήσης του προγράμματος

Συμπερασματικά, η εφαρμογή STS αξιοποιεί τις δυνατότητες της υπολογιστικής όρασης για την αποτελεσματική υποστήριξη της κινητικής αξιολόγησης των ηλικιωμένων. Η αξιοπιστία, η προσβασιμότητα και η προσαρμοστικότητα της λύσης ενισχύουν την αξία της στην προληπτική φροντίδα υγείας υποδεικνύοντας προοπτικές ευρύτερης υιοθέτησης σε σύγχρονες δομές υγείας.

5 Αναφορές

[1] Guralnik JM, et al. (1994). A Short Physical Performance Battery assessing lower extremity function. J Gerontol.

[2] Bohannon RW. (2006). Reference values for the five-repetition sit-to-stand test. J Geriatr Phys Ther.

[3] Zhang F, et al. (2020). Real-time human pose estimation with MediaPipe. arXiv preprint arXiv:2006.10204.

[4] Jones CJ, Rikli RE, Beam WC. (1999). A 30-s chair-stand test as a measure of lower body strength in community-residing older adults. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70(2):113–119.

[5] Ozalevli S, et al. (2007). Comparison of the sit-to-stand test with 6 min walk test in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Respiratory Medicine*, 101(2):286–293.

[6] Rikli RE, Jones CJ. (1999). Functional fitness normative scores for community-residing older adults, ages 60–94. *Journal of Aging and Physical Activity*, 7(2):162–181.

Ανάλυση & Οπτικοποίηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ελληνική Επικράτεια

Ευαγγελία Μέλε, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνίων, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, dit20137@go.uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η ταχεία εξάπλωση των ηλεκτρικών οχημάτων αναδεικνύει την ανάγκη για ακριβή και επικαιροποιημένη πληροφόρηση σχετικά με τα σημεία φόρτισης. Στην Ελλάδα, ο Νόμος 4710/2020 θέσπισε το Μητρώο Υποδομών και Φορέων Αγοράς Ηλεκτροκίνησης (Μ.Υ.Φ.Α.Η.), υποχρεώνοντας τους φορείς να δημοσιεύουν στατικά και δυναμικά δεδομένα για τους σταθμούς φόρτισης σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη μίας web εφαρμογής που αντλεί, επεξεργάζεται και οπτικοποιεί τα δεδομένα που λαμβάνει από το Μητρώο Υποδομών και Φορέων Αγοράς Ηλεκτροκίνησης (Μ.Υ.Φ.Α.Η.) κάθε 15 λεπτά σε διαδραστικό χάρτη, χρησιμοποιώντας σύγχρονες διαδικτυακές τεχνολογίες όπως Python, Leaflet.js και OpenStreetMap.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικά Οχήματα, Σταθμοί φόρτισης, Χάρτης Απεικόνισης Δεδομένων.

1 Εισαγωγή

Η ευρεία εξάπλωση των ηλεκτρικών οχημάτων (Η/Ο) αναδεικνύει, ίσως πιο εμφατικά από κάθε άλλη τεχνολογία μεταφορών τη σημασία της άμεσης, ακριβούς και χωρικά κατανεμημένης πληροφορίας για τα σημεία φόρτισης. Παγκόσμιες, κοινοτικά πηγαίες πλατφόρμες όπως η PlugShare [6] αποδεικνύουν ότι η χαρτογράφηση της υποδομής σε πραγματικό χρόνο συνιστά κρίσιμο παράγοντα εμπιστοσύνης για τον οδηγό. Ωστόσο το επίπεδο λεπτομέρειας και η τοπική εγκυρότητα ποικίλλουν σε εθνική κλίμακα.

Στην Ελλάδα, η οργάνωση και υποστήριξη της ηλεκτροκίνησης με θεσμικά εργαλεία θεμελιώθηκε με τον Ν. 4710/2020 [1], ο οποίος εισήγαγε το Μητρώο Υποδομών και Φορέων Αγοράς Ηλεκτροκίνησης (Μ.Υ.Φ.Α.Η.) και κατέστησε υποχρεωτική την ημερήσια δημοσίευση «στατικών» και τη δεκάλεπτη δημοσίευση «δυναμικών» συνόλων δεδομένων OCPI, για όλα τα δημόσια προσβάσιμα σημεία φόρτισης [2] [3].

Παρά την πληθώρα των δεδομένων, οι διαφορετικοί ρυθμοί ανανέωσης, η απουσία περιγραφικών πεδίων στο δυναμικό σύνολο και ο μεγάλος όγκος εγγραφών καθιστούν αναγκαία τη συγχώνευση και βελτιστοποίηση σε επίπεδο εφαρμογής. Ο κοινός παρονομαστής είναι τα αναγνωριστικά όπως ο μοναδικός κωδικός ταυτοποίησης σταθμού φόρτισης (location_id) και ο μοναδικός κωδικός ταυτοποίησης σημείου (evse_id), σύμφωνα με το άρθρο 4 [1],το οποίο προσφέρει τυποποιημένη διασυνδεσιμότητα μεταξύ Παρόχων Υπηρεσιών Κινητικότητας (eMSP) και Διαχειριστών Σημείων (CPO).

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια web εφαρμογή που χρησιμοποιεί τα δεδομένα του Μ.Υ.Φ.Α.Η. [2] [3], τα επεξεργάζεται και τα οπτικοποιεί σε έναν διαδραστικό χάρτη.

2 Σχεδίαση συστήματος

2.1 Λήψη Δεδομένων Σταθμών Φόρτισης

Η πληροφορία αντλείται μέσω των δημοσίως διαθέσιμων δεδομένων Μ.Υ.Φ.Α.Η. [2] [3], τα οποία ενημερώνονται κάθε 10 λεπτά. Πρόκειται για δύο αρχεία. Το ένα περιέχει στατική πληροφορία (π.χ. διεύθυνση, πόλη, ταχυδρομικός κώδικας, κ.λπ.) και το άλλο δυναμική πληροφορία (π.χ. την τρέχουσα κατάσταση του φορτιστή, αν χρησιμοποιείται, κ.λπ.). Στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά θα επεξεργάζονται και, αν υπάρχουν αλλαγές σε σχέση με τα ήδη διαθέσιμα, θα ενημερωθεί ο χάρτης. Τα αρχεία αυτά δεν διαγράφονται, αλλά μετονομάζονται έχοντας σαν ονομασία τη μέρα και την ώρα καθώς και το αν εμπεριέχουν δυναμική ή στατική πληροφορία, αντίστοιχα. Ο λόγος που τα αρχεία αυτά διατηρούνται είναι η στατιστική ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί σε δεύτερο χρόνο. Τα αιτήματα (requests) που θα πραγματοποιούνται για τα δεδομένα και κυρίως για τα δυναμικά πακέτα, που είναι και αυτά που εμπεριέχουν την πληροφορία πραγματικού χρόνου για την τρέχουσα κατάσταση σημείων φόρτισης, θα γίνεται κάθε 15 λεπτά. Αυτό ισοδυναμεί με πληροφορία που θα λαμβάνεται 96 φορές ανά ημέρα, ώστε οι σταθμοί φόρτισης να περιέχουν πάντα την τελευταία ανανεωμένη πληροφορία.

2.2 Αποτύπωση Δεδομένων σε Χάρτη

Η εφαρμογή, έχοντας ολοκληρώσει την επεξεργασία των δεδομένων είναι σε θέση να απεικονίσει τους σταθμούς φόρτισης σε όλη την ελληνική επικράτεια. Όλα τα σημεία θα εμφανίζονται σε έναν διαδραστικό χάρτη, με εικονίδια που δείχνουν τη θέση τους και αναδυόμενα παράθυρα που θα προσφέρουν βασικές πληροφορίες σχετικά με τους σταθμούς, όπως όνομα, ονομαστική ισχύς φόρτισης, τύπος και αριθμός ρευματοδοτών, καθώς και τη διαθεσιμότητα σημείου. Στην επόμενη φάση, θα πραγματοποιηθεί η προσθήκη φίλτρων, όπως δυναμική προβολή σημείων φόρτισης κατά μήκος διαδρομής.

3 Υλοποίηση Εφαρμογής

3.1 Λήψη και Επεξεργασία Δεδομένων

Σαν πρώτο βήμα στην εφαρμογή ορίζεται η λήψη και επεξεργασία των δεδομένων Μ.Υ.Φ.Α.Η. [2] [3]. Για την υλοποίηση της λήψης και την επεξεργασίας, υλοποιήθηκαν scripts σε γλώσσα προγραμματισμού python με χρήση γνωστών βιβλιοθηκών, όπως η requests [7] για τη λήψη των δεδομένων και η shutil [8] για την αποσυμπίεση των αρχείων. Η βιβλιοθήκη requests [7] χρησιμοποιήθηκε για να στείλει ένα HTTP GET μήνυμα αίτησης στις καθορισμένες URL διευθύνσεις του υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών για την λήψη των Δεδομένων Μ.Υ.Φ.Α.Η. [2] [3]. Εάν η λήψη είναι επιτυχής, το αίτημα απαντάται με μήνυμα 200 OK του HTTP και γίνεται η λήψη του αρχείου στην αρχική του μορφή. Σε κάθε άλλη περίπτωση εμφανίζει μήνυμα αποτυχίας μαζί με τον αντίστοιχο κωδικό. Η βιβλιοθήκη shutil [8] χρησιμοποιείται για την αποσυμπίεση των αρχείων που βρίσκονται σε μορφή zip σε έναν προκαθορισμένο φάκελο, ώστε να είναι διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

Η διαδικασία αυτή καλείται δύο φορές, μία για το στατικό και μία για το δυναμικό πακέτο δεδομένων. Για να επιτευχθεί μια πλήρης προβολή στον χάρτη χρειάζεται και τα δύο αρχεία (στατικό & δυναμικό) που διατίθενται σε μορφή JSON (JavaScript Object Notation). Το δυναμικό, που περιέχει ζωντανά δεδομένα όπως η τρέχουσα κατάσταση ενός φορτιστή (π.χ. διαθέσιμο, σε φόρτιση, εκτός λειτουργίας, σε άγνωστη κατάσταση, μη λειτουργικοί, δεσμευμένοι, φραγμένοι, κ.λπ.), και το στατικό, που περιγράφει σταθερές πληροφορίες όπως η τοποθεσία, ήτοι συντεταγμένες, πλήρης διεύθυνση τεχνικά χαρακτηριστικά, μέθοδος φόρτισης, ονομαστική ισχύς φόρτισης και άλλα μεταδεδομένα που δεν αλλάζουν συχνά. Το πρόβλημα είναι ότι το δυναμικό JSON αρχείο δεν περιλαμβάνει σημαντικά πεδία (π.χ., διεύθυνση, πόλη, ταχυδρομικός κώδικας, τύπος συσκευής φόρτισης Η/Ο κ.λπ.), ενώ το στατικό, παρόλο που περιέχει όλα αυτά, δεν ανανεώνεται συχνά. Συνεπώς, για να υπάρχει μια πλήρης εικόνα, είναι απαραίτητο να γίνει συγχώνευση των δύο κατά την εκτέλεση της εφαρμογής, συσχετίζοντας τα αρχεία με βάση κοινά πεδία, όπως ο μοναδικός κωδικός ταυτοποίησης σταθμού φόρτισης (location_id) και ο μοναδικός κωδικός ταυτοποίησης σημείου (evse_id). Η χρήση μόνο του ενός τύπου δεδομένων οδηγεί σε ελλιπή πληροφόρηση: το δυναμικό αρχείο δεν παρέχει βασικά στοιχεία εντοπισμού ή τεχνικές λεπτομέρειες, ενώ το στατικό αγνοεί την τρέχουσα διαθεσιμότητα και τη λειτουργική κατάσταση του σταθμού.

3.2 Απεικόνιση Δεδομένων

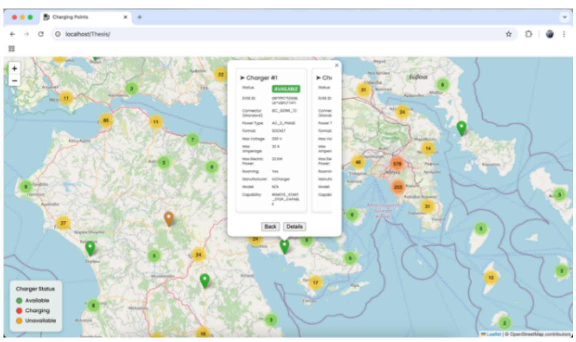
Η απεικόνιση των σταθμών φόρτισης στον χάρτη υλοποιείται με χρήση των βιβλιοθηκών OpenStreetMap [5] και Leaflet.js [4]. Η Leaflet λειτουργεί ως η βασική βιβλιοθήκη για την απεικόνιση του διαδραστικού διαδικτυακού χάρτη καθώς είναι γρήγορη, συμβατή για κινητά, έχει υψηλό ρυθμό απόκρισης και πρόκειται για βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα. Κάθε σημείο εμφανίζεται με ένα αναδυόμενο παράθυρο που περιλαμβάνει τις ακόλουθες βασικές πληροφορίες όνομα, διεύθυνση, πόλη, ταχυδρομικός κώδικας κ.λπ.. Καθώς και επιπλέον πληροφορίες όπως διαθεσιμότητα, τύπος συσκευής φόρτισης Η/Ο, μέθοδος φόρτισης κ.λπ.. Επιπλέον εμφανίζεται η φωτογραφία του σημείου, το ωράριο λειτουργίας, τα στοιχεία επικοινωνίας του διαχειριστή, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.

Για τη βελτίωση της χρηστικότητας του χάρτη όσον αφορά την κατάσταση των φορτιστών, χρησιμοποιώντας HTML και CSS, υλοποιήθηκε ένα υπόμνημα (legend) το οποίο είναι εμπνευσμένο από τις σχεδιαστικές συμβάσεις διεπαφής (UI) πλατφορμών, όπως το Google Maps. Για την επεξήγηση των χρωμάτων χρησιμοποιήθηκε πράσινο για διαθέσιμο, κόκκινο για κατάσταση φόρτισης και πορτοκαλί για εκτός λειτουργίας, καθώς και για τις υπόλοιπες καταστάσεις – σε άγνωστη κατάσταση, μη λειτουργικοί, δεσμευμένοι, φραγμένοι.

Η λογική που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

1. Αν ένας σταθμός φόρτισης διαθέτει, π.χ., 3 φορτιστές και οι 2 είναι σε κατάσταση φόρτισης ενώ ο 1 είναι διαθέσιμος, τότε η κουκίδα (pin) παραμένει πράσινη, ώστε ο χρήστης να γνωρίζει ότι υπάρχει διαθέσιμος φορτιστής.
2. Αντίστοιχα, όταν όλοι οι φορτιστές είναι σε κατάσταση φόρτισης, το χρώμα γίνεται κόκκινο, και το ίδιο ισχύει για την περίπτωση εκτός λειτουργίας (πορτοκαλί).

Τα περιεχόμενα αυτά δημιουργούνται δυναμικά μέσω JavaScript και όλη η διαχείριση του DOM (Document Object Model) καθώς και η υλοποίηση της λειτουργικότητας της διεπαφής του χρήστη, όπως η εναλλαγή πληροφοριών σε αναδυόμενα παράθυρα και η μορφοποίηση δεδομένων, γίνεται επίσης μέσω της JavaScript. Το σχεδιαστικό κομμάτι, η δομή και η διαδραστικότητα του frontend, επιτυγχάνεται μέσω της CSS και της HTML. Τέλος, επειδή τα σημεία φόρτισης είναι πολλά, ανέρχονται ήδη σε 3.133 και ο αριθμός τους αυξάνεται διαρκώς, έγινε χρήση του marker clustering [9], προκειμένου να γίνει ομαδοποίηση των κοντινών σημείων και να βελτιωθεί η απόδοση και η εμπειρία του χρήστη.



Εικόνα 1. Η εμφάνιση πληροφοριών μέσω αναδυόμενου παραθύρου

4 Συμπεράσματα & Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η εφαρμογή είναι σε θέση να παρέχει στους χρήστες σωστά κατανεμημένη πληροφορία για τους σταθμούς φόρτισης και τη διαθεσιμότητά τους σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Επιπλέον με δεδομένο ότι η πληροφορία που δίνεται στους οδηγούς θα πρέπει να είναι εστιασμένη όχι μόνο σε μια απλή απεικόνιση σημείων φόρτισης στον χάρτη, αλλά και σε επιπλέον διαθέσιμες πληροφορίες, οι μελλοντικές επεκτάσεις της εφαρμογής θα εστιάσουν στην προσθήκη φίλτρων και στην δυνατότητα πλοήγησης προς αυτά. Οι οδηγοί θα βρίσκουν σημαντικές πληροφορίες όπως οι ώρες αιχμής των σημείων φόρτισης, οι πιο πολυσύχναστοι σταθμοί φόρτισης και περιοχές φόρτισης καθώς και ποιοι τύποι και αριθμοί ρευματοδοτών διατίθενται στις εκάστοτε περιοχές.

5 Αναφορές

[1] Ελληνική Δημοκρατία, «Νόμος 4710/2020 – Προώθηση της Ηλεκτροκίνησης,” ΦΕΚ Α142,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://electrokinisi.yme.gov.gr/static_files/FEK-2021-B-05776.pdf. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[2] Υ. Υ. κ. Μεταφορών, «Διάθεση Δημοσίων Δεδομένων Μ.Υ.Φ.Α.Η.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://electrokinisi.yme.gov.gr/public/HelpMyfah/PublicData/. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[3] Υ. Υ. κ. Μεταφορών, «Δημοσίως Προσβάσιμα Σημεία Φόρτισης,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://electrokinisi.yme.gov.gr/public/Account/Login?ReturnUrl=%2Fpublic%2F. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[4] V. Agafonkin, «LeafletJS,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://leafletjs.com. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[5] OpenStreetMap, «OpenStreetMap,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.openstreetmap.org/#map=6/38.36/23.81. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[6] PlugShare Team, «PlugShare – EV Charging Station Map,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.plugshare.com/. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[7] K. Reitz., «Requests: HTTP for Humans™,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://docs.python-requests.org/en/latest/#requests-http-for-humans. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[8] S. Miss Islington (bot) and Storchaka, «shutil — High-level file operations,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://docs.python.org/3/library/shutil.html. [Πρόσβαση 20-05-2025].

[9] E. Nikulski, «Leaflet.markercluster,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://github.com/Leaflet/Leaflet.markercluster. [Πρόσβαση 20-05-2025].

«Το αύριο στα άδυτα της Ψηφιακής Εποχής»

Ζύλης Λάζαρος

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου Τρίπολη

zilislazaros97@gmail.com

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία περιλαμβάνει μια καινοτομία η οποία πρωτοπορεί τα τελευταία χρόνια στον Ψηφιακό Κόσμο, γνωστή και ώς Επαυξημένη – Εικονική Πραγματικότητα.
Μέσα από την εφαρμογή ZapWorks (The Most Powerful All-In-One WebAR Platform) θα πραγματοποιηθεί η αναγέννηση και η αναζωογόνηση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς.
Μνημεία, Αγάλματα καθώς και Σπουδαία Ιστορικά Γεγονότα με 3D Animation Λειτουργίες και Αναλύσεις, θα ''Πάρουν Ζωή'' μέσω της εφαρμογής και θα εμφανιστούν μέσα από την οθόνη στον εκάστοτε χώρο παρουσίασης μπροστά σε όλο το κοινό παρέχοντας ταυτόχρονα και την ενεργή συμμετοχή κάθε ατόμου στην αίθουσα στην πρωτοποριακή Ψηφιακή Δημιουργία αυτή.

Λέξεις Κλειδιά : Επαυξημένη, Αναγέννηση, Πραγματικότητα, Αναζωογόνηση, Ψηφιακή, Δημιουργία.

1. Εισαγωγή

Το κοινό χαρακτηριστικό μεταξύ της εικονικής πραγματικότητας (VR) και της επαυξημένης πραγματικότητας (AR), είναι η εμπειρία της **ψηφιακής «βύθισης»** του χρήστη.

Το AR θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν μια πιο «ενισχυμένη» εκδοχή της πραγματικότητας, καθώς εμπλουτίζεται από ψηφιακά ερεθίσματα με δυνατότητα διάδρασης, σαν μια «διαφάνεια» στην ήδη υπάρχουσα πραγματικότητα.

Από την άλλη, η τεχνολογία VR είναι επίσης μια εμπειρία ψηφιακής «βύθισης», κατά την οποία ο χρήστης ''αποκόπτεται'' από την πραγματικότητα. Στο συγκεκριμένο ψηφιακό περιβάλλον 360 μοιρών το οπτικό μέρος αυτής της εμπειρίας είναι αρκετό για τον ανθρώπινο εγκέφαλο ώστε να την αντιληφθεί ως αληθινή.

Πρόκειται για δύο τεχνολογίες που ήδη εφαρμόζονται σε πολλούς και διάφορους τομείς. Μια συνήθης εφαρμογή της επαυξημένης πραγματικότητας είναι σε σχεδιαστικές εφαρμογές για τη διευκόλυνση επαγγελμάτων, σχετικών με:

- ✓ την αρχιτεκτονική
- ✓ τον αστικό σχεδιασμό
- ✓ την μηχανική κοκ.

Ενώ, η εικονική πραγματικότητα έχει εισέλθει κυρίως σε πεδία που αφορούν:

- ✓ την ιατρική
- ✓ την ψυχική υγεία
- ✓ τον τουρισμό κ.ά.

Ωστόσο, μιλάμε για δύο διαφορετικές εμπειρίες, με τα παρακάτω στοιχεία να καθορίζουν τη διαφορά τους:

1) AR και VR Απαραίτητος Εξοπλισμός

Πρόκειται για την κύρια διαφορά τους. Στη VR τεχνολογία, ο συνήθης εξοπλισμός είναι τα headsets. Ενώ, οι AR συσκευές μπορούν να είναι κινητά (smartphones), tablets και smart glasses.

2) Αίσθηση, Αντίληψη και Κινήσεις

Το VR αντικαθιστά το φυσικό κόσμο με έναν ψηφιακό, σε επίπεδο αισθήσεων. Ο εξοπλισμός του είναι πιο πολύπλοκος και περιλαμβάνει εξωτερικές κάμερες ή αισθητήρες για την ανίχνευση κινήσεων στο χώρο για τη βέλτιστη αισθητηριακή εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσης κινήσεων του κεφαλιού και του σώματος, με σκοπό τη συντονισμένη προσαρμογή του ψηφιακού περιβάλλοντος στην οπτική του χρήστη.

Επιπλέον, το χαρακτηριστικό της πλήρους «βύθισης» του VR, είναι ότι δημιουργεί την ψευδή εντύπωση στο χρήστη, ότι υπάρχουν περισσότερες επιλογές από τις υπάρχουσες. Τα οπτικά στοιχεία ενός VR περιβάλλοντος μπορούν να τον «αποπροσανατολίσουν». Συγκεκριμένα, ένας χρήστης μπορεί να σχηματίσει την εντύπωση της δυνατότητας περισσότερων κινήσεων από ό,τι στην πραγματικά μπορεί να κάνει. Ωστόσο, η αληθοφάνεια αυτής της εμπειρίας δεν περιορίζεται στις κινήσεις του σώματος, αλλά επηρεάζει τη συνολική αντίληψη.

Από την άλλη, η AR εμπειρία μπορεί να οριστεί και σαν μια ‘’διαφανής επικάλυψη’’ στον πραγματικό κόσμο, δηλαδή, οι αισθήσεις και η αντίληψη των χρηστών δε χάνουν την επαφή τους από την πραγματικότητα. [2]

Η συγκεκριμένη Ψηφιακή Δημιουργία παρουσιάζεται σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα QR Codes και Target Images στους παρακάτω συνδέσμους Links :

1) **https://designer.zap.works/2987106555207938488/** →

2) **https://designer.zap.works/2076293539122271590/** →

[1]

2. Συμπεράσματα

Οι σύγχρονες τεχνολογίες και ο ψηφιακός κόσμος, στα σωστά χέρια, μπορούν να ενώσουν γενιές και να φέρουν ξανά στην ζωή έργα και γεγονότα με το πάτημα ενός κουμπιού, καθώς επίσης και να τα διαδραματίσουν. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην Κοινωνία ως ένα ''όπλο'' για πιο αποτελεσματικές μεθόδους σε επιχειρήσεις , έργα και κατασκευές καθώς και στην Εκπαίδευση. Η εκπαίδευση σιγά σιγά ψηφιοποιείται, εξελίσσεται και έχει ολοένα και περισσότερες απαιτήσεις. Μέσω των (AR – VR) και των σύγχρονων διαδραστικών πινάκων σε συνδυασμό με το αντίστοιχο εκπαιδευτικό υλικό οι εκπαιδευόμενοι θα εισχωρήσουν πιο βαθιά στα γνωστικά τους αντικείμενα, θα τα βλέπουν να παίρνουν ζωή μπροστά τους, θα τα ''αγγίζουν'' και θα ενισχύεται και με αυτόν τον τρόπο και το ενδιαφέρον τους για αυτά.
Αποτέλεσμα;
Η κοινωνία θα αποκτήσει ακόμα περισσότερη όρεξη για μάθηση και προσωπική εξέλιξη.

3. Αναφορές

[1] https://zap.works/

[2] https://joistpark.eu/eikoniki-kai-epauksimeni-pragmatikotita/

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΘΛΗΤΙΚΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ

Μαρία Χριστοδημητροπούλου, Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμήμα Οργάνωσης και Διαχείρισης Αθλητισμού, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Σπάρτη, mchristo@uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η ραγδαία πρόοδος των τεχνολογιών Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality – VR) και Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality – AR) έχει αρχίσει να μετασχηματίζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζονται η προπόνηση, η αποκατάσταση και η ανάλυση απόδοσης στον αθλητισμό. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την προσομοίωση ρεαλιστικών αγωνιστικών καταστάσεων, την ενίσχυση της κινητικής μάθησης μέσω άμεσης ανατροφοδότησης, καθώς και την καταγραφή και αξιολόγηση των επιδόσεων με υψηλή ακρίβεια. Παρά τις σημαντικές τους δυνατότητες, η πρακτική ενσωμάτωσή τους στην καθημερινή αθλητική πρακτική παραμένει περιορισμένη, κυρίως λόγω τεχνολογικών, οικονομικών, παιδαγωγικών και επιστημονικών εμποδίων.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να αναλύσει κριτικά τις βασικές προκλήσεις που εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτηση των VR/AR στον αθλητισμό, όπως είναι η έλλειψη πρότυπων εφαρμογών, η απουσία επαρκούς επιστημονικής τεκμηρίωσης, η ανεπαρκής επιμόρφωση των επαγγελματιών του χώρου και οι τεχνικοί περιορισμοί (όπως το cybersickness ή η έλλειψη διαλειτουργικότητας). Παράλληλα, προτείνεται ένα πολυεπίπεδο πλαίσιο αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων, το οποίο βασίζεται στην ανάπτυξη εξειδικευμένων εκπαιδευτικών προγραμμάτων, στην πιλοτική εφαρμογή και αξιολόγηση σε πραγματικά αθλητικά περιβάλλοντα, στη δημιουργία ανοιχτών και χαμηλού κόστους λύσεων, καθώς και στην ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών στις στρατηγικές των αθλητικών οργανισμών.

Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι VR/AR τεχνολογίες δεν αποτελούν απλώς εργαλεία ψηφιακής ενίσχυσης της αθλητικής εμπειρίας, αλλά δυνητικούς πυλώνες ενός ευρύτερου τεχνολογικού μετασχηματισμού της αθλητικής πρακτικής. Η επιτυχής εφαρμογή τους απαιτεί συστημική προσέγγιση, ερευνητική τεκμηρίωση και θεσμική υποστήριξη, προκειμένου να εξασφαλιστεί η βιώσιμη και υπεύθυνη αξιοποίησή τους προς όφελος των αθλητών και του ευρύτερου αθλητικού οικοσυστήματος.

Λέξεις-κλειδιά: Εικονική Πραγματικότητα, Επαυξημένη Πραγματικότητα, Αθλητισμός, Καινοτομία, Προπόνηση, Τεχνολογικός Μετασχηματισμός.

1. Εισαγωγή

Ο αθλητισμός, ως δυναμικό και διαρκώς εξελισσόμενο πεδίο της ανθρώπινης δραστηριότητας, αλληλεπιδρά στενά με την τεχνολογική πρόοδο, αξιοποιώντας νέα μέσα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, της προπόνησης, της αποκατάστασης και της ανάλυσης. Οι τεχνολογίες Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality – VR) και Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality – AR), αν και αρχικά συνδέθηκαν κυρίως με τη βιομηχανία της ψυχαγωγίας και της εκπαίδευσης, έχουν αρχίσει να καταλαμβάνουν ένα διαρκώς αυξανόμενο χώρο και στον αθλητικό τομέα. Οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν πρωτόγνωρες δυνατότητες προσωποποιημένης, διαδραστικής και πολυαισθητηριακής εμπειρίας, επιτρέποντας στους αθλητές να προπονούνται σε εικονικά ή ημι-εικονικά περιβάλλοντα, να λαμβάνουν άμεση ανατροφοδότηση για τις κινήσεις τους και να επαναλαμβάνουν πολύπλοκα σενάρια χωρίς φυσικούς ή χρονικούς περιορισμούς.

Η ενσωμάτωση των VR/AR εφαρμογών στον αθλητισμό έχει ήδη αρχίσει να επιφέρει αλλαγές σε πολλαπλά επίπεδα: από την τεχνική εκπαίδευση και την τακτική ανάλυση, έως την ψυχολογική προετοιμασία και την αποκατάσταση τραυματισμών. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση τέτοιων εργαλείων μπορεί να βελτιώσει τη γνωστικο-κινητική μάθηση, να ενισχύσει την αντιληπτική ετοιμότητα, και να παρέχει ένα ασφαλές και ελεγχόμενο περιβάλλον για την αξιολόγηση και τη βελτίωση της απόδοσης [1], [2]. Εντούτοις, η μετάβαση από την ερευνητική εφαρμογή στην καθημερινή πρακτική απέχει ακόμη από την πλήρη πραγματοποίησή της.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη συστηματική ανάλυση των προκλήσεων που αντιμετωπίζει η ενσωμάτωση της VR/AR στον αθλητισμό και προτείνει μια στοχευμένη προσέγγιση για την αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών ως βασικών μοχλών καινοτομίας. Μελετώνται τόσο οι τεχνικές και παιδαγωγικές παράμετροι, όσο και οι θεσμικές και οργανωτικές προϋποθέσεις για την επιτυχή ενσωμάτωσή τους σε διάφορα επίπεδα αθλητικής πρακτικής – από τον ερασιτεχνικό αθλητισμό έως τον υψηλό ανταγωνισμό.

2. Περιγραφή Προβλήματος

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών Εικονικής Πραγματικότητας (VR) και Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) στον χώρο του αθλητισμού, παρά τις σαφείς προοπτικές τους, συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις τόσο τεχνολογικού όσο και λειτουργικού χαρακτήρα. Οι προκλήσεις αυτές αφορούν την τεχνολογική υποδομή, την παιδαγωγική εφαρμογή, την επιστημονική τεκμηρίωση, αλλά και τα φυσιολογικά όρια των αθλητών.

2.1 Τεχνολογική και Οικονομική Πρόσβαση

Η υλοποίηση περιβαλλόντων VR/AR υψηλής ποιότητας απαιτεί σημαντικούς πόρους σε εξοπλισμό (head-mounted displays, motion tracking, ισχυρούς υπολογιστές), γεγονός που καθιστά την τεχνολογία μη προσβάσιμη για μικρούς συλλόγους, σχολικές ομάδες ή ερασιτεχνικούς αθλητές [1]. Επιπλέον, η ταχεία απαξίωση του εξοπλισμού και η ανάγκη συνεχούς τεχνικής υποστήριξης αυξάνουν περαιτέρω το κόστος ιδιοκτησίας.

2.2 Έλλειψη Εκπαιδευτικής και Τεχνικής Υποστήριξης

Οι προπονητές και οι αθλητές, παρά τη θετική στάση απέναντι στις καινοτομίες, συχνά στερούνται της απαραίτητης εκπαίδευσης ώστε να ενσωματώσουν λειτουργικά τις εφαρμογές VR/AR στην καθημερινή τους πρακτική [2]. Αυτό οδηγεί είτε σε αποσπασματική χρήση είτε σε πλήρη εγκατάλειψη των εργαλείων αυτών, αν δεν υπάρχει σαφές πλαίσιο παιδαγωγικής αξιοποίησης.

2.3 Έλλειψη Επαρκούς Επιστημονικής Τεκμηρίωσης

Αν και υπάρχει αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον, οι περισσότερες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε εργαστηριακά περιβάλλοντα, με μικρό μέγεθος δείγματος και περιορισμένη εξωτερική εγκυρότητα [3]. Υπάρχει σαφής ανάγκη για μακροχρόνιες, κλινικά τεκμηριωμένες έρευνες πεδίου που θα αποδείξουν την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των VR/AR εργαλείων σε διάφορα αθλήματα, ηλικιακές ομάδες και επίπεδα επιδόσεων.

2.4 Ψυχοφυσιολογικοί Περιορισμοί

Η χρήση VR μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα όπως το "cybersickness" – ναυτία, αποπροσανατολισμός, κόπωση – ιδιαίτερα σε αθλητές που εκτελούν πολύπλοκες κινήσεις σε δυναμικά περιβάλλοντα [4]. Επίσης, η AR απαιτεί υψηλής ακρίβειας συγχρονισμό μεταξύ ψηφιακής πληροφορίας και πραγματικού χώρου· οποιαδήποτε ασυμφωνία μπορεί να επηρεάσει την αίσθηση της θέσης και να οδηγήσει σε τραυματισμούς ή μειωμένη απόδοση [5].

2.5 Διαλειτουργικότητα και Προτυποποίηση

Η έλλειψη κοινών προτύπων και διεπαφών (APIs, data formats) μεταξύ VR/AR εφαρμογών και υπαρχόντων συστημάτων συλλογής δεδομένων (π.χ. wearables, GPS tracking) περιορίζει τις δυνατότητες ολοκληρωμένης αξιολόγησης της απόδοσης των αθλητών [6].

3. Προτεινόμενη Λύση

Η επιτυχής ενσωμάτωση των τεχνολογιών VR και AR στον αθλητισμό προϋποθέτει μια πολυεπίπεδη, συστημική προσέγγιση που εστιάζει στην τεχνολογική προσαρμογή, στην εκπαιδευτική υποστήριξη και στη μεθοδολογική τεκμηρίωση. Η παρακάτω δέσμη προτάσεων αποτελεί ένα ολοκληρωμένο στρατηγικό πλαίσιο για τον τεχνολογικό μετασχηματισμό της αθλητικής πρακτικής.

3.1 Ανάπτυξη Εξειδικευμένων Εκπαιδευτικών Προγραμμάτων

Η διαθεματική επιμόρφωση των προπονητών, φυσιοθεραπευτών και αθλητών στις βασικές αρχές χρήσης VR/AR μπορεί να διασφαλίσει την αποτελεσματική εφαρμογή της τεχνολογίας. Τα εκπαιδευτικά προγράμματα πρέπει να συνδυάζουν τεχνική κατάρτιση με παιδαγωγικές πρακτικές προσαρμοσμένες στα χαρακτηριστικά κάθε αθλήματος [7]. Η δημιουργία εγχειριδίων, workshops και διαδικτυακών μαθημάτων (MOOCs) θα ενισχύσει τη διάχυση της γνώσης.

3.2 Πιλοτικές Παρεμβάσεις και Πειραματικές Εφαρμογές

Η σχεδίαση και εφαρμογή πιλοτικών παρεμβάσεων σε αθλητικές ακαδημίες και επαγγελματικούς συλλόγους μπορεί να αποφέρει πολύτιμα δεδομένα αξιολόγησης και βελτιστοποίησης των τεχνολογιών VR/AR. Οι παρεμβάσεις αυτές πρέπει να είναι μετρήσιμες, με σαφείς δείκτες απόδοσης (π.χ. χρόνος αντίδρασης, ακρίβεια κίνησης, αυτοαναφερόμενα επίπεδα εμπιστοσύνης) και με δυνατότητα αναπαραγωγής [8].

3.3 Ανάπτυξη Χαμηλού Κόστους Εφαρμογών και Ανοιχτών Πλατφορμών

Η δημιουργία εφαρμογών ελαφριάς λειτουργίας (lite AR apps) για φορητές συσκευές και συστήματα AR μέσω mobile ή web-based πλατφορμών, επιτρέπει την πρόσβαση ευρύτερων πληθυσμών αθλητών και εκπαιδευτών. Παράλληλα, η υιοθέτηση ανοιχτού λογισμικού (open source VR platforms) μειώνει το κόστος και διευκολύνει τη συνεργατική ανάπτυξη [9].

3.4 Διαμόρφωση Πλαισίου Αξιολόγησης και Πιστοποίησης

Προτείνεται η δημιουργία διεθνών προτύπων αξιολόγησης εφαρμογών VR/AR στον αθλητισμό, ώστε να διασφαλίζεται η επιστημονική εγκυρότητα, η χρηστικότητα και η ασφάλεια των εργαλείων. Η εμπλοκή διεθνών αθλητικών οργανισμών και ερευνητικών ιδρυμάτων μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία πιστοποίησης και αποδοχής από την ευρύτερη αθλητική κοινότητα [10].

3.5 Ενσωμάτωση της VR/AR στη Στρατηγική Αθλητικών Οργανισμών

Τέλος, η τεχνολογική καινοτομία πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της στρατηγικής ανάπτυξης αθλητικών οργανισμών, με επενδύσεις σε R&D, συνεργασίες με startup εταιρείες και συμμετοχή σε ευρωπαϊκά προγράμματα τεχνολογίας και αθλητισμού.

4. Συμπεράσματα

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών Εικονικής Πραγματικότητας (VR) και Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) στον αθλητισμό συνιστά μια πολυδιάστατη τεχνολογική καινοτομία που δύναται να αναδιαμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο οι αθλητές προπονούνται, αποκαθίστανται, εκπαιδεύονται και αξιολογούνται. Η VR/AR όχι μόνο διευρύνει τις δυνατότητες προσωποποιημένης μάθησης και βιωματικής εξάσκησης, αλλά και εισάγει νέες διαστάσεις ανατροφοδότησης, παρακολούθησης επιδόσεων και ψυχολογικής ενδυνάμωσης.

Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών συνοδεύεται από μια σειρά κρίσιμων περιορισμών που σχετίζονται με την προσβασιμότητα, την επιστημονική τεκμηρίωση, την εκπαιδευτική ετοιμότητα και τη διαλειτουργικότητα. Αυτά τα εμπόδια, αν δεν αντιμετωπιστούν ολιστικά, μπορεί να μετατρέψουν μια επαναστατική καινοτομία σε τεχνολογικό πυροτέχνημα περιορισμένης απήχησης.

Η προτεινόμενη λύση προσφέρει έναν ρεαλιστικό και εφαρμόσιμο οδικό χάρτη. Η επιτυχής υλοποίηση αυτής της προσέγγισης απαιτεί συνέργεια μεταξύ της επιστημονικής κοινότητας, των τεχνολογικών παρόχων και των ίδιων των αθλητικών φορέων, ώστε να διασφαλιστεί ότι η τεχνολογία εξυπηρετεί τις ανάγκες του αθλητή και όχι το αντίστροφο.

Σε αυτό το πλαίσιο, η VR/AR δεν πρέπει να θεωρείται απλώς τεχνολογική προσθήκη, αλλά ουσιαστικό εργαλείο μετασχηματισμού της αθλητικής εμπειρίας. Η πρόκληση έγκειται όχι μόνο στην τεχνολογική ετοιμότητα, αλλά και στη θεσμική, πολιτισμική και παιδαγωγική ωριμότητα για να αξιοποιηθεί το δυναμικό της πλήρως και υπεύθυνα.

5. Αναφορές

[1] Gadelha, M. R., et al. (2021). *Virtual reality in sports: A systematic review*. Journal of Human Sport and Exercise, 16(1), 123–139.
[2] Faure, C., & Mester, J. (2019). *Virtual and augmented reality in sport: Applications and perspectives*. European Journal of Sport Science, 19(1), 1–10.
[3] Neumann, D. L., et al. (2018). *A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport*. Virtual Reality, 22, 183–198.
[4] Wiederhold, B. K., & Riva, G. (2019). *Virtual reality treatment of cybersickness: An updated review*. Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking, 22(6), 383–386.
[5] Dünser, A., et al. (2012). *Augmented Reality in sports training: A case study*. ACM SIGGRAPH Asia.
[6] Bideau, B., Kulpa, R., & Multon, F. (2020). *Virtual reality, augmented reality and mixed reality in sport performance*. In Virtual and Augmented Reality for Sport Performance (pp. 3–18). Springer.
[7] Tang, Y. M., et al. (2021). *The role of training and professional development in the adoption of VR in education and sport*. Interactive Learning Environments.
[8] Pagé, C., & Bernier, M. (2020). *Designing VR training simulations in high-performance sport: Methodological considerations*. Journal of Sports Sciences, 38(6), 633–640.
[9] Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). *Enhancing our lives with immersive virtual reality*. Frontiers in Robotics and AI, 3, 74.
[10] International Olympic Committee (IOC). (2022). *Framework for Technology and Innovation in Sport*. Lausanne: IOC Innovation Unit.

Η Επίδραση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη Νοσηλευτική Εκπαίδευση

Αναστάσιος Λυμπερόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Νοσηλευτικής, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη,taslyb@uop.gr
Μαρία Χριστοδημητροπούλου, Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμήμα Οργάνωσης και Διαχείρισης Αθλητισμού, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Σπάρτη, mchristo@uop.gr
11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ) αποτελεί ένα αναδυόμενο εργαλείο με σημαντική επίδραση σε πολλούς τομείς, μεταξύ των οποίων και η εκπαίδευση στις επιστήμες υγείας. Η νοσηλευτική εκπαίδευση, με τις αυξανόμενες απαιτήσεις και τις συνεχώς εξελισσόμενες κλινικές πρακτικές, καλείται να υιοθετήσει τεχνολογικές καινοτομίες ώστε να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα της μάθησης και να εξοπλίσει τους φοιτητές με δεξιότητες προσαρμογής. Στην εργασία αυτή εξετάζεται η εφαρμογή της ΤΝ στην εκπαίδευση των νοσηλευτών και οι δυνατότητές της να ενισχύσει τόσο τη θεωρητική κατάρτιση όσο και την κλινική ετοιμότητα των φοιτητών.

Αναλύεται αρχικά το πρόβλημα της παραδοσιακής διδασκαλίας, η οποία συχνά αδυνατεί να καλύψει τις εξατομικευμένες ανάγκες των φοιτητών και να προσφέρει επαρκή πρακτική εμπειρία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εφαρμογές ΤΝ όπως οι εικονικοί προσομοιωτές, τα συστήματα προσαρμοστικής μάθησης, οι εικονικοί βοηθοί και η ανάλυση εκπαιδευτικών δεδομένων. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, ενίσχυση της κλινικής κρίσης και προσωπική υποστήριξη, βελτιώνοντας την ποιότητα και την προσβασιμότητα της εκπαίδευσης [1][2].

Παρόλο που οι δυνατότητες της ΤΝ είναι σημαντικές, η εφαρμογή της συνοδεύεται από προκλήσεις, όπως ζητήματα ηθικής, προστασίας δεδομένων και ανάγκης επιμόρφωσης του διδακτικού προσωπικού [3]. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η ΤΝ δεν αντικαθιστά τον εκπαιδευτή, αλλά ενισχύει το ρόλο του, προσφέροντας μια δυναμική και προσαρμοστική μαθησιακή εμπειρία. Η προσεκτική και στρατηγική ενσωμάτωσή της μπορεί να φέρει ουσιαστικές αλλαγές στη νοσηλευτική εκπαίδευση, συμβάλλοντας στην καλλιέργεια ικανών και καινοτόμων επαγγελματιών υγείας [4][5].

Λέξεις κλειδιά Τεχνητή Νοημοσύνη, Νοσηλευτική Εκπαίδευση, Εκπαιδευτική, Τεχνολογία, Προσομοίωση Μάθησης, Ψηφιακά Εκπαιδευτικά Εργαλεία, Καινοτομία στην Υγειονομική Εκπαίδευση

1. Εισαγωγή

Η Νοσηλευτική αποτελεί μια από τις βασικότερες και πιο απαιτητικές επιστήμες υγείας, με στόχο την παροχή ποιοτικής φροντίδας στους ασθενείς και την υποστήριξη των ιατρικών θεραπειών. Η εκπαίδευση των νοσηλευτών παίζει καίριο ρόλο στην προετοιμασία ικανών επαγγελματιών που θα ανταποκριθούν στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες των συστημάτων υγείας. Τα τελευταία χρόνια, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει η νοσηλευτική εκπαίδευση γίνονται ολοένα και πιο σύνθετες, καθώς οι εξελίξεις στην τεχνολογία, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των κλινικών περιστατικών και οι αυξημένες απαιτήσεις για ασφαλή και εξατομικευμένη φροντίδα δημιουργούν νέες ανάγκες.

Στο πλαίσιο αυτό, η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ) έχει αναδειχθεί ως μια τεχνολογική καινοτομία με τεράστιο δυναμικό, ικανή να μεταμορφώσει την εκπαιδευτική διαδικασία σε πολλούς τομείς, μεταξύ αυτών και στη νοσηλευτική. Η ΤΝ, με την ικανότητα να επεξεργάζεται μεγάλες ποσότητες δεδομένων, να μαθαίνει από πρότυπα και να προσαρμόζεται σε ατομικές ανάγκες, προσφέρει νέους τρόπους για την υποστήριξη της μάθησης, την ανάπτυξη δεξιοτήτων και την αξιολόγηση της απόδοσης.

Η ενσωμάτωση της ΤΝ στη νοσηλευτική εκπαίδευση δεν αποτελεί απλώς μια τεχνολογική εξέλιξη, αλλά μια αναγκαία προσαρμογή στο σύγχρονο περιβάλλον υγείας και μάθησης. Με τη βοήθεια της ΤΝ, είναι εφικτό να δημιουργηθούν πιο ευέλικτα, διαδραστικά και εξατομικευμένα προγράμματα εκπαίδευσης, που ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες των φοιτητών και των επαγγελματιών.

Παράλληλα, η ενσωμάτωση της ΤΝ συμβάλλει στην αντιμετώπιση βασικών προβλημάτων της παραδοσιακής εκπαίδευσης, όπως η έλλειψη επαρκούς πρακτικής εξάσκησης, η καθυστερημένη ή γενική ανατροφοδότηση και οι περιορισμοί σε πόρους και ανθρώπινο δυναμικό. Επιπλέον, η χρήση της ΤΝ μπορεί να ενισχύσει την ανάπτυξη κριτικής σκέψης, κλινικής κρίσης και δεξιοτήτων λήψης αποφάσεων, που είναι απαραίτητες για την επιτυχή άσκηση του νοσηλευτικού επαγγέλματος.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να εξετάσει την επίδραση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη νοσηλευτική εκπαίδευση, να αναδείξει τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η εκπαιδευτική διαδικασία και να παρουσιάσει τις καινοτόμες λύσεις που προσφέρει η ΤΝ. Μέσα από τη διερεύνηση εφαρμογών, όπως οι προσομοιωτές, τα προσαρμοστικά μαθησιακά συστήματα και οι εικονικοί βοηθοί, αναδεικνύεται ο μετασχηματιστικός ρόλος της ΤΝ που υπόσχεται τη βελτίωση της ποιότητας της εκπαίδευσης και την προετοιμασία ικανών, ευέλικτων και καινοτόμων νοσηλευτών για το μέλλον.

2. Περιγραφή Προβλήματος

Η παραδοσιακή νοσηλευτική εκπαίδευση αντιμετωπίζει σοβαρά και διαχρονικά προβλήματα που περιορίζουν την ποιότητα και την αποτελεσματικότητά της. Ένα από τα βασικά ζητήματα είναι η περιορισμένη εξατομίκευση της μάθησης. Οι φοιτητές νοσηλευτικής έχουν διαφορετικά γνωστικά επίπεδα, ρυθμούς μάθησης και στυλ κατανόησης· ωστόσο, το ενιαίο διδακτικό μοντέλο δεν καλύπτει αυτές τις διαφοροποιημένες ανάγκες [2].

Επιπλέον, υπάρχει ανεπαρκής πρακτική εξάσκηση. Η εκπαίδευση στο νοσοκομειακό περιβάλλον είναι περιορισμένη από τον αριθμό των περιστατικών, την ασφάλεια των ασθενών και τη διαθεσιμότητα εποπτών. Ως αποτέλεσμα, πολλοί φοιτητές αποφοιτούν χωρίς επαρκή κλινική αυτοπεποίθηση και ικανότητα λήψης αποφάσεων σε πραγματικές συνθήκες [4].

Ένα ακόμα πρόβλημα είναι η απουσία άμεσης και προσωποποιημένης ανατροφοδότησης. Η αξιολόγηση των επιδόσεων των φοιτητών βασίζεται κυρίως σε τελικές εξετάσεις και υποκειμενικά κριτήρια, με αποτέλεσμα να μην εντοπίζονται έγκαιρα οι αδυναμίες και να μην παρέχεται στοχευμένη υποστήριξη [1].

Επιπρόσθετα, η υπερφόρτωση των εκπαιδευτών αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην αποτελεσματική διδασκαλία. Οι καθηγητές νοσηλευτικής συχνά καλούνται να διαχειριστούν πολυπληθή τμήματα, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ουσιαστική αλληλεπίδραση και καθοδήγηση.

Τέλος, η έλλειψη τεχνολογικής ενσωμάτωσης στη μαθησιακή διαδικασία εμποδίζει την προσαρμογή της εκπαίδευσης στις σύγχρονες απαιτήσεις του επαγγέλματος, το οποίο πλέον βασίζεται ολοένα και περισσότερο σε ψηφιακά συστήματα, ηλεκτρονικούς φακέλους ασθενών και αυτοματοποιημένα πρωτόκολλα [3].

Αθροιστικά, τα παραπάνω προβλήματα δημιουργούν ένα περιβάλλον όπου η μάθηση είναι αποσπασματική, η πρακτική εφαρμογή ανεπαρκής και η αξιολόγηση μη αντιπροσωπευτική. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ανάγκη για μετασχηματισμό της νοσηλευτικής εκπαίδευσης μέσω της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι επιτακτική και ρεαλιστική.

3. Προτεινόμενη Λύση

Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (ΤΝ) στη νοσηλευτική εκπαίδευση προσφέρει καινοτόμες δυνατότητες που μπορούν να μετασχηματίσουν τον τρόπο με τον οποίο οι φοιτητές μαθαίνουν και εξασκούνται, καθώς και τον τρόπο που αξιολογούνται. Οι βασικές εφαρμογές της ΤΝ χωρίζονται σε διάφορους τομείς, οι οποίοι συνολικά αποσκοπούν στην εξατομίκευση της μάθησης, την πρακτική εξάσκηση σε ελεγχόμενο περιβάλλον, την άμεση και συνεχή ανατροφοδότηση και την υποστήριξη των εκπαιδευτών.

3.1 Έξυπνες Προσομοιώσεις και Εικονική Πραγματικότητα (VR)

Η ΤΝ μπορεί να συνδυαστεί με τεχνολογίες εικονικής πραγματικότητας για τη δημιουργία ρεαλιστικών, διαδραστικών προσομοιώσεων κλινικών καταστάσεων. Μέσω αυτών, οι φοιτητές νοσηλευτικής μπορούν να ασκηθούν σε σενάρια όπως η διαχείριση επείγουσας κατάστασης, η φροντίδα ασθενών με χρόνια νοσήματα ή η αντιμετώπιση επιπλοκών, χωρίς να εκτίθενται σε κίνδυνο πραγματικοί ασθενείς [3]. Η ΤΝ ενσωματώνει μηχανισμούς αξιολόγησης της συμπεριφοράς και της απόδοσης, δίνοντας ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, κάτι που βελτιώνει σημαντικά την εκμάθηση και ενισχύει την κλινική κρίση.

3.2 Προσαρμοστικά Μαθησιακά Συστήματα (Adaptive Learning)

Τα συστήματα προσαρμοστικής μάθησης χρησιμοποιούν αλγορίθμους ΤΝ για να αναλύσουν το προφίλ μάθησης κάθε φοιτητή, τον ρυθμό προόδου και τα σημεία αδυναμίας. Με βάση αυτά τα δεδομένα, προσαρμόζουν δυναμικά το εκπαιδευτικό υλικό, τις ασκήσεις και τα τεστ, προσφέροντας εξατομικευμένη μάθηση. Αυτό το μοντέλο όχι μόνο αυξάνει την αποδοτικότητα της μάθησης αλλά ενισχύει και το κίνητρο των φοιτητών, καθώς λαμβάνουν στοχευμένη υποστήριξη που ανταποκρίνεται στις ανάγκες τους [1][5].

3.3 Εικονικοί Βοηθοί και Chatbots

Οι εικονικοί βοηθοί βασισμένοι σε ΤΝ λειτουργούν ως προσωπικοί σύμβουλοι μάθησης που είναι διαθέσιμοι 24/7. Μπορούν να απαντήσουν σε ερωτήσεις φοιτητών, να προτείνουν συμπληρωματικό υλικό και να κατευθύνουν σε συγκεκριμένα κεφάλαια ανάλογα με το επίπεδο και το ενδιαφέρον τους. Επιπλέον, υποστηρίζουν την αυτονομία στη μάθηση και μειώνουν την επιβάρυνση των εκπαιδευτών, επιτρέποντας να επικεντρωθούν περισσότερο σε δημιουργικές και διδακτικές δραστηριότητες [4].

3.4 Ανάλυση Εκπαιδευτικών Δεδομένων (Learning Analytics)

Η ΤΝ δίνει τη δυνατότητα συλλογής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων σχετικά με τη μαθησιακή δραστηριότητα των φοιτητών. Μέσω της ανάλυσης αυτών των δεδομένων, μπορούν να εντοπιστούν πρότυπα συμπεριφοράς, να προβλεφθούν δυσκολίες πριν αυτές εμφανιστούν και να σχεδιαστούν παρεμβάσεις εξατομικευμένης υποστήριξης. Αυτό οδηγεί σε μια πιο επιστημονική και τεκμηριωμένη προσέγγιση στην εκπαίδευση [2][5].

3.5 Υποστήριξη Εκπαιδευτών μέσω ΤΝ

Εκτός από τη στήριξη των φοιτητών, η ΤΝ μπορεί να βοηθήσει και τους εκπαιδευτές με αυτοματοποιημένες λειτουργίες όπως η διόρθωση εργασιών, η παρακολούθηση της προόδου του συνόλου των φοιτητών, και η παροχή δεδομένων που διευκολύνουν τη λήψη εκπαιδευτικών αποφάσεων. Έτσι, οι εκπαιδευτές απαλλάσσονται από χρονοβόρες διαδικασίες και εστιάζουν περισσότερο στην ποιοτική καθοδήγηση και στην ανάπτυξη καινοτόμων διδακτικών μεθόδων.

3.6 Διαχείριση Ψυχολογικής και Συναισθηματικής Υποστήριξης

Νεότερες εφαρμογές ΤΝ εξετάζουν την δυνατότητα υποστήριξης των φοιτητών νοσηλευτικής και σε ψυχολογικό επίπεδο, αναγνωρίζοντας σημάδια άγχους ή εξουθένωσης μέσα από την ανάλυση συμπεριφορικών δεδομένων. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία για παρεμβάσεις που διασφαλίζουν την ψυχολογική ευεξία και προάγουν τη διατήρηση της μάθησης σε υψηλό επίπεδο.

Η υιοθέτηση των παραπάνω εφαρμογών απαιτεί ολοκληρωμένο σχεδιασμό, συνεργασία μεταξύ τεχνολόγων, εκπαιδευτών και κλινικών φορέων, καθώς και συνεχή αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των τεχνολογιών. Με σωστή ενσωμάτωση, η ΤΝ μπορεί να γίνει ακρογωνιαίος λίθος στη διαμόρφωση μιας σύγχρονης, ευέλικτης και προσαρμοστικής νοσηλευτικής εκπαίδευσης.

4. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε την καθοριστική σημασία της Τεχνητής Νοημοσύνης (ΤΝ) στη σύγχρονη νοσηλευτική εκπαίδευση, καθώς και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο παραδοσιακός τρόπος εκπαίδευσης. Είναι πλέον σαφές ότι η ενσωμάτωση των τεχνολογιών ΤΝ δεν αποτελεί απλώς μια καινοτομία, αλλά μια αναγκαία εξέλιξη για την αποτελεσματικότερη προετοιμασία των νοσηλευτών απέναντι στις αυξανόμενες απαιτήσεις του επαγγέλματος.

Τα πλεονεκτήματα της ΤΝ στη νοσηλευτική εκπαίδευση είναι πολυδιάστατα. Η εξατομίκευση της μάθησης μέσω προσαρμοστικών συστημάτων επιτρέπει την κάλυψη των διαφοροποιημένων αναγκών κάθε φοιτητή, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και το ενδιαφέρον στη μαθησιακή διαδικασία. Η δυνατότητα εξάσκησης σε εικονικά περιβάλλοντα και προσομοιώσεις βελτιώνει την κλινική εμπειρία, μειώνοντας παράλληλα τους κινδύνους για τους ασθενείς και ενισχύοντας την αυτοπεποίθηση των εκπαιδευόμενων.

Επιπλέον, η χρήση ΤΝ για άμεση και διαρκή ανατροφοδότηση, καθώς και η ανάλυση εκπαιδευτικών δεδομένων, επιτρέπουν την έγκαιρη διάγνωση μαθησιακών δυσκολιών και την αποτελεσματικότερη υποστήριξη. Αυτή η επιστημονική προσέγγιση βελτιώνει συνολικά την ποιότητα της εκπαίδευσης, καθιστώντας τη πιο ευέλικτη και ανταποκρινόμενη στις σύγχρονες απαιτήσεις.

Ωστόσο, η υιοθέτηση της ΤΝ συνοδεύεται από προκλήσεις, όπως η ανάγκη για επαρκή εκπαίδευση εκπαιδευτών και φοιτητών στη χρήση των νέων τεχνολογιών, η εξασφάλιση της προστασίας προσωπικών δεδομένων και η αποφυγή της υπερβολικής εξάρτησης από τα αυτόματα συστήματα. Επιπρόσθετα, απαιτείται στενή συνεργασία μεταξύ εκπαιδευτικών φορέων, τεχνολόγων και κλινικών δομών για τον βέλτιστο σχεδιασμό και εφαρμογή των ΤΝ εφαρμογών.

Συνοψίζοντας, η Τεχνητή Νοημοσύνη προσφέρει τη δυνατότητα να μετασχηματιστεί η νοσηλευτική εκπαίδευση σε ένα δυναμικό, εξατομικευμένο και τεχνολογικά υποστηριζόμενο πεδίο μάθησης. Η συνεπής αξιοποίηση της ΤΝ μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη ικανών και ευέλικτων νοσηλευτών, έτοιμων να ανταποκριθούν στις σύγχρονες προκλήσεις της υγειονομικής περίθαλψης, συμβάλλοντας παράλληλα στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών και της αποτελεσματικότητας των συστημάτων υγείας.

5. Αναφορές

[1] Skiba, D. J. (2017). The potential of artificial intelligence in nursing education. *Nursing Education Perspectives*, 38(4), 230–231.
[2] Topaz, M., & Pruinelli, L. (2017). Big data and nursing: Implications for practice and education. *Nursing Outlook*, 65(5), 494-501.
[3] Davenport, T., & Kalakota, R. (2019). The potential for artificial intelligence in healthcare. *Future Healthcare Journal*, 6(2), 94–98.
[4] Jang, H., & Lee, M. (2020). Virtual simulation in nursing education: Effects and barriers. *Nurse Education Today*, 87, 104345.
[5] Yu, K. H., Beam, A. L., & Kohane, I. S. (2018). Artificial intelligence in healthcare. *Nature Biomedical Engineering*, 2(10), 719–731.

ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΓΥΑΛΙΩΝ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΔΗΜΟΤΙΚΟ: Πλεονεκτήματα, Δείκτες Απόδοσης, Προδιαγραφές Λογισμικού και Σχεδιασμός Αξιολόγησης

Μαλτέζου Δέσποινα, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, dmaltezou@gmail.com

Επιβλέπων καθηγητής: Dr Manolis Wallace

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τις δυνατότητες της Εικονικής Πραγματικότητας (VR) να μετασχηματίσουν την πρωτοβάθμια εκπαίδευση. Αναλύει τα παιδαγωγικά πλεονεκτήματα της VR, όπως η ενισχυμένη δέσμευση, τα βελτιωμένα μαθησιακά αποτελέσματα, η καλλιέργεια γνωστικών και κοινωνικο-συναισθηματικών δεξιοτήτων, και η αύξηση της εκπαιδευτικής προσβασιμότητας. Προσδιορίζονται βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) για τη μέτρηση του αντίκτυπου της VR, οι οποίοι αντιστοιχίζονται με την Αναθεωρημένη Ταξινόμηση του Bloom. Παρέχονται επίσης προδιαγραφές για τα απαραίτητα λογισμικά και περιεχόμενο VR, καθώς και πρακτικές οδηγίες για τον σχεδιασμό φύλλων εργασίας και εργαλείων αξιολόγησης. Η έκθεση τονίζει την ανάγκη για προσεκτικό σχεδιασμό και τήρηση των οδηγιών ασφαλείας για την επιτυχή ενσωμάτωση της VR στα δημοτικά σχολεία.

Λέξεις κλειδιά :VR, Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση, μέτρηση KPI, Bloom

1 Εισαγωγή

Η Εικονική Πραγματικότητα (VR) ορίζεται ως μια αναδυόμενη τεχνολογία που δημιουργεί εμβυθιστικά και διαδραστικά περιβάλλοντα που προσομοιώνονται μέσω υπολογιστή, με τα οποία οι χρήστες μπορούν να εξερευνήσουν και να αλληλεπιδράσουν, κυρίως μέσω γυαλιών VR.[1] Αυτή η τεχνολογία βασίζεται σε τρία χαρακτηριστικά: την παρουσία (την αίσθηση του να είσαι φυσικά "εκεί"), τη διαδραστικότητα (την ικανότητα να επηρεάζεις το εικονικό περιβάλλον) και την εμβύθιση (το θάμπωμα της γραμμής μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου).[2]

1.1 Παιδαγωγικά Πλεονεκτήματα της VR στο Δημοτικό Σχολείο

1.1.1 Ενισχυμένη Δέσμευση και Κίνητρο

Η VR αυξάνει σημαντικά τη δέσμευση και το κίνητρο των μαθητών, καθιστώντας τη μάθηση δυναμική και διαδραστική [2]. Αυτή η ενισχυμένη δέσμευση πηγάζει από την ικανότητα της VR να δημιουργεί εμβυθιστικές, πολυαισθητηριακές εμπειρίες που μειώνουν τους περισπασμούς και προκαλούν συναισθηματική σύνδεση με το περιεχόμενο.[5]

1.1.2 Βελτιωμένα Μαθησιακά Αποτελέσματα και Διατήρηση Γνώσης

Οι μαθητές που μαθαίνουν σε εικονικό περιβάλλον επιτυγχάνουν σημαντικά υψηλότερες μαθησιακές βαθμολογίες. Η VR μπορεί να βελτιώσει τη διατήρηση της γνώσης έως και 75% σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, με ορισμένες μελέτες να αναφέρουν διατήρηση σχεδόν 80% μετά από ένα χρόνο.[5]

1.1.3 Καλλιέργεια Γνωστικής Ανάπτυξης

Η VR βοηθά στην κατανόηση σύνθετων και αφηρημένων εννοιών (π.χ., STEM, γεωμετρία) καθιστώντας τες απτές και διαδραστικές σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον.[2] Βελτιώνει τις δεξιότητες οπτικής σκέψης, τη χωρική επίγνωση, τη διατήρηση της μνήμης και τις ικανότητες επίλυσης προβλημάτων.Η VR είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την εκμάθηση διαδικαστικής γνώσης, καθώς επιτρέπει στους μαθητές να χειρίζονται εικονικά αντικείμενα και να διεξάγουν πειράματα.[3]

1.1.4 Προώθηση Κοινωνικο-Συναισθηματικών Δεξιοτήτων

Η VR είναι ένα "μέσο που προκαλεί ενσυναίσθηση" [6] που επιτρέπει στους χρήστες να "μπουν στη θέση κάποιου άλλου", ενισχύοντας την ενσυναίσθηση και την πολιτισμική κατανόηση.[5] Ενθαρρύνει τη συνεργασία και την ομαδική εργασία μέσω κοινών εικονικών εμπειριών και λειτουργιών πολλαπλών παικτών.[5]

1.1.5 Προσβάσιμη και Ασφαλής Βιωματική Μάθηση

Η VR παρέχει περιβάλλοντα χωρίς κίνδυνο για την εξάσκηση σε επικίνδυνα ή ακριβά σενάρια.[3] και [5]. Προσφέρει εκπαιδευτική προσβασιμότητα για μαθητές που δεν μπορούν να παρακολουθήσουν το σχολείο αυτοπροσώπως (π.χ. λόγω ασθένειας). Οι εικονικές εκδρομές αποτελούν μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση για τις παραδοσιακές εκδρομές, εξασφαλίζοντας 100% συμμετοχή και συμπερίληψη [7] και [5]. Παρ' όλα αυτά τα πλεονεκτήματα, οι μελέτες που έχουν γίνει για την Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση είναι σαφώς λιγότερες [4].

2 Περιγραφή Προβλήματος

2.1 Μέτρηση Αντίκτυπου: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs) και Ευθυγράμμιση με την Ταξινόμηση του Bloom

Για να μετρήσουμε τον πραγματικό αντίκτυπο της VR στην εκπαίδευση, πρέπει να ορίσουμε **συγκεκριμένους, μετρήσιμους, εφικτούς, σχετικούς και χρονικά δεσμευμένους (SMART)** δείκτες απόδοσης. Αυτοί οι δείκτες δεν πρέπει να περιορίζονται μόνο στην ακαδημαϊκή επίδοση, αλλά να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μαθησιακών αποτελεσμάτων που η VR μπορεί να επηρεάσει. Η αντιστοίχισή τους με την **Ταξινόμηση του Bloom** μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε όχι μόνο τι θυμούνται οι μαθητές, αλλά και το βάθος της κατανόησής τους και την ικανότητά τους να εφαρμόζουν, να αναλύουν, να αξιολογούν και να δημιουργούν.

2.1.1 Προσδιορισμός Μετρήσιμων KPIs

Η μέτρηση της αποτελεσματικότητας της VR στην εκπαίδευση περιλαμβάνει την παρακολούθηση των μαθησιακών αποτελεσμάτων, της δέσμευσης και της ανατροφοδότησης μαθητών/εκπαιδευτικών. Οι KPIs πρέπει να συλλαμβάνουν τόσο τη γνωστική όσο και τη συναισθηματική και ψυχοκινητική ανάπτυξη.

2.1.2 Χαρτογράφηση στην Αναθεωρημένη Ταξινόμηση του Bloom

Η Ταξινόμηση του Bloom παρέχει ένα πλαίσιο για την ταξινόμηση των εκπαιδευτικών στόχων, από την ανάκληση βασικών γνώσεων έως τις προηγμένες γνωστικές δεξιότητες, όπως η ανάλυση και η δημιουργία [8]. Η ενσωμάτωση της VR με την Ταξινόμηση του Bloom καθοδηγεί τους μαθητές μέσω προοδευτικά σύνθετων γνωστικών εργασιών [10]. Η ταξινόμηση περιλαμβάνει γνωστικούς (γνώση, κατανόηση, εφαρμογή), συναισθηματικούς (συναισθήματα, αξίες) και ψυχοκινητικούς (φυσικές δεξιότητες) τομείς, οι οποίοι μπορούν όλοι να συσχετιστούν με εφαρμογές VR [8].

Η VR λειτουργεί ως καταλύτης για την ανάπτυξη δεξιοτήτων ανώτερης τάξης σκέψης. Ενώ η παραδοσιακή διδασκαλία συχνά δίνει προτεραιότητα στα χαμηλότερα επίπεδα της Ταξινόμησης του Bloom (Θυμάμαι, Κατανοώ), η καθηλωτική και διαδραστική φύση της VR διευκολύνει μοναδικά τις δεξιότητες σκέψης ανώτερης τάξης, όπως η Εφαρμογή, η Ανάλυση, η Αξιολόγηση και η Δημιουργία [8]. Αυτό μετατοπίζει τη μάθηση από την παθητική λήψη στην ενεργό οικοδόμηση γνώσης, ευθυγραμμισμένη με τις κονστρουκτιβιστικές και βιωματικές θεωρίες μάθησης [9].

Επίπεδο Bloom	Γνωστική Διαδικασία	Μαθησιακή Δραστηριότητα Ενισχυμένη με VR (Παράδειγμα Δημοτικού)	Αντίστοιχοι KPIs
Θυμάμαι	Ανάκληση γεγονότων, όρων, βασικών εννοιών.	Εικονική εκδρομή στην αρχαία Αίγυπτο, αναγνώριση βασικών ορόσημων και αντικειμένων.	Απόκτηση Γνώσης (π.χ., αριθμός σωστά αναγνωρισμένων αντικειμένων).
Κατανοώ	Εξήγηση ιδεών ή εννοιών.	Εξερεύνηση του ανθρώπινου κυκλοφορικού συστήματος στην VR, και στη συνέχεια περιγραφή της λειτουργίας κάθε οργάνου.	Κατανόηση Αφηρημένων Εννοιών (π.χ., σαφήνεια εξήγησης, σωστή ακολουθία ροής αίματος).
Εφαρμόζω	Χρήση πληροφοριών σε νέες καταστάσεις.	Διεξαγωγή εικονικού επιστημονικού πειράματος (π.χ., ασφαλής ανάμιξη χημικών), παρατήρηση αντιδράσεων.	Απόκτηση Διαδικαστικών Δεξιοτήτων (π.χ., σωστά βήματα που ακολουθούνται, ακριβείς μετρήσεις).
Αναλύω	Διάσπαση πληροφοριών σε μέρη για εξερεύνηση σχέσεων.	Πλοήγηση σε ένα εικονικό οικοσύστημα, αναγνώριση σχέσεων θηρευτή-θηράματος και τροφικών αλυσίδων.	Κριτική Σκέψη & Επίλυση Προβλημάτων (π.χ., ακριβής αναγνώριση σχέσεων, αιτιολόγηση παρατηρήσεων).
Αξιολογώ	Αιτιολόγηση μιας απόφασης ή πορείας δράσης.	Συμμετοχή σε σενάριο VR όπου ένας εικονικός χαρακτήρας αντιμετωπίζει ένα κοινωνικό δίλημμα, και στη συνέχεια επιλογή και αιτιολόγηση μιας απάντησης με ενσυναίσθηση.	Ενσυναίσθηση & Αλλαγή Οπτικής Γωνίας (π.χ., επιλογή δράσης, αιτιολόγηση ενσυναίσθησης), Συνεργασία & Επικοινωνία (εάν συζητηθεί με ομοτίμους).
Δημιουργώ	Δημιουργία νέων ιδεών, προϊόντων ή τρόπων θεώρησης των πραγμάτων.	Χρήση ενός εργαλείου σχεδιασμού VR (π.χ., CoSpaces Edu) για τη δημιουργία ενός εικονικού μοντέλου μιας βιώσιμης πόλης ή μιας ιστορικής σκηνής.	Κριτική Σκέψη & Επίλυση Προβλημάτων (π.χ., καινοτόμες λύσεις), Απόκτηση Διαδικαστικών Δεξιοτήτων (π.χ., κυριαρχία εργαλείων σχεδιασμού).

Πίνακας 1. Ευθυγράμμιση Μαθησιακών Δραστηριοτήτων VR και KPIs με τα Επίπεδα της Ταξινόμησης του Bloom

3 Προτεινόμενη Λύση

Στόχος της έρευνάς μου είναι να μετρήσω την αποτελεσματικότητα των γυαλιών VR στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση. Για τον σκοπό αυτό επέλεξα κατάλληλους πόρους λογισμικού και υλισμικού για να κάνω μετρήσεις απόδοσης στους μαθητές δημοτικού σχολείου. Επιλέχτηκαν τα Headsets ClassVR της Avantis. Το σχολείο μου διαθέτει 8 τέτοια headsets και τα παιδιά στην πειραματική διαδικασία έρχονται σε επαφή με το διδακτικό υλικό χωρισμένα σε υποομάδες. Το ClassVR προσφέρει την δυνατότητα στον διδάσκοντα να έχει κεντρικά τον πλήρη έλεγχο των μασκών. Το ClassVR παρέχει το δικό του περιεχόμενο μέσω του "Eduverse", της online πλατφόρμας που δίνει την δυνατότητα στους εκπαιδευτικούς να έχουν άμεση πρόσβαση σε εκπαιδευτικούς πόρους. Επιτρέπει επίσης στους εκπαιδευτικούς και τους μαθητές να δημιουργούν και να ανεβάζουν το δικό τους περιεχόμενο. Το περιεχόμενο μπορεί να είναι 3D μοντέλα σε μορφή GLB ή STL αρχείων (δημιουργημένα με κατάλληλο λογισμικό, π.χ. Paint3D, Thinglink) ή 360 φωτογραφίες ή βίντεο δημιουργημένα από 3D κάμερα.

Κάποιοι από τους πόρους λογισμικού προσφέρονταν έτοιμοι από την εταιρεία των ακουστικών VR και για αυτό είναι προσβάσιμοι μόνο για όσους έχουν συνδρομή. Από εμένα δημιουργήθηκε το υλικό της πρώτης σειράς πειραμάτων, με μια 3D κάμερα και είναι ορατό στον σύνδεσμο βίντεο. Επίσης, δημιουργήθηκαν από εμένα και τους συνεργάτες μου στην έρευνα φύλλα εργασίας που καθοδηγούν την εκπαιδευτική διαδικασία, καθώς και φύλλα αξιολόγησης για τα αποτελέσματα της διδασκαλίας (μπορείτε να τα δείτε στον σύνδεσμο σενάρια VR). Για τους σκοπούς της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν μαθητές ίδιας ηλικίας σε κάθε μέτρηση με ίδιο μαθησιακό υπόβαθρο, χωρισμένοι σε δύο ομάδες, με την μία να αποτελεί ομάδα ελέγχου.

4 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι σε εξέλιξη. Η πρώτη σειρά πειραμάτων έγινε παρατηρώντας μια Ε' τάξη 24 παιδιών, χωρισμένη σε δύο υποομάδες 12 μαθητών. Η μελέτη αυτή έδειξε μικρή διαφορά απόδοσης των μαθητών σε συγκεκριμένο σταθμισμένο φύλλο αξιολόγησης κλειστού τύπου, 3.7%. Η σειρά αυτή των πειραμάτων αφορούσε το μάθημα της Ιστορίας και ήταν μια εικονική περιήγηση στον χώρο της Ακρόπολης. Οι μαθητές της μίας ομάδας είχαν στην διάθεσή τους 6 λεπτά για να διαβάσουν κείμενο που αναφέρεται στα Προπύλαια και στο Ερέχθειο και άλλα 4 λεπτά έβλεπαν στα γυαλιά VR το σχετικό 3D video συνοδευμένο από το προηγούμενο κείμενο ως αφήγηση. Οι μαθητές της ομάδας ελέγχου είχαν 10 λεπτά (τον ίδιο συνολικό χρόνο έκθεσης στο υλικό) για να μελετήσουν το κείμενο αναφοράς. Στην επόμενη φάση και οι δύο ομάδες έγραψαν το ίδιο φύλλο αξιολόγησης για τον ίδιο χρόνο (8 λεπτά). Σε δεύτερη φάση και αφού είχε μεσολαβήσει διάστημα ενός μήνα, οι μαθητές και των δύο ομάδων υποβλήθηκαν στο ίδιο φύλλο αξιολόγησης. Εκεί, η διαφορά απόδοσης των δύο αρχικών ομάδων ήταν πολύ μεγαλύτερη 11,4%. Η διαφορά αυτή είναι και σημαντική αλλά και πολύ διαφορετική από την αρχική, μέτρηση που δείχνει ότι η ομάδα που έμαθε με την χρήση VR διατήρησε στην μνήμη της πολύ καλύτερα την γνώση.

Ερμηνεύοντας την πρώτη αυτή σειρά πειραμάτων, διαπιστώσαμε ότι τόσο το υλικό όσο και οι εξεταζόμενες δεξιότητες αναφέρονταν κυρίως στην πρώτη βαθμίδα της ταξινομίας Bloom, δηλαδή στην ανάκληση πληροφορίας. Επίσης, το διδακτικό υλικό από την μεθοδολογία της έρευνάς μας είναι ταυτόσημο, κάτι που ίσως δεν δίνει το συγκριτικό πλεονέκτημα που θα μπορούσε να έχουν τα γυαλιά VR.

Για τον λόγο αυτό είμαστε στην διαδικασία δημιουργίας διδακτικού υλικού που να αναφέρεται σε ανώτερες δεξιότητες κατά Bloom, όπως για παράδειγμα την μελέτη του κύκλου του νερού. Στην μέτρηση αυτή χρησιμοποιήσαμε δύο τμήματα της Γ' δημοτικού, με 17 παιδιά το καθένα, με το ένα τμήμα να δρα ως ομάδα ελέγχου. Η ομάδα με τα VR είχε την δυνατότητα να περιηγηθεί σε ένα εικονικό περιβάλλον όπου μπορούσε να δει τις μετατροπές της φάση του νερού στο φυσικό περιβάλλον, υλικό έτοιμο από την εταιρεία που επέτρεπε μεγάλο βαθμό αλληλεπίδρασης στον μαθητή, ενώ η ομάδα ελέγχου μελέτησε την σχετική θεωρία. Η διαδικασία αυτή είναι σε εξέλιξη αλλά οι πρώτες μετρήσεις δείχνουν αισθητά μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των δύο ομάδων μαθητών, 10.78%. Αρκετοί είναι οι προβληματισμοί για την διαδικασία της έρευνας: Για να μετρήσεις ανώτερες δεξιότητες απαιτείται η δυνατότητα χρήσης ή δημιουργίας λογισμικού που να προσφέρει ουσιαστικές αλληλεπιδράσεις (π.χ., να πιάνουν αντικείμενα, να λύνουν παζλ, να αλληλεπιδρούν με χαρακτήρες) και να δημιουργεί μια ισχυρή αίσθηση παρουσίας, που δεν είναι πάντα εύκολο για να δημιουργηθεί ή να βρεθεί έτοιμη και προσπελάσιμη. Απαιτούνται ειδικές γνώσεις τόσο από τους εκπαιδευτικούς αλλά και από τους μαθητές που πρέπει να γίνουν και αυτοί δημιουργοί περιεχομένου αν θέλουμε να πάρουμε το μέγιστο από την τεχνολογία VR. Μετρήσεις πρέπει να γίνουν επίσης ανάλογα με την ηλικία, την γενικότερη επίδοση των παιδιών και το είδος της μάθησης που προτιμούν. Το πλήθος των μαθητών που συμπεριλάβαμε ως τώρα είναι σημαντικό αλλά κατά την γνώμη μας όχι ακόμα αρκετό για ασφαλή συμπεράσματα. Προσαρμογές πρέπει να γίνουν σύμφωνα με το ελληνικό αναλυτικό πρόγραμμα. Το επιστημονικό αυτό πεδίο θεωρώ ότι είναι πρόσφορο για νέα έρευνα και μάλιστα διεπιστημονική.

5 Αναφορές

[1] Allcoat, D., & von Mühlenen, A. (2018). The effect of virtual reality on learning and the retention of knowledge: A meta-analysis. *Computers & Education*, 126, 172-184.

[2] Bailenson, J. N. (2018). *Experience on demand: What virtual reality is, how it works, and what it can do*. WW Norton & Company.

[3] Dalgarno, B., & Lee, M. J. W. (2020). What are the learning affordances of 3D virtual environments? *British Journal of Educational Technology*, 51(3), 834-850.

[4] Freina, L., & Ott, S. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives. *The International Journal of Virtual Reality*, 15(2), 1-10.

[5] Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Kwok, O. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes: A meta-analysis. *Computers & Education*, 70, 29-40.

[6] Slater, M. (2009). Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments Phil. Trans. R. Soc. B36435493557 http://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138

[7] ClassVR. (2023). *ClassVR: Immersive Learning for K-12*. Retrieved from https://www.classvr.com/

[8] Nadine Bisswang, Dimitri Petrik, Erich Heumüller and Sebastian Richter. What is Your VR Use Case for Educational Like: A State-Of-The-Art Taxonomy - ERIC, πρόσβαση Μαΐου 25, 2025, https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1425397.pdf

[9] Michael W. Timm , Benefits and Applications of Learning with Virtual Reality, πρόσβαση Μαΐου 25, 2025, https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1851&context=honorstheses

[10] Heba Fasihuddin, Bloom's Taxonomy and VR Technology [5] | Download Scientific Diagram - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 25, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Blooms-Taxonomy-and-VR-Technology-5_fig2_378257107

Αναγνώριση και Βαθμολόγηση Συναισθημάτων σε Εκφράσεις Ηθοποιών με χρήση Μηχανικής Μάθησης

Γεώργιος Ξυράφης, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών,
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, dit18138@go.uop.gr

Αναστάσιος Θεοδωρόπουλος, Τμήμα Παραστατικών και Ψηφιακών Τεχνών,
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Ναύπλιο, ttheodor@uop.gr

Χρήστος Τρυφωνόπουλος, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών,
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, trifon@uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Στην εργασία αυτή εξετάζουμε την χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης και συγκεκριμένα, Αναγνώρισης Συναισθημάτων Προσώπου (ΑΣΠ) στο Θέατρο. Σκοπό έχουμε την ανάλυση και βαθμολόγηση της εκφραστικότητας των ηθοποιών, παρέχοντάς τους ταυτόχρονα χρήσιμη ανατροφοδότηση για την βελτίωση των υποκριτικών ικανοτήτων τους. Η προσέγγιση βασίζεται σε ένα παιχνιδοποιημένο περιβάλλον που αξιοποιεί αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Η τεχνολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει και να εκσυγχρονίσει την εκπαίδευση των ηθοποιών αλλά και να ενισχύσει τον ρεαλισμό στη δημιουργία ψηφιακών χαρακτήρων.

Λέξεις κλειδιά: Facial Emotion Recognition (FER), Theatrical Acting, Machine Learning for Emotion Detection, Gamified Training for Actors, Affective Computing.

1 Εισαγωγή

Το θέατρο είναι μια δυναμική μορφή επικοινωνίας, σχεδιασμένη τόσο για ψυχαγωγία όσο και για την έκφραση συναισθημάτων. Μέσω του συνδυασμού φωνής, κίνησης και εκφράσεων, οι ηθοποιοί δίνουν ζωή σε σενάρια και ιστορίες, με σκοπό να επικοινωνήσουν την εκάστοτε ιστορία στο κοινό τους και να προκαλέσουν κάποια συναισθηματική αντίδραση μέσω αυτής. Ενώ ο γενικός τόνος που έχει μια παραγωγή όσον αφορά στα συναισθήματα που προκαλεί δίνεται από το σκηνοθέτη, εν τέλει οι θεατές συνδέονται με την ενσάρκωση και παρουσίαση συγκεκριμένων ρόλων από τους ηθοποιούς. Χρησιμοποιώντας διάφορες εκφράσεις, χειρονομίες, κινήσεις του σώματος, τονισμούς και ταλαντώσεις της φωνής, καθώς και στολές ή μάσκες, οι ηθοποιοί προσπαθούν να εκφράσουν όσο καλύτερα γίνεται τα συναισθήματα των χαρακτήρων τους, επιτρέποντας έτσι στο κοινό να βιώσει τα συναισθήματα αυτά σε προσωπικό επίπεδο. Οι τελευταίες εξελίξεις σε αλγορίθμους αναγνώρισης συναισθημάτων [22] παρέχουν νέες δυνατότητες, οι οποίες μπορούν να γεφυρώσουν το κενό μεταξύ της θεατρικής έκφρασης και των διαδραστικών ψηφιακών μέσων, όπως για παράδειγμα τα βιντεοπαιχνίδια, και μπορούν να αξιοποιηθούν για να βελτιώσουν την σχεδίαση και δημιουργία χαρακτήρων, παρέχοντας πιο ζωντανούς και πιστευτούς ψηφιακούς χαρακτήρες.

Σε αυτήν την εργασία, σκοπός μας είναι να ερευνήσουμε την δυνατότητα εφαρμογής των τελευταίων τεχνολογιών Υπολογιστικής Όρασης και Μηχανικής Μάθησης προκειμένου να ανιχνεύσουμε και να βαθμολογήσουμε την εκφραστικότητα των προσώπων των ηθοποιών ως προς συγκεκριμένα συναισθήματα. Οι τελευταίες εξελίξεις στην συναισθηματική υπολογιστική [1] , έχουν καταφέρει, σε ικανοποιητικό βαθμό, να αναγνωρισούν και να κατηγοριοποιήσουν αυτόματα διάφορες ανθρώπινες εκφράσεις. Η αυτόματη αυτή διαδικασία αποκαλείται Αναγνώριση Συναισθημάτων Προσώπου (ΑΣΠ) [4, 5, 9]– και στην παρούσα εργασία παρουσιάζουμε την πρώτη απόπειρα εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας *σε θεατρικό περιβάλλον* μέσω της *αυτόματης βαθμολόγησης του πόσο αποτελεσματικά οι ηθοποιοί εκφράζουν αυτά τα συναισθήματα.* Η όλη προσσέγγιση βασίζεται στη δημιουργία ενός παιγνιοποιημένου περιβάλλοντος, όπου ηθοποιοί, με την βοήθεια της τεχνολογίας, μπορούν να βελτιώσουν την έκφραση των συναισθημάτων τους και κατ' επέκταση να βελτιώσουν συνολικά την υποκριτική τους ικανότητα. x

2 Αναγνώριση Συναισθημάτων Προσώπου στο Θέατρο

Η ΑΣΠ χρησιμοποιεί Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ) για να αναλύσει και να κατατάξει ανθρώπινες εκφράσεις σε διάφορες συναισθηματικές κατηγορίες, όπως η χαρά, η στενοχώρια, ο θυμός και η έκπληξη [4, 5, 9]. Ενώ η ΑΣΠ εφαρμόζεται σε τομείς όπως η εκπαίδευση [24] και η υγεία [11, 3], η χρήση της στην υποκριτική έχει μείνει ανεξερεύνητη [14]. Λίγες απόπειρες έχουν γίνει να εφαρμοστεί η συναισθηματική υπολογιστική στον τομέα του θεάτρου [25] και αυτές στοχεύουν κυρίως στην ανάλυση των αντιδράσεων του κοινού [14, 15], ενώ άλλες εργασίες εστιάζουν στην ομιλία των ηθοποιών [12, 13] και στις κινήσεις του σώματος [18], αλλά όχι στις εκφράσεις του προσώπου.

Στο θέατρο, όπου η παρουσίαση ενός συναισθήματος είναι υψίστης σημασίας για την ψυχαγωγία του κοινού, η ικανότητα να ανιχνευτεί και να βαθμολογηθεί ένα συναίσθημα μπορεί να προσφέρει στους ηθοποιούς πολύτιμη ανατροφοδότηση. Η εργασία μας ερευνά το πως μπορεί η ΑΣΠ να αξιολογήσει εκφράσεις σε ένα θεατρικό περιβάλλον, δίνοντας την δυνατότητα σε ηθοποιούς να βελτιώσουν και να τελειοποιήσουν την απόδοση συγκεκριμένων συναισθημάτων. Αντί για να ανιχνεύουμε απλώς τα συναισθήματα, σκοπός μας είναι να βαθμολογούμε το πόσο επιτυχημένα παρουσιάζει ένας ηθοποιός ένα συγκεκριμένο συναίσθημα μέσω της έκφρασης του, προσφέροντας του χρήσιμα στοιχεία για την αποτελεσματικότητα της απόπειρας του. Για να το κατορθώσουμε αυτό, αξιοποιούμε σύγχρονους αλγορίθμους μηχανικής μάθησης [20, 19] οι οποίοι αναλύουν την έκφραση ενός ηθοποιού σε πραγματικό χρόνο, ταξινομούν τις εκφράσεις σε κατηγορίες συναισθημάτων, και παρέχουν βαθμολογηση του συναισθήματος με βάση συγκεκριμένα κριτήρια όπως η ακρίβεια, η ένταση και η εκφραστικότητα της κάθε αναπαράστασης.

Η προσέγγισή μας ενσωματώνει και ολοκληρώνει τα αποτελέσματα από διαφορετικές ερευνητικές εφαρμογές όπως (i) η *ανίχνευση συναισθημάτων*, δηλαδή ο εντοπισμός και η κατάταξη των εκφράσεων σε διακριτά συναισθήματα, (ii) η *βαθμολόγηση συναισθημάτων*, δηλαδή η αξιολόγηση της ποιότητας και της έντασης αυτών των συναισθημάτων στην έκφραση του ηθοποιού και ανατροφοδότηση για την απόπειρα του, και (iii) η *παιχνιδοποιημένη εκπαίδευση*, δηλαδή η δημιουργία ενός παιχνιδιού με σκοπό την εκπαίδευση και τη βελτίωση της εκφραστικότητας των ηθοποιών τους μέσω ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο. Για να επιτύχουμε τα παραπάνω αξιοποιούμε ένα προ-εκπαιδευμένο μοντέλο που εξειδικεύεται στην ΑΣΠ [7, 2, 23, 6, 16, 17, 10], το dataset του οποίου περιλαμβάνει εικόνες διάφορων αναλύσεων και πρόσωπα όλων των ηλικιών, φύλων και φυλών. Σκοπεύουμε να επεκτείνουμε αυτό το μοντέλο εκπαιδεύοντας το επιπλέον σε (i) πρόσωπα τα οποία είναι καλυμμένα με μάσκες διαφόρων ειδών [8], (ii) εκφράσεις ηθοποιών από διάφορα βίντεο και ταινίες [21] και (iii) εκφράσεις νέων ηθοποιών που ακόμα εκπαιδεύονται (π.χ. φοιτητές σε τμήματα επιτελεστικών τεχνών).

Εν κατακλείδι, η ΑΣΠ είναι ένα υποσχόμενο εργαλείο για τους ηθοποιούς προκειμένου να τους βοηθήσει να βελτιώσουν την απόδοση των συναισθημάτων. Μέσω της ανάλυσης και της βαθμολόγησης των εκφράσεων, η τεχνολογία αυτή παρέχει ανατροφοδότηση που μπορεί να αξιοποιηθεί όχι μόνο για την εκπαίδευση των ηθοποιών, αλλά και δευτερογενών στον τομέα της σχεδίασης ψηφιακών χαρακτήρων. Όσο η ΤΝ εξελίσσεται, η ΑΣΠ έχει την προοπτική να μεταμορφώσει τόσο το παραδοσιακό θέατρο όσο και τα διαδραστικά, ψηφιακά μέσα αφήγησης ιστοριών, δημιουργώντας πιο βαθείς συναισθηματικούς δεσμούς μεταξύ των ηθοποιών και των κοινών τους. Εντάσσοντας τις πληροφορίες που θα λαμβάνουν από την ΑΣΠ, οι ηθοποιοί θα έχουν μία αντικειμενική, συνεχώς διαθέσιμη πηγή ανατροφοδότησης για να δουλέψουν και να βελτιώσουν τα εκφραστικά τους μέσα. Η παρούσα προσσέγγιση μπορεί να επεκταθεί και σε τομείς εκτός του θεάτρου, όπως στη *σχεδίαση ψηφιακών χαρακτήρων*, βελτιώνοντας (i) την έκφραση συναισθημάτων μέσω εκφράσεων των ψηφιακών χαρακτήρων σε βιντεο παιχνίδια, (ii) το συναισθηματικό βάθος και τον ρεαλισμό ψηφιακών χαρακτήρων, αλλά και (iii) την αποτύπωση και αλληλεπίδραση των χαρακτήρων με τον παίχτη.

Αναφορές

[1] S. Afzal, H. Ali Khan, M. Jalil Piran, and J.-W. Lee. A Comprehensive Survey on Affective Computing: Challenges, Trends, Applications, and Future Directions. *IEEE Access*, 12, 2024.

[2] A. Alameer. Facial Emotion Detection Dataset. https://salford.figshare.com/articles/dataset/Facial_Emotion_Detection_Dataset/22495669, 5 2023. Accessed on 09-2024.

[3] N. Begum and A. Syed Mustafa. Multi-level graded facial emotion intensity recognition using MCANN for health care. *Intelligent Decision Technology*, 17(2), 2023.

[4] F.Z. Canal, T.R. Müller, J.C. Matias, G.G. Scotton, A.R. de Sa Junior, E. Pozzebon, and A. Carlos Sobieranski. A survey on facial emotion recognition techniques: A state-of-the-art literature review. *Information Sciences*, 582, 2022.

[5] C. Dalvi, M. Rathod, S. Patil, S. Gite, and K. Kotecha. A Survey of AI-Based Facial Emotion Recognition: Features, ML & DL Techniques, Age-Wise Datasets and Future Directions. *IEEE Access*, 9, 2021.

[6] W. Dias, F. Andaló, R. Padilha, G. Bertocco, W. Almeida, P. Costa, and A. Rocha. Cross-dataset emotion recognition from facial expressions through convolutional neural networks. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 82, 2022.

[7] I.J. Goodfellow, D. Erhan, P.L. Carrier, A. Courville, M. Mirza, B. Hamner, W. Cukierski, Y. Tang, D. Thaler, D.-H. Lee, Y. Zhou, C. Ramaiah, F. Feng, R. Li, X. Wang, D. Athanasakis, J. Shawe-Taylor, M. Milakov, J. Park, R. Ionescu, M. Popescu, C. Grozea, J. Bergstra, J. Xie, L. Romaszko, B. Xu, Z. Chuang, and Y. Bengio. Challenges in representation learning: A report on three machine learning contests. https://www.kaggle.com/datasets/msambare/fer2013/data, 2013. Accessed on 09-2024.

[8] R. Hasan. MaskedFER2023 and MaskedCK+: Face-masked FER2013 and CK+ datasets for mask-aware facial expression recognition. https://data.mendeley.com/datasets/sp3xssmzbg/1, 2023. Accessed on 09-2024.

[9] M. Karnati, A. Seal, D. Bhattacharjee, A. Yazidi, and O. Krejcar. Understanding deep learning techniques for recognition of human emotions using facial expressions: A comprehensive survey. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, 2023.

[10] A. Khodaparast. Emotion detection dataset. https://universe.roboflow.com/alireza-khodaparast/emotion_detection, November 2021. Accessed on 09-2024.

[11] S.R. Mohanta and K. Veer. Trends and challenges of image analysis in facial emotion recognition: a review. *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*, 11(1), 2022.

[12] M. Moutti, S. Eleftheriou, P. Koromilas, and T. Giannakopoulos. Cross-linguistic speech emotion recognition using cnns: a use-case in greek theatrical data. In *International ACM Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA)*, 2022.

[13] M. Moutti, S. Eleftheriou, P. Koromilas, and T. Giannakopoulos. A dataset for speech emotion recognition in greek theatrical plays. In *Language Resources and Evaluation Conference (LREC)*, 2022.

[14] O.M. Rajpurkar, S.S. Kamble, J.P. Nandagiri, and P.J. Bide. A survey on engagement and emotion analysis in theatre using thermal imaging. In *International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 2020.

[15] O.M. Rajpurkar, S.S. Kamble, J.P. Nandagiri, and P.J. Bide. Engagement and emotion analysis in theatre using thermal imaging. In *Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2021.

[16] Roboflow. Emotion recognition dataset. https://universe.roboflow.com/vietnamesegerman-university-mavjh/emotion-recognition-rjl9w, December 2022. Accessed on 09-2024.

[17] Roboflow. Emotion detection dataset. https://universe.roboflow.com/detection-algorithm-comparison/emotion-detection-tgdyh, November 2023. Accessed on 09-2024.

[18] S. Senecal, L. Cuel, A. Aristidou, and N. Magnenat-Thalmann. Continuous body emotion recognition system during theater performances. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 27(3-4), 2016.

[19] S.I. Serengil and A. Ozpinar. Lightface: A hybrid deep face recognition framework. In *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*. IEEE, 2020.

[20] S.I Serengil and A. Ozpinar. A Benchmark of Facial Recognition Pipelines and Co-Usability Performances of Modules. *Bilisim Teknolojileri Dergisi*, 17(2), 2024.

[21] D. Seuss, A. Dieckmann, T. Hassan, J.-U. Garbas, J.H. Ellgring, M. Mortillaro, and K. Scherer. Emotion Expression from Different Angles: A Video Database for Facial Expressions of Actors Shot by a Camera Array. In *International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, 2019.

[22] T. Sompong, C. Piansaddhayanon, and E. Chuangsuwanich. Attribute-Aware Amplification of Facial Feature Sequences for Facial Emotion Recognition. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2024.

[23] S. Vaidya. Natural human face images for emotion recognition. https://www.kaggle.com/datasets/sudarshanvaidya/random-images-for-face-emotion-recognition/data, 2020. Accessed on 09-2024.

[24] Ruan X, C. Palansuriya, and A. Constantin. Affective Dynamic Based Technique for Facial Emotion Recognition (FER) to Support Intelligent Tutors in Education. In *International Conference in Artificial Intelligence in Education (AIED)*, 2023.

[25] G. Xyrafis, A. Theodoropoulos, and C. Tryfonopoulos. Using Machine Learning for Facial Emotion Expressiveness Rating of Actors. In *International Workshop on Performing Personality in Game Characters and Digital Narratives (MOCAP @ CEEGS)*, 2024.

Visitor Modeling for Indoor Proximity Positioning with ML prediction in large / complex Museums

Dimitrios Sigalas,[Undergrad., Dig. Syst. Dept., UoP, ds19078@go.uop.gr]
Dimitrios Psarianos, [Undergrad., Dig. Syst. Dept., UoP, ds20161@go.uop.gr]
Evangelia G. Papadopoulou, [Grad., Dig. Syst. Dept., UoP, dit2413cst@go.uop.gr]
Efstathios D. Tsafaras, [Grad., Dig. Syst. Dept., UoP, dit2420cst@go.uop.gr]
Konstantina. G. Papadopoulou, [Grad., Dig. Syst. Dept., UoP, papadopouloukwn01@gmail.com]
and
Panos I. Philippopoulos [Assist. Prof., Dig. Syst. Dept., UoP, p.filippopoulos@uop.gr]

11 June 2025

Abstract

Indoor positioning in large complex environments such as multi-hall museums, is an abiding challenge, especially when popular low power and cost-effective technologies like Bluetooth Low Energy (BLE) are used. This paper presents an integrated approach combining visitor behavior modeling and machine learning (ML) classification to enhance the accuracy of indoor positioning, based on pilot measurements at the Museum of Modern Greek Culture (MNEP), in Athens.
In the first part, a modeling framework is proposed, that simulates visitor movement in MNEP exhibition spaces, and movement patterns are defined, with roles such as ”Visitor”, ”Crowd”, and ”Body”. These roles are played by actors wearing BLE beacons for the collection of RSSI measurements from BLE gateways installed near exhibits.
In the second part, 20 RSSI datasets produced from pilot measurements in 47 MNEP halls, are analyzed using supervised machine learning algorithms such as K-NN, C4.5, Random Forest, SVM and MLP. Random forest produced the highest accuracy (86.83%), especially in halls with minimal cell-ovelap. Data separation based on ”Visitor” and ”Crowd” roles, enabled interesting insights on how movement behavior affects classification performance.
Overall, this study demonstrates that behavioral modeling combined with ML classifiers may offer a robust framework for BLE-Based Indoor positioning.

BLE / RSSI Indoor Positioning, Museum visitor modeling, ML classification

1 Introduction - Problem Overview

Indoor positioning systems are becoming increasingly important in museums, as they support dynamic management of visitor flow, improve accessibility, and enhance visitor experience delivering location-based personalized content[1][13][18]. Moreover, visitor movement statistics provide valuable insights to museum managers, into visitor behavior evaluating exhibits and routes . [5][16]As visitor numbers and exhibition layout complexity increase, visitor monitoring is becoming a key requirement for enhancing visitor experience and overall museum performance

Deploying positioning in complex, multi-hall museums poses significant technical challenges, as high sensitivity to environmental variability (shape of rooms, showcase layout, surface textures), signal interference, and human presence / movement, impact positioning accuracy.

In such spaces, with heavy visitor traffic seriously impacting the ability to maintain Line-of-Sight (LOS), Bluetooth Low Energy (BLE) technology coupled with Received Signal Strength Indicator (RSSI) technique for proximity positioning, are widely adopted due to their low cost and ease of deployment [1][3][8][15]. However, they suffer from low accuracy, noise and multipath fading issues[3][11][15]. Appropriate visitor modeling and methods for increasing positioning accuracy are thus required.[6][9]

Our work reports on the experimentation on visitor modeling and supervised machine learning (ML) classification, in the context of the MELTOPENLAB project [1]. In part A of the paper, a modeling framework is proposed to simulate visitor navigation between showcases in diverse museum spaces. Visitor behaviors are categorized adopting popular models in relevant literature, and experimental movement patterns and roles are proposed, that incorporate different visitor movement dynamics, for measuring proximity accuracy. In part B, 20 RSSI datasets from 47 exhibition halls are processed using supervised ML algorithms, including K-Nearest Neighbors (K-NN) [17], Decision Trees (C4.5) [14], Random Forest (RF) [20], Support Vector Machine (SVM) [4], and Multi-layer Perceptron (MLP) [10]. Classifiers are trained on diverse temporal and spatial RSSI patterns and evaluated in terms of accuracy for different sensor densities and visitor behaviors. Visitor modeling and part of the results reported in this paper, are analytically presented in [1].

2 Part A: Visitor Movement Modeling

2.1 Factors Affecting Visitor Movement Modeling

The exhibition spaces of the Museum of Modern Greek Culture (MNEP) [2] present a wide range of sizes, ranging from small square / rectangular halls with an area of 9 – 10 m², to large, often narrow halls with an area of 55 - 70 m², with varying openings (windows, doors), surfaces (walls, showcases). A unique, in terms of hall characteristics, case, is the Tsisdaraki Mosque[2], a single hall with an area of 105 m². Characteristics of the halls under coverage, associated with factors affecting radio coverage and sensor operation, are listed in the following:

- **Surfaces & openings:** Walls, doors, furniture and showcases absorb radiation power, while reflective surfaces cause distortions with increased multipath fading.
- **Line of Sight (LOS) & Shadowing:** Lack of LOS (NLOS), as well as objects between transmitter and receiver (shadowing), cause degradations in signal strength. Dynamic shadowing from high visitor traffic was assumed.
- **E/M Interference:** Electronic devices of all kinds may interfere and distort signals.

Modeling of visitor movement considered factors relating to speed and direction changes, affected by visitor density, layout, and demographics. Navigation modes were identified as[1]:

- **Nomadic movement:** Visitors follow structured/free routes while spending time at exhibits.
- **Continuous movement:** Visitors move through cells without consistent stops.

2.2 Implementation of Visitor Modeling

Virtual cells of coverage were built using Bluetooth (BLE) sensors. With 12 m² BLE cells and about 2 showcases per cell, it was assumed that, during peak hours, an average of 4 visitors per cell are accommodated. The average time spent in front of an exhibit can vary widely depending on the type of exhibit. Commonly accepted values for average time spent in front of

[1] MELTOPENLAB: Documentation and Ontology of Modern Cultural Heritage Exhibits/Objects and Methods for Restoration and Maintenance, Behavioral Analysis and Creation of Personalized Visitor Experience in Museums and Multi-Cultural Sites/Open Labs, R&D Project, Co-Funded by the EU Regional Development Fund (ERDF), in the context of the Hellenic ESPA Operational Programme. Available online: https://meltopenlab.gr/ (accessed on 23/04/2025).

an exhibit in art museums, range from 21 sec. to more than 41 seconds [1]. However, given the density of exhibits and the high expected traffic in MNEP[2], a lower threshold of 10 sec was assumed to model the minimum time spent looking at an exhibit in a cell. If the average distance between the centers of two adjacent (and marginally overlapping) cells is about 5m to 6m, a visitor moving at 1.2 m/s needs approximately 4.6 sec to change cells. With an average of 2 showcases per cell, a visitor would spend at least 20 seconds in the cell looking at exhibits, and the average cell roaming rate would be 24.6 sec/s. The behavioral models of visitors, based on movement characteristics were named after popular literature models [1] and are illustrated in **Figure 1**, along with the movement parameters defining them.

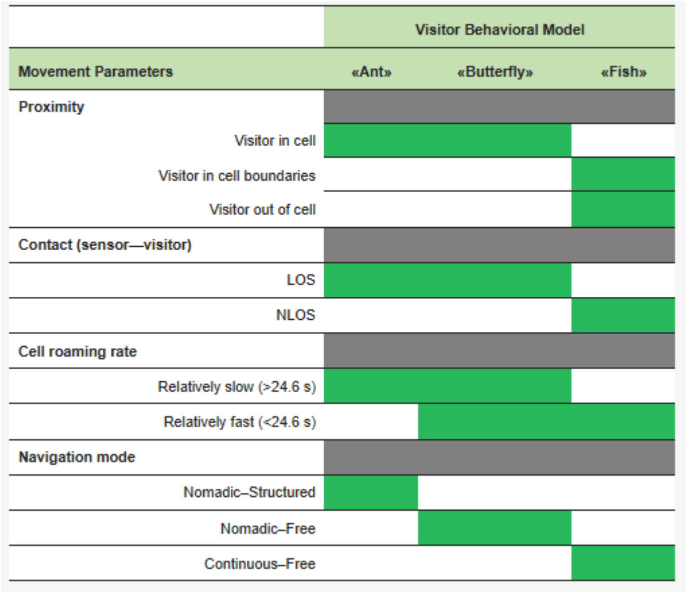


Figure 1: Visitor behavioral models based on movement parameters[1].

Based on the above models, and considering that speed of movement and direction changes are critical for most movement parameters, three distinct visitor roles were defined [1]:

- **Visitor:** moves within the cell at low speed, changing view every 10 seconds.
- **Crowd:** moves continuously and at moderate speed, shadowing the Visitor.
- **Body:** remains mostly stationary within the cell, sometimes close to the Visitor.

A measurement pattern was defined, based on the above roles: Visitor performs 90° rotations every 10 seconds; then the Crowd circles around, and finally two Body users approach, all remaining still at the end. Although, the roles were initially designed based on MNEP specific assumptions, they actually incorporate behaviors that are quite generic: individual exhibit-focused movement (Visitor), dynamic group motion (Crowd), and stationary presence (Body). Therefore, these roles are potentially applicable to different exhibition layouts and museum specifics, and further validation in other museum contexts, would help confirm this.[1]

Movement roles — Visitor, Crowd, and Body — are visualized in **Figure 2**.

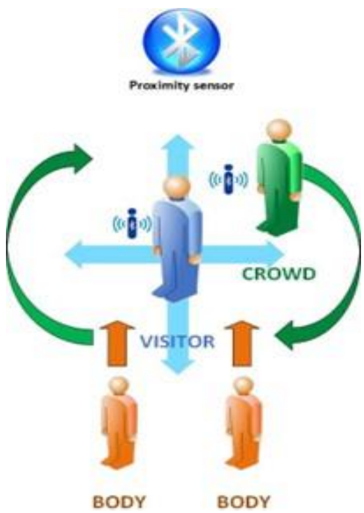


Figure 2: Visitor behavioral models based on movement parameters[1].

2.3 Measurement Results

The proposed modelling was tested by choosing the "ant" model and conducting positioning accuracy measurements with the 3-role measurement pattern, for a number of different position (BLE cell) prediction methods, based on detecting the strongest signal (maximum RSSI) in a time window of 1, 3, 6 and X seconds (maxRSS-1, 3, 6, 6c, X) of recent signal measurements as defined in [1]. In single spaces with high cell overlap, crowd role demonstrated a significant performance improvement, compared to visitor role. In contrast, in tubular spaces with low cell overlap, crowd role showed similar or deteriorated performance. The following figures depict the different behavior of the crowd role (dotted lines), as opposed to visitor role (continuous lines) over the temporal position prediction methods and different datasets (each line), in these 2 cases: high-cell and low-cell overlap. Vertical axis represents % prediction accuracy[1].

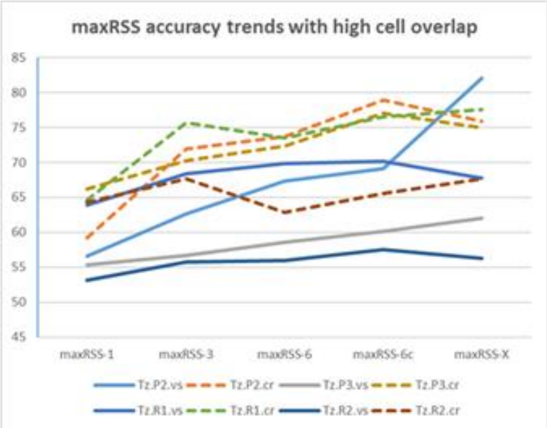


Figure 3: RSSI temporal methods accuracy trends in high cell-overlap hal[1]l.

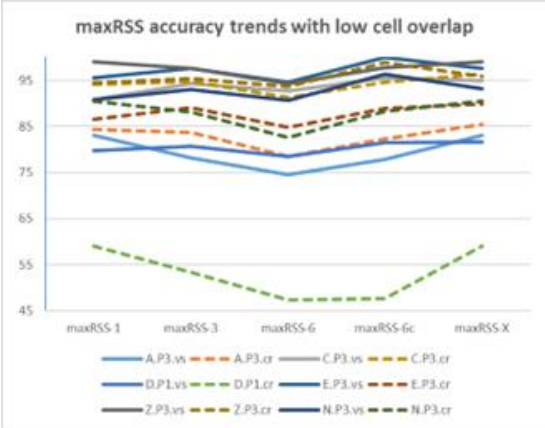


Figure 4: RSSI temporal methods accuracy trends in low cell-overlap halls[1].

3 Part B: Machine Learning for Indoor Positioning

3.1 Machine Learning Algorithms

For the classification task, five supervised machine learning algorithms were employed: K-Nearest Neighbors (K-NN) Decision Trees (C4.5), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), and Multi-Layer Perceptron (MLP). These algorithms were selected for their widespread use in classification problems. The classification problem is formulated as a multiclass prediction task [7], where the goal is to predict the actual BLE cell (cell-ID) in which a device is located — serving as the ground truth label. Each data sample is a feature vector consisting of RSSI values, representing signal strength received from a specific BLE gateway installed across the museum's rooms. These features capture the signal conditions at the time of measurement, while the label corresponds to the actual BLE cell where the visitor was located.

3.2 Implementations and results

ML algorithms, were implemented in Python 3.12.4 using the PyCharm Integrated Development Environment (IDE). The implementation was carried out with the Scikit-learn library[21]. Hyperparameter tuning was applied to identify the optimal parameters. A 10-fold cross-validation approach was also adopted, maximizing dataset utility, reducing risk of overfitting, accounting for the variability in data patterns distribution across different subsets, and ultimately ensuring that adequate training data is available in each iteration[7]. Results (algorithm performance per dataset) are presented in the table below. Since the datasets vary in size and values, the selected hyperparameters differ across datasets. Cell prediction accuracy (% percentage), as the ratio of correct predictions to the total number of predictions per method, was adopted as the most important performance indicator to aid evaluation.

#	DataSet	K-NN	C4.5	RF	SVM	MLP
1	Tz.P2.vs	73.00	82.00	83.00	73.00	63.00
2	Tz.P2.cr	66.27	73.95	71.16	67.44	67.67
3	Tz.P3.vs	74.73	76.25	77.59	71.59	70.37
4	Tz.P3.cr	83.12	82.30	83.63	81.35	78.81
5	Tz.R1.vs	81.45	79.94	83.46	72.38	64.69
6	Tz.R1.cr	70.00	66.56	72.18	64.06	66.25
7	Tz.R2.vs	73.77	70.84	74.79	73.58	72.21
8	Tz.R2.cr	70.97	74.12	73.67	70.29	64.29
9	A.P3.vs	87.00	90.00	91.00	90.00	86.00
10	A.P3.cr	91.76	90.60	92.53	92.52	90.60
11	C.P3.vs	89.00	96.00	94.00	95.00	89.00
12	C.P3.cr	93.53	94.75	95.93	94.31	92.71
13	D.P1.vs	84.00	88.00	89.00	85.00	84.00
14	D.P1.cr	88.47	88.20	89.19	86.18	82.72
15	E.P3.vs	96.00	97.00	97.00	97.00	97.00
16	E.P3.cr	89.43	89.83	89.51	86.48	88.23
17	Z.P3.vs	98.00	98.00	97.00	99.00	98.00
18	Z.P3.cr	94.31	95.93	95.95	95.18	90.70
19	N.P3.vs	92.00	95.00	95.00	93.00	92.00
20	N.P3.cr	93.41	93.66	93.41	92.38	94.17
	Average	**84.51**	**86.15**	**86.83**	**83.99**	**81.62**

Table 1: MNEP Datasets [1]

Regarding the role of sensor density, accuracies improve when moving from single halls with high sensor density and cell overlap (average 73.49% on all datasets and algorithms), to tubular-shaped halls with lower density and larger gaps between cells (average 92.13%). This trend is depicted in the following figure, in terms of cumulative accuracy of the 5 algorithms (K-NN, C4.5, RF, SVM, MLP) per dataset, versus BLE sensor density (line).

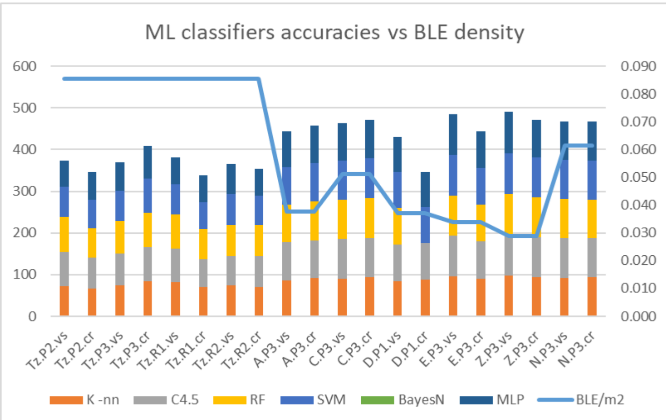


Figure 5: ML classifiers cumulative accuracy vs BLE sensor density[1].

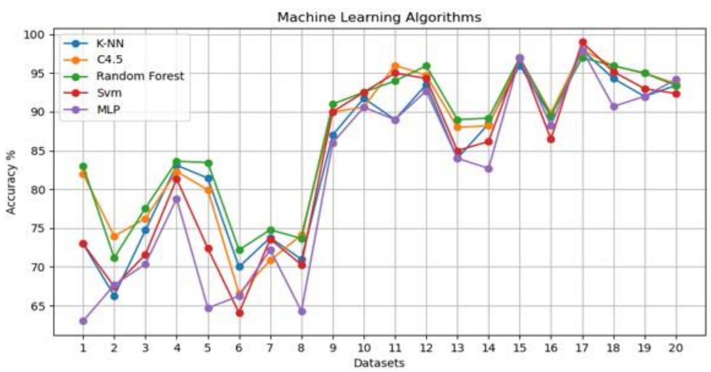


Figure 6: Accuracy (%) of ML Algorithms across datasets.

Regarding overall evaluation, ML algorithms outweigh temporal (maxRSS) methods' accuracies by an average of 12.67% on high cell overlap, and by 8.97% on low cell overlap halls.

Regarding ML evaluation, as shown in final row of Table 1, Random Forest (RF) had the best average overall performance (86.83%), followed by the C4.5 (86.15%) and K-NN (84.51%) algorithms. SVM (83.99%) and MLP (81.62%) follow. RF being an ensemble learning method, combines the merits of both random forests and decision trees, avoiding overfitting and performing consistently well across diverse dataset patterns. C4.5 algorithm with the second-best performance, confirmed the suitability of decision trees-based methods for efficient learning from our datasets. K-NN algorithm, with a much simpler and effortless philosophy, was ranked third, providing an efficient adaptive alternative to decision trees.

References

[1] Philippopoulos, P.I.; Koutrakis, K.N.; Tsafaras, E.D.; Papadopoulou, E.G.; Sigalas, D.; Tselikas, N.D.; Ougiaroglou, S.; Vassilakis, C. "Cost-Efficient RSSI-Based Indoor Proximity Positioning, for Large/Complex Museum Exhibition Spaces". *Sensors* 2025, *25*, 2713. DOI: https://doi.org/10.3390/s25092713.

[2] Museum of modern greek culture (MNEP). http://www.mnep.gr/. Located in Monastiraki, Athens, Greece.

[3] C. Agualimpia-Arriaga, S. Govindasamy, B. Soni, C. I. Páez-Rueda, and A. Fajardo. Rssi- based indoor localization using machine learning for wireless sensor networks: A recent review. In *2024 IEEE ANDESCON*, pages 1–6, Cusco, Peru, 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/ANDESCON61840.2024.10755908.

[4] M. Awad and R. Khanna. Support vector machines for classification. In *Efficient Learning Machines*, pages 39–66. Apress, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/ 978-1-4302-5990-9_3.

[5] C. C. Carbon. Art perception in the museum: How we spend time and space in art exhibitions. *i-Perception*, 8(1):2041669517694184, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1177/2041669517694184.

[6] E. Dim and T. Kuflik. Automatic detection of social behavior of museum visitor pairs. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 4(4):17:1–17:30, 2015. DOI: https://doi.org/10.1145/2662869.

[7] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman. *The Elements of Statistical Learning*. Springer, 2nd edition, 2008. DOI: https://doi.org/10.1002/sim.1616.

[8] C. Jain, G. V. S. Sashank, V. N N, and S. Markkandan. Low-cost ble based indoor localization using rssi fingerprinting and machine learning. In *2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, pages 363–367, Chennai, India, 2021. DOI: https://doi.org/10.1109/ WiSPNET51692.2021.9419388.

[9] T. Kuflik, Z. Boger, and M. Zancanaro. Analysis and prediction of museum visitors' behavioral pattern types. In *Ubiquitous Display Environments*, pages 161–176. Springer, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27663-7_10.

[10] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton. Deep learning. *Nature*, 521(7553):436–444, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/nature14539.

[11] M.W.P. Maduranga, V. Tilwari, and R. Abeysekera. Improved rssi indoor localization in iot systems with machine learning algorithms. *Signals*, 4:651–668, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/signals4040036.

[12] L. Najbrt and J. Kapounová. Categorization of museum visitors as part of system for personalized museum tour. *International Journal of Information and Communication Technologies in Education*, 3(1):17–27, 2014. DOI: https://doi.org/10.1515/ ijicte-2014-0002.

[13] P.I. Philippopoulos, I.C. Drivas, N.D. Tselikas, K.N. Koutrakis, E. Melidi, and D. Kouis. A holistic approach for enhancing museum performance and visitor experience. *Sensors*, 24(3):966, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24030966.

[14] A. Pratama and T. Rahmawati. Implementation of c4.5 algorithm for analysis of service quality in companies of pt. xyz. In *2nd International Conference on Business and Management of Technology (ICONBMT 2020)*, pages 38–44. Atlantis Press, 2021. DOI:

https://doi.org/10.2991/aebmr.k.210510.008.

[15] R.M.M.R. Rathnayake, M.W.P. Maduranga, V. Tilwari, and M.B. Dissanayake. Rssi and machine learning-based indoor localization systems for smart cities. *Eng*, 4:1468–1494, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/eng4020085.

[16] L. F. Smith, J. K. Smith, and P. P. Tinio. Time spent viewing art and reading labels. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 11(1):77, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1037/aca0000049.

[17] K. Taunk, S. De, S. Verma, and A. Swetapadma. A brief review of nearest neighbor algorithm for learning and classification. In *2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*, pages 1255–1260, Madurai, India, 2019. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCS45141.2019.9065747.

[18] E.E. Tsiropoulou, A. Thanou, and S. Papavassiliou. Modelling museum visitors' quality of experience. In *Proceedings of the 11th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization (SMAP)*, pages 77–82, Thessaloniki, Greece, 2016. IEEE. DOI: https://doi.org/10.1109/SMAP.2016.7753388.

[19] E. Veron and M. Levasseur. *Ethnographie de l'Exposition*. Bibliothèque publique d'Information, Centre Georges Pompidou, 1983. Available at: https://shs.hal. science/halshs-01484185.

[20] Breiman, L.Random Forests.Machine Learning 45,5-32 (2001).https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

[21] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.

Ανοιχτός Κώδικας, Ανοιχτές Δυνατότητες: Ποιοτικές, Οικονομικές και Καινοτομικές Διαστάσεις στη Σύγχρονη Ανάπτυξη Λογισμικού

Δημητρούσης Σωτήριος Ελευθέριος, dit21048@go.uop.gr
Γεώργιος Λιλλής, dit22111@go.uop.gr
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Τρίπολη

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η παρούσα εργασία διερευνά την πολυδιάστατη επίδραση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα στην ανάπτυξη εφαρμογών, εστιάζοντας σε τρεις κύριους άξονες: ποιότητα κώδικα, οικονομικό όφελος και καινοτομία. Αναλύοντας δεδομένα από ακαδημαϊκές μελέτες και πρακτικές εφαρμογές, διαπιστώνεται ότι το λογισμικό ανοιχτού κώδικα παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Στην ποιότητα, η συλλογική συνεισφορά της κοινότητας επιταχύνει τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων, ενώ η διαφάνεια του κώδικα διευκολύνει την ταχύτερη αντιμετώπιση ευπαθειών ασφαλείας, παρά τον αρχικά υψηλότερο αριθμό τους. Οικονομικά, η χρήση ανοιχτού κώδικα μειώνει δραστικά το κόστος ανάπτυξης μέσω δωρεάν εργαλείων και εθελοντικών συνεισφορών, ενώ δημιουργεί ευκαιρίες για έμμεσα κέρδη (π.χ., δημοφιλία προϊόντων, πρόσβαση σε ταλέντα). Στην καινοτομία, η ελεύθερη πρόσβαση και η διαφάνεια καλλιεργούν ένα περιβάλλον δημιουργικότητας, επιτρέποντας τη γρήγορη υιοθέτηση πρωτότυπων λύσεων και τη δημοκρατοποίηση της τεχνολογίας. Παρά τις προκλήσεις (π.χ., διαχείριση ευπαθειών, πιστοποίηση συνεισφορών), τα πλεονεκτήματα του ανοιχτού κώδικα στην αξιοπιστία, οικονομία και δυναμική ανάπτυξη τον καθιστούν κρίσιμο εργαλείο για τη σύγχρονη βιομηχανία λογισμικού. Η μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία της υιοθέτησης καλών πρακτικών και της ενίσχυσης της κοινοτικής συνεργασίας για την μεγιστοποίηση των οφελών.

Λέξεις κλειδιά: Ανοιχτός Κώδικας, Αξιοπιστία, Ασφάλεια, Κόστος Ανάπτυξης, Καινοτομία, Κοινοτική Συνεισφορά

1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εξετάζει την επίδραση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα στην ανάπτυξη εφαρμογών, εστιάζοντας στην ποιότητα, το κόστος και την καινοτομία. Εξετάζεται πώς η χρήση λογισμικών όπως το Linux, το Android, ο Apache και το Git έχει διαμορφώσει τον τομέα της πληροφορικής, με στόχο να αναλυθεί η σχέση μεταξύ ανοιχτού κώδικα και αξιοπιστίας, ασφάλειας, κόστους και δημιουργικότητας. Συγκεκριμένα, μελετάται η ποιότητα μέσω της σταθερότητας και των σφαλμάτων, η ασφάλεια μέσω της ταχύτητας ανίχνευσης και των ενημερώσεων, το κόστος μέσω της χρήσης δωρεάν εργαλείων και των κρυφών εξόδων, και η καινοτομία μέσα από τη συνεισφορά της κοινότητας και τη διαφάνεια του κώδικα. Τέλος, αξιολογείται η συσχέτιση των παραπάνω παραμέτρων μεταξύ τους, καθώς και το πώς αλληλοεπηρεάζονται.

2 Η ποιοτική επίδραση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα

Στη σύγχρονη εποχή, οι τεχνολογίες εξελίσσονται συνεχώς και διεισδύουν σε πολλούς τομείς—από την ιατρική μέχρι την ψυχαγωγία—καθώς οι ανάγκες αλλάζουν και η τεχνολογική πρόοδος επιταχύνεται. Για την ανάπτυξη πιο αποδοτικών λύσεων, παρατηρείται αυξανόμενη προτίμηση στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που αναφέρονται στον νομικό ορισμό του στην Ενότητα [1]. Ωστόσο, τίθενται ερωτήματα όσον αφορά την αξιοπιστία, την ασφάλεια και τη δυνατότητα σύγκρισης με κλειστές λύσεις μεγάλων εταιρειών: «Είναι τα ανοιχτά λογισμικά επαρκώς αξιόπιστα; Ποιο είναι το επίπεδο ασφάλειάς τους; Ανταγωνίζονται ή υπερτερούν των κλειστών λύσεων;»

2.1 Επίδραση στην αξιοπιστία

Αξιοπιστία λογισμικού, κατά το ISO/IEC/IEEE, ορίζεται ως η «πιθανότητα το λογισμικό να μην προκαλέσει αποτυχία ενός συστήματος για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπό συγκεκριμένες συνθήκες» [2]. Στο πλαίσιο του ανοιχτού κώδικα, η διαφάνεια του κώδικα («ανοιχτό μάτι») επιτρέπει σε πολλούς προγραμματιστές να εντοπίζουν και να διορθώνουν σφάλματα άμεσα. Έργα όπως ο πυρήνας Linux, το Kubernetes και η PostgreSQL διατηρούν υψηλή σταθερότητα, καθώς χιλιάδες contributors συμβάλλουν σε συνεχή επιθεώρηση και βελτίωση [3]. Αντίθετα, σε κλειστού κώδικα λύσεις, ο αριθμός των προγραμματιστών είναι περιορισμένος και η διαδικασία αναφοράς σφαλμάτων πιο αργή.

Σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης [3], ενώ η MongoDB παρουσίαζε αρχικά περισσότερα bugs σε σύγκριση με τη Microsoft, αυτά εντοπίζονταν και επιλύονταν εντός λίγων ημερών, οδηγώντας σε ταχύτερη διάθεση δυνατοτήτων (shipped features) και αυξημένη παραγωγικότητα. Αντίθετα, ορισμένες κλειστές λύσεις της Microsoft απαιτούσαν εβδομάδες για διόρθωση κρίσιμων σφαλμάτων. Συνολικά, η ταχύτητα εντοπισμού και επίλυσης σφαλμάτων σε ανοιχτού κώδικα έργα μειώνει σημαντικά την πιθανότητα αστάθειας συστήματος.

2.2 Επίδραση στην ασφάλεια

Η ασφάλεια λογισμικού, κατά το ISO/IEC/IEEE, ορίζεται ως «η προστασία του υλικού ή λογισμικού από τυχαία ή κακόβουλη πρόσβαση, χρήση, τροποποίηση, καταστροφή ή αποκάλυψη» [2]. Αν και βάσει του CVE dataset (2018–2019) ο ανοιχτός κώδικας εμφάνιζε περισσότερες καταγεγραμμένες ευπάθειες σε σύγκριση με πολλά κλειστά προγράμματα, αυτό επηρεάστηκε από παράγοντες όπως:

- Συχνή προσθήκη νέων χαρακτηριστικών (π.χ. στο Docker, στο Kubernetes) που μπορεί να εισάγουν λογικά σφάλματα.
- Περιορισμένα ιστορικά δεδομένα για παλαιότερες εκδόσεις, καθιστώντας τη σύγκριση ατελή.
- Διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης: π.χ. σε έργα ανοιχτού κώδικα παρέχονται ανοιχτοί έλεγχοι ασφαλείας, ενώ σε κλειστού κώδικα ενδέχεται να καθυστερεί η αποκάλυψη ευπαθειών.

Στην πράξη, ευπάθειες όπως η Log4Shell (CVE-2021-44228) στο Apache Log4j εντοπίστηκαν και διορθώθηκαν μέσα σε 48 ώρες από την κοινότητα [3], ενώ αντίστοιχες ευπάθειες σε κλειστά συστήματα (π.χ. Windows PrintNightmare) παρέμειναν κρυφές για μήνες. Επιπλέον, μελέτη σε 50.628 κρίσιμα έργα στο GitHub [4] ανέδειξε:

- **Ευρεία Ευπάθεια μέσω μεταδεδομένων Git**: Το 85,9% των έργων ήταν ευάλωτα σε επιθέσεις πλαστογράφησης email, επιτρέποντας κακόβουλους χρήστες να ενσωματώσουν ψευδείς συνεισφορές.
- **Χαμηλή Υιοθέτηση Ψηφιακών Υπογραφών**: Μόνο το 2% των χρηστών υπέγραφε πάντα τα commits και το 0,2% των έργων είχε πλήρη υπογραφή, καθιστώντας δύσκολο τον έλεγχο της προέλευσης αλλαγών.
- **Κενά στις Οδηγίες Ασφαλείας**: Παρότι οι περισσότερες οδηγίες αναφέρουν κινδύνους πλαστογράφησης, ελάχιστες καλύπτουν την επαλήθευση email στο GitHub, αφήνοντας κενά στην κατανόηση ασφαλών πρακτικών.

Συνεπώς, οι ευπάθειες αποδίδονται κυρίως σε ανθρώπινο παράγοντα (ανεπαρκής code review, έλλειψη CI/CD διαδικασιών, αδρανείς υπογραφές commits) παρά στη φύση του ανοικτού κώδικα. Η υιοθέτηση εργαλείων ανίχνευσης ευπαθειών (π.χ. Dependabot, Snyk), αυστηρή πολιτική code review και συνεχείς αυτοματοποιημένες δοκιμές μειώνουν σημαντικά τον κίνδυνο στις περισσότερες περιπτώσεις.

2.3 Η οικονομική επίδραση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα - Μείωση κόστους ανάπτυξης και ανάλυση οικονομικού όφελους

Η μελέτη [5] έδειξε ότι το 90% των εταιρειών που υιοθετούν λογισμικά ανοιχτού κώδικα πετυχαίνουν σημαντική οικονομική εξοικονόμηση. Συνοπτικά, τα βασικά οφέλη είναι:

- **Διαφημιστική αποτελεσματικότητα:** Χρήση πλατφορμών όπως το GitHub και το GitLab επιτρέπει σε νέα προϊόντα (π.χ. Next.js, Electron) να διαδοθούν γρήγορα μέσω της κοινότητας. Χρήστες που ικανοποιούνται μοιράζονται blog posts, tutorials και social media αναφορές, μειώνοντας δραστικά τα έξοδα μάρκετινγκ.

- **Οφέλη από επιχειρήσεις που βασίζονται σε OSS:** Εταιρείες όπως η Red Hat (OpenShift), η Elastic (Elastic Stack) και η MongoDB (MongoDB Atlas) διαθέτουν δωρεάν βασικές εκδόσεις, ενώ κερδίζουν από υπηρεσίες υποστήριξης ή enterprise modules. Παράδειγμα αποτελεί η GitLab, που προσφέρει το Community Edition δωρεάν και έσοδα από το Ultimate για CI/CD και compliant λειτουργίες.
- **Απόκτηση πελατών:** Χαμηλό κόστος εισόδου σε εργαλεία όπως το TensorFlow, το PyTorch ή το Kubernetes επιτρέπει σε startups να δοκιμάσουν λύσεις άμεσα. Η εμπειρία χρήσης οδηγεί πολλά μέλη της κοινότητας να επενδύουν σε επιπλέον υπηρεσίες (cloud hosting, managed databases), μετατρέποντας εθελοντές σε πελάτες.
- **Μείωση του κόστους:** Η χρήση δωρεάν εργαλείων ανάπτυξης, π.χ. VS Code, Docker, Kubernetes, και αυτοματοποιημένων συστημάτων ενσωμάτωσης (Jenkins, GitHub Actions) μειώνει τόσο τις άδειες όσο και τις απαιτήσεις για εσωτερική υποδομή. Πολλές εταιρείες (π.χ. νεοφυείς επιχειρήσεις στο χώρο του IoT με Raspberry Pi) περιορίζουν τα λειτουργικά έξοδα εφαρμόζοντας open source λύσεις.
- **Πρόσβαση στην αγορά:** Οι ελαστικές άδειες (MIT, Apache 2.0) επιτρέπουν σε εταιρείες περιορισμένου κεφαλαίου να αναπτύξουν καινοτόμα προϊόντα (π.χ. Django, Flask, Node.js εφαρμογές) χωρίς γραφειοκρατικά εμπόδια. Αυτό καθιστά εφικτή τη γρήγορη είσοδο σε τομείς όπως AI/ML, blockchain και IoT, όπου η ταχύτητα ανάπτυξης και η χαμηλή επένδυση είναι κρίσιμα.

Η συνδυαστική αξιοποίηση open source και εμπορικών μοντέλων μεγιστοποιεί τα οικονομικά οφέλη, ενισχύοντας παράλληλα την καινοτομία και τη βιωσιμότητα των εταιρειών.

2.4 Η επίδραση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα στην καινοτομία

Η καινοτομία αποτελεί κινητήριο δύναμη στην πληροφορική. Το λογισμικό ανοιχτού κώδικα, χάρη στην ελεύθερη διαθεσιμότητά του και στην ανοιχτή του φύση, διευκολύνει τη γέννηση και γρήγορη διάδοση νέων ιδεών, μειώνοντας τα εμπόδια εισόδου και επιταχύνοντας τη συνεργασία.

2.4.1 Μελέτη του ρόλου της κοινότητας στην ανάπτυξη νέων λειτουργιών

Η ενεργή κοινότητα των ανοιχτών λογισμικών ενισχύει την καινοτομία μέσω:

- **Ανοιχτού πειραματισμού:** Οποιοσδήποτε μπορεί να δοκιμάσει τροποποιήσεις σε δημοφιλή έργα όπως το Hugging Face Transformers, όπου χιλιάδες συνεισφέροντες βελτιώνουν μοντέλα BERT, GPT-2/3/4, προσθέτοντας fine-tuning τεχνικές και νέες λειτουργίες [7].
- **Διάχυσης γνώσης:** Το Visual Studio Code ξεκίνησε ως ανοιχτό έργο της Microsoft και, μέσω εξωτερικών extensions, αυξάνει συνεχώς τη λειτουργικότητά του, με contributions από ανεξάρτητους προγραμματιστές.
- **Εταιρικών συνεργειών:** Έργα όπως το Docker και το Kubernetes αναπτύσσονται με contributions από εταιρείες (π.χ. Spotify, Shopify) και από την κοινότητα (π.χ. K3s), επιτρέποντας την γρήγορη ενσωμάτωση βελτιώσεων σε containers και orchestration [6].

Για τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα, η μελέτη [7] δείχνει γραμμική αύξηση των contributors σε repos όπως "transformers", ενώ η έρευνα [8] επισημαίνει την ανάγκη αυστηρού code review λόγω του υψηλού αριθμού ευπαθειών σε εξωτερικές βιβλιοθήκες.

2.4.2 Επίδραση της διαφάνειας του κώδικα στη δημιουργία πρωτότυπων λύσεων

Η διαφάνεια του κώδικα συμβάλλει στην καινοτομία πέραν της πληροφορικής [9]:

- **Web Frameworks:** Το Next.js, ανοιχτού κώδικα πλαίσιο React από το Vercel, ενσωματώνει λειτουργίες όπως ISR (Incremental Static Regeneration) μέσω contributions, και χρησιμοποιείται από εταιρείες όπως το Netflix για high-performance frontends.
- **IoT and Smart Home:** Το Home Assistant παρέχει ολοκληρωμένο οικοσύστημα για έξυπνα σπίτια, με χιλιάδες integrations (π.χ. Philips Hue, Sonos) που αναπτύσσονται από την κοινότητα, επιτρέποντας πλήρη εξατομίκευση χωρίς συνδρομητικά κόστη.
- **Real-time Data Streaming:** Το Apache Kafka εξελίσσεται μέσω contributions σε connectors (π.χ. MongoDB Sink Connector) και client libraries σε γλώσσες όπως Rust και Go, υποστηρίζοντας επιχειρήσεις όπως Uber και LinkedIn για επεξεργασία υψηλού throughput.

Η ελεύθερη πρόσβαση στον κώδικα ενισχύει την εμπιστοσύνη, καθώς χιλιάδες χρήστες ελέγχουν για ευπάθειες ή κακόβουλες λειτουργίες, ενώ εργαλεία όπως το Dependabot και το Snyk αυτοματοποιούν τον έλεγχο εξαρτήσεων. Αυτά συμβάλλουν στη διάχυση καινοτομιών στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, τις web εφαρμογές, την τεχνητή νοημοσύνη και άλλους τομείς, επιταχύνοντας τη δημιουργία πρωτότυπων λύσεων.

2.5 Συμπεράσματα

Η έρευνα έδειξε ότι το λογισμικό ανοιχτού κώδικα, παρότι ενδέχεται να εμφανίζει ευπάθειες λόγω της ελεύθερης διάθεσής του, ωφελείται από τη συλλογική επίβλεψη και συνεισφορά της κοινότητας, επιτρέποντας ταχύτατη ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, καθώς και γρήγορη ενσωμάτωση καινοτομιών. Οικονομικά, η εθελοντική συμμετοχή μειώνει σημαντικά το κόστος παραγωγής για τις εταιρείες, ενώ παράλληλα δημιουργεί νέες ευκαιρίες κερδοφορίας, αφού οι ενεργοί συνεισφέροντες καθίστανται συχνά πελάτες ή ακόμη και μέλη του προσωπικού των αντίστοιχων επιχειρήσεων. Κοινωνικά, η διαφάνεια και η θεσμική εμπιστοσύνη που προωθεί το ανοιχτό μοντέλο ενισχύει τη συνεργασία και διάχυση της τεχνογνωσίας, οδηγώντας σε έναν διαρκή κύκλο βελτιώσεων. Συνολικά, η δυναμική του λογισμικού ανοιχτού κώδικα μπορεί να αναδιαμορφώσει θετικά τη βιομηχανία της τεχνολογίας και να επιφέρει ευρύτερα οφέλη στην καθημερινή μας ζωή.

3 Αναφορές

[1] *Νομικό Περιοδικό Συνήγορος - Τεύχος 64, 2007*. 2007. https://iglezakis.gr/wp-content/uploads/2016/04/OiAdiesLogismikouAniktouKodika.pdf.

[2] *ISO/IEC/IEEE 24765:2017, Systems and Software Engineering — Vocabulary*. ISO/IEC/IEEE, 2017. https://www.iso.org/standard/71952.html.

[3] Avatavului Cristian and Cucu Andrei-Iulian and Gherghescu Alexandru-Mihai and Boiangiu Costin-Anton and Stanica Iulia-Cristina and Tudose Cătălin and Voncilă Mihai-Lucian and Rosner Daniel. "OPEN-SOURCE AND CLOSED-SOURCE PROJECTS: A FAIR COMPARISON." Στο: Journal of Information Systems and Operations Management 17.2 (2023).

[4] Holtgrave Jan-Ulrich and Friedrich Kay and Fischer Fabian and Huaman Nicolas and Busch Niklas and Klemmer Jan and Fourné Marcel and Wiese Oliver and Wermke Dominik and Fahl Sascha. "Attributing Open-Source Contributions is Critical but Difficult: A Systematic Analysis of GitHub Practices and Their Impact on Software Supply Chain Security". Στο: Ιαν. 2025. https://doi.org/10.14722/ndss.2025.240613.

[5] Li Xuetao and Zhang Yuxia and Osborne Cailean and Zhou Minghui and Jin Zhi and Liu Hui. "Systematic Literature Review of Commercial Participation in Open Source Software". Στο: ACM Transactions on Software Engineering and Methodology 34 (Αύγ. 2024). https://doi.org/10.1145/3690632.

[6] Yenişen Yavuz Elçin and Riehle Dirk and Mehrotra Ankita. "Why do companies create and how do they succeed with a vendor-led open source foundation". Στο: Empirical Software Engineering 30 (Δεκ. 2024). https://doi.org/10.1007/s10664-024-10588-9.

[7] Vake Domen and Šinik Bogdan and Vičič and Jernej Tošić Aleksandar. *Is Open Source the Future of AI? A Data-Driven Approach*. Ιαν. 2025. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.16403.

[8] Kathikar Adhishree and Nair Aishwarya and Lazarine Ben and Sachdeva Agrim and Samtani Sagar. "Assessing the Vulnerabilities of the Open-Source Artificial Intelligence (AI) Landscape: A Large-Scale Analysis of the Hugging Face Platform". Στο: 2023 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI). 2023, σσ. 1–6. https://doi.org/10.1109/ISI58743.2023.10297271.

[9] Wang Yifei. *The Power of Openness- How Open Source Software is Reshaping Software Engineering and Industrial Adoption*. Αύγ. 2023. https://doi.org/10.36227/techrxiv.23896002.v1.

ΨΗΦΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ (M-QAM) ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ BER ΓΙΑ 4-QAM

Γ. Κ. Φωτόπουλος*, Π. Μπίθας
Τεχνολογιών Ψηφιακής Βιομηχανίας,
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ψαχνά
sdt2200234@uoa.gr

11 Ιουνίου 2025

Περιεχόμενα

Περίληψη/Abstract

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση, μελέτη και ανάλυση ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας που βασίζεται στην **τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους** (**M-QAM** – *M-ary Quadrature Amplitude Modulation*), με έμφαση στον υπολογισμό του **ρυθμού σφάλματος ανά bit** (**BER** – *Bit Error Rate*) μέσω αλγορίθμου επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης τύπου μηχανών διανυσμάτων στήριξης (**SVM** – *Support Vector Machine*). Η M-QAM αποτελεί βασική τεχνική σε πληθώρα σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, όπως στα **πρότυπα WiFi** (π.χ. *IEEE 802.11x*), στα **κυψελωτά δίκτυα 4G/5G**, καθώς και σε **αναλογικά συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης**. Το χαρακτηριστικό που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη, είναι η *ικανότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων σε περιορισμένο φάσμα*, γεγονός κρίσιμο για τη *βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες*. Η διαδικασία εκπομπής του σήματος από τον πομπό περιλαμβάνει τα εξής στάδια: την παραγωγή του ημιτονοειδούς, τη δειγματοληψία, κβαντοποίηση και δυαδική κωδικοποίησή του, καθώς και τη *διαμόρφωση με τετραγωνική M-QAM*. Στη συνέχεια, μετά την *εισαγωγή λευκού προσθετικού Γκαουσιανού θορύβου* (**AWGN** – *Additive White Gaussian Noise*), ο δέκτης εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει την αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση του σήματος, με στόχο την **όσο το δυνατόν ακριβέστερη ανάκτησή του**. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται και συγκρίνεται η **θεωρητική BER, η οποία υπολογίζεται μέσω του προσεγγιστικού τύπου, με την πειραματική**, που εξάγουμε από την προσομοίωση. Αξίζει να σημειωθεί, ότι λόγω υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων, **η λεπτομερής ανάλυση περιορίζεται στην περίπτωση της 4-QAM**. Η **συσχέτισή** τους αποσκοπεί στην *επιβεβαίωση της ακρίβειας της θεωρητικής μοντελοποίησης*, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα τη σημασία και αξιοπιστία της συγκεκριμένης διαμόρφωσης.

Λέξεις κλειδιά: M-QAM, BER, Μηχανική Μάθηση, SVM, Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος

1 Εισαγωγή/Introduction

Ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, στον χώρο της επιστήμης και συγκεκριμένα των τηλεπικοινωνιών, οι απαιτήσεις για αποδοτικότερη μετάδοση δεδομένων αυξάνονται ραγδαία [5]. Η *τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM)* αποτελεί μία από τις πλέον σημαντικότερες τεχνικές μετάδοσης, καθώς *αξιοποιεί αποτελεσματικά το διαθέσιμο φάσμα* μέσω της ταυτόχρονης διαμόρφωσης δύο ορθογώνιων συνιστωσών: της *In-phase (I)* και της *Quadrature (Q)* [3]. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε **πρότυπα Wi-Fi** (π.χ. *IEEE 802.11x* [4]), στα **κυψελωτά δίκτυα 4G/5G** [6], καθώς και σε **παλαιότερα αναλογικά συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης** [1]. Παρά τη φασματική της αποδοτικότητα, δηλαδή την ικανότητά της να μεταφέρει μεγάλο όγκο πληροφορίας σε περιορισμένο εύρος συχνοτήτων, η M-QAM παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στον θόρυβο και στις παραμορφώσεις του καναλιού, καθιστώντας κρίσιμη τη μελέτη και αξιολόγηση της απόδοσής της υπό πραγματικές συνθήκες [2]. Βασικό εργαλείο για τη μέτρηση της επίδοσης του διαμορφωμένου συστήματος, αποτελεί *η μελέτη του* **ρυθμού σφάλματος ανά bit** (*BER*). Στη συγκεκριμένη εργασία θα επικεντρωθούμε στην υλοποίηση ενός, όσο το δυνατόν, **πλήρους ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας με M-QAM**, και συγκεκριμένα **4-QAM**, σε περιβάλλον **MATLAB©**, με στόχο τη θεωρητική και πειραματική μελέτη του BER. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στη χρήση του *αλγορίθμου επιβλεπόμενης μάθησης SVM* για την ταξινόμηση των ληφθέντων σημάτων.

1.1 Σημαντικές παρατηρήσεις

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, υιοθετούνται ορισμένες παραδοχές για λόγους απλοποίησης. Πρώτον, θεωρείται ότι στο υπό μελέτη τηλεπικοινωνιακό σύστημα υπάρχει *ιδανικός συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη*, δηλαδή δε λαμβάνονται υπόψη σφάλματα χρονισμού ή φάσης. Δεύτερον, τίθεται η υπόθεση ότι *η πλευρά του δέκτη δε συντελεί αρνητικά στην ανάκτηση του σήματος*, παραβλέποντας φαινόμενα όπως οι αποκρίσεις των μη ιδανικών φίλτρων, ή οι ατέλειες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Τρίτον, το κανάλι μεταφοράς μοντελοποιείται με χρήση του **λευκού προσθετικού Γκαουσιανού θορύβου** (**AWGN** – *Additive White Gaussian Noise*), που θεωρείται επαρκής προσέγγιση για απλοποιημένες προσομοιώσεις, όπως στις δορυφορικές ή καλωδιακές συνδέσεις, αγνοώντας πιο πολύπλοκες συνθήκες διάδοσης όπως η πολυδιαδρομική διάδοση και η μεταβλητότητα του καναλιού σε επίγειες συνδέσεις. Τέταρτον, όσον αφορά τη δημιουργία των δεδομένων προς μετάδοση, απαιτείται ότι *τα bits είναι ισοπίθανα και τυχαία*, με αποτέλεσμα τα σύμβολα του διαμορφωτή να εμφανίζονται με σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η υλοποίηση του συστήματος έχει πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον *MATLAB©*, πράγμα που σημαίνει ότι έχουν επιλεγεί εργαλειοθήκες οι οποίες είτε δεν παρέχονται από την απλή φοιτητική έκδοση του λογισμικού, είτε δεν έχουν υλοποιηθεί εξ ολοκλήρου τα αντίστοιχα πακέτα στην **Octave©**. Επιπλέον, για την απεικόνιση των αστερισμών, έχει επιλεγεί η σταθερή διακύμανση θορύβου (σ_w^2), με τιμές στο διάστημα $[10^{-6}, 10^{-2}]$. Η ενέργεια συμβόλου (E_s), δηλαδή η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρει κάθε σήμα κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου, παραμένει σταθερή και δεν προσαρμόζεται δυναμικά βάσει του σηματοθορυβικού λόγου (SNR_{dB}), ο οποίος εκφράζει το πόσο "καθαρό" είναι το σήμα σε σχέση με τον θόρυβο, χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα μέτρησης. Τέλος, η *δυναμική παραμετροποίηση* για την επιλογή επαρκούς μήκους **bitstream**, εξασφαλίζει ότι οι υπολογισμοί του *BER* και η σύγκριση των καμπυλών θα είναι στατιστικά έγκυροι.

1.2 Μαθηματικά

Δίνονται εκ των προτέρων οι παρακάτω παράμετροι, για την πλήρη κατανόηση των θεωρημάτων:

1. **M**: τάξη διαμόρφωσης
2. **Ενέργεια ανά bit**: $E_b = \frac{E_s}{\log_2(M)}$
3. **Διακύμανση θορύβου**: $N_0 = \bar{\sigma}_w^2 = 10^{-6}$

Προσεγγιστική πιθανότητα σφάλματος για M-QAM (βλέπε κώδικα)

1. Η προσεγγιστική πιθανότητα σφάλματος για M-QAM ορίζεται ως:

$$P_b \approx \frac{4}{\log_2(M)} \cdot (1 - \frac{1}{\sqrt{M}}) \cdot Q(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(M)}{2 \cdot (M-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}})$$

όπου:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{(-\frac{u^2}{2})} du$$

και:

$$x = \sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(M)}{2 \cdot (M-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}}$$

2. Για $M = 4$, δηλαδή στην περίπτωση της διαμόρφωσης 4-QAM, ο γενικός τύπος για το θεωρητικό BER προσεγγίζεται ως:

$$P_b \approx \frac{4}{\log_2(4)} \cdot (1 - \frac{1}{\sqrt{4}}) \cdot Q(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(4)}{2 \cdot (4-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}})$$

ο οποίος μόνο για την 4-QAM απλοποιείται ως:

$$P_b \approx 2 \cdot (1 - \frac{1}{2}) \cdot Q(\sqrt{\frac{6}{6} \cdot \frac{E_b}{N_0}}) \approx Q(\sqrt{E_b})$$

1.3 Αλγόριθμοι

Η ταξινόμηση των ληφθέντων σημάτων πραγματοποιείται με τη χρήση ενός επιβλεπόμενου αλγορίθμου μηχανικής μάθησης τύπου μηχανών διανυσμάτων στήριξης (**SVM** – *Support Vector Machine*). Αρχικά, το μοντέλο εκπαιδεύεται πάνω στο αρχικό σύνολο αστερισμών, προτού εισαχθεί ο θόρυβος, όπου κάθε σύμβολο αντιστοιχίζεται σε μία μοναδική ετικέτα. Στη συνέχεια, το μοντέλο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη αυτής της ετικέτας (index) των ληφθέντων συμβόλων, δηλαδή αυτών μετά την εισαγωγή του θορύβου. Η υλοποίηση πραγματοποιείται μέσω της ενσωματωμένης συνάρτησης `fitcecoc()` της *MATLAB*©, η οποία εφαρμόζει πολυκατηγορική ταξινόμηση μέσω εκπαίδευσης δυαδικών SVM ταξινομητών, όπως φαίνεται στον κώδικα.

1.3.1 Κώδικας

1. Παρακάτω, φαίνεται ο κώδικας για τον υπολογισμό του θεωρητικού ρυθμού σφάλματος ανά bit (BER), χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική μέθοδο:

```
M = 4;   % Modulation order
SNR_dB_range_theoretical = 0 : 0.1 : max_SNR_dB;  % Let 'max_SNR_dB =
    20'

Eb_N0_dB = zeros(size(SNR_dB_range_theoretical));
```

```
ber_theoretical = zeros(size(SNR_dB_range_theoretical));

for i = 1:length(SNR_dB_range_theoretical)
  SNR_dB = SNR_dB_range_theoretical(i);

  Es = sigma_w2 * 10^(SNR_dB / 10);
  Eb = Es / bits_per_symbol;
  Eb_N0 = Eb / sigma_w2;
  Eb_N0_dB(i) = 10 * log10(Eb_N0);

  Qarg = sqrt((3 * bits_per_symbol / (2 * (M - 1))) * (Eb_N0));
  Pe = (4 / bits_per_symbol) * (1 - 1/sqrt(M)) * qfunc(Qarg);

  ber_theoretical(i) = Pe;
end
```

2. Και εδώ ο κώδικας για την εκμάθηση του μοντέλου SVM:

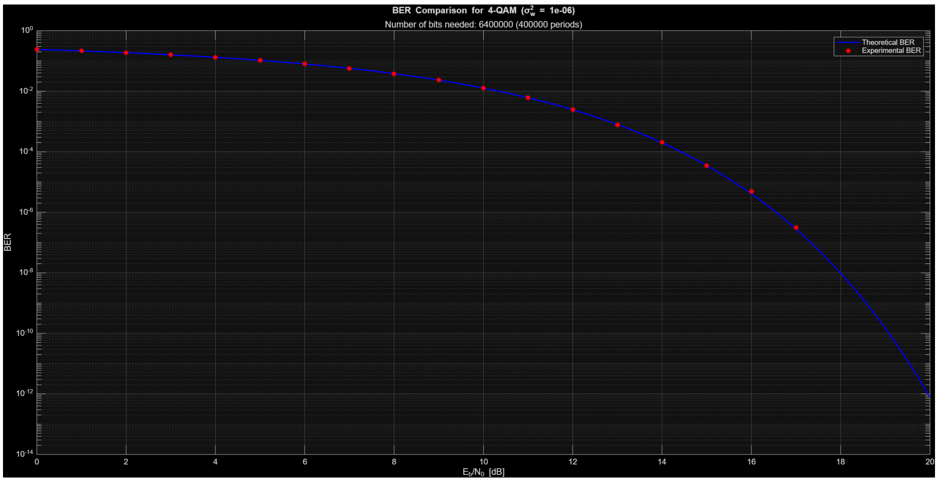
```
% Train an SVM model using the ideal constellation
labels = (1:size(symbol_map_2D, 1))';  % Index per symbol
SVM_model = fitcecoc(symbol_map_2D, labels);

% Predict classes of received signal
detected_indices = predict(SVM_model, received_signal_2D);
```

Ο υπόλοιπος κώδικας του project παραλείπεται για οικονομία χώρου.

2 Περιγραφή Προβλήματος/Problem Description

Το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία αφορά την αξιολόγηση της απόδοσης ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας που βασίζεται στη διαμόρφωση M-QAM, με στόχο την προσεγγιστική εκτίμηση του ρυθμού σφάλματος ανά bit (*BER*) σε περιβάλλον θορυβώδους καναλιού. Όπως αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περίπτωση της 4-QAM, λόγω υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων. Η σύγκριση της θεωρητικής καμπύλης BER με την πειραματική, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής BER για 4-QAM

2.1 Βιβλιογραφικές αναφορές

Αναφορές

[1] Analog Devices. What is quadrature amplitude modulation (qam)? https://www.analog.com/en/resources/glossary/qam.html, 2024.

[2] John G. Proakis and Masoud Salehi. Digital communications. 2001.

[3] ScienceDirect. Quadrature amplitude modulation - an overview | sciencedirect topics. https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/quadrature-amplitude-modulation, 2025.

[4] Cisco Systems. 802.11ac: The fifth generation of wi-fi. https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.html, 2014.

[5] Cisco Systems. Cisco annual internet report (2018–2023) white paper. https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html, 2022.

[6] Waveform. How modulation and coding affects 4g lte and 5g data speeds. https://www.waveform.com/a/b/guides/modulation-coding-speeds, 2024.

V2X Communications over 5G Networks

Athanasios Kanavos and Alexandros Kaloxylos

Department of Informatics and Telecommunications, University of Peloponnese, Akadimaikou G. K. Vlachou Street, 221 31, Tripoli, Greece, kanavosa@uop.gr

11 June 2025

Abstract: 5G networks are expected to play a pivotal role in enabling autonomous driving. Recently, various use cases (UCs) have been identified, and several standardized solutions have been developed. Although significant advancements have been made, research is ongoing to determine whether current solutions can fully meet all the requirements for every level of autonomous driving automation. This paper outlines the requirements for the latest and most advanced autonomous driving UCs and examines the extent to which 5G networks can support these applications in terms of delay and spectrum utilization.

Key Words: V2X, V2X Use Cases, Delay Analysis, Spectrum Analysis.

1 Introduction

Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) is an innovative connected mobility platform that enables vehicles to communicate with their environment, including other vehicles, cyclists, pedestrians, road infrastructure, and mobile networks. C-V2X provides a comprehensive solution for vehicle-to-vehicle (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I), vehicle-to-pedestrian (V2P), and vehicle-to-network (V2N) communications, leveraging the existing cellular network infrastructure.

In [1] and [2], the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) has defined a wide range of services that require vehicle communication. The data exchange among vehicles includes the transmission of simple Cooperative Awareness Messages (CAM) and Decentralized Environmental Notification Messages (DENM), as well as specific trajectory information and sensor data. The end-to-end delay for this information exchange typically ranges from 100 ms down to 3 ms for some extreme cases. Throughput ranges from a few kbps up to 1 Gbps, and reliability varies from 90% to 99,999%. Additionally, the 5G Automotive Association (5GAA) has developed a comprehensive set of UCs and requirements, addressing methodological aspects as envisioned by the automotive industry. [3] provides a first analysis of delay for V2X UCs for Long Term Evolution Advanced (LTE-A) based systems. 5GAA in [[4] provides the spectrum needs of UCs for intelligent transport systems (ITS) and advanced driving as implemented by C-V2X technologies.

Our paper outlines the requirements for the most advanced UCs as described by 5GAA and 3GPP, the extent of support that existing 5G networks provide in terms of delay and capacity, and a brief discussion of potential solutions and technological trends that address existing shortcomings. The rest of the paper is organized as follows: Section 2 presents the UCs' definitions and performance requirements by 5GAA and 3GPP. Sections 3 and 4 provide a delay and spectrum analysis, respectively, for 5G networks and compare the findings to the UCs' requirements. Section 5 discusses open issues and research directions, concluding the paper.

2 V2X Services

V2X UCs are typically characterized by requirements in terms of throughput, latency, and reliability. We focus on the most advanced UCs, defined by 5GAA as autonomous driving and advanced driving assistance. 3GPP defines UCs as: a) Non-safety V2X services, b) Safety-related V2X services, and c) V2X services in multiple 3GPP Radio Access Technologies (RATs) and network environments.

Network-related requirements of the considered UCs are summarized in **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**. In some cases, delay, reliability, and throughput are reported in range values, considering different levels of autonomous driving. 3GPP in 0 has specified more stringent requirements for several UCs to prepare the networks for the highest level of automation. Aims for <5 ms end-to-end delay for ultra-reliable low latency communications (URLLC), as a 10 ms value is more aligned to LTE-V2X targets. At 100 km/h (~28 m/s), a 3 ms delay is ~8.4 cm travel before the signal is processed, while 10 ms is ~28 cm travel distance. This difference can significantly impact split-second decisions in delay-critical autonomous driving UCs. The Remote Driving throughput requirement of 16 Mbps is based on a minimum of ~4 HD video streams.

UC#	Title	Delay		Reliability		Throughput	
		5GAA	3GPP	5GAA	3GPP	5GAA	3GPP
1	Platooning (Vehicles driving in cooperation)	Delay Sensitive	10-25 ms	-	90 %	48 kbps (SL)	-
2	Sensor and State Map Sharing (Sharing of sensor data to build a shared map)	-	10 ms	-	90 %	16 Mbps (DL) 12 Mbps (UL)	25 Mbps
3	Remote Driving (Remote control of a vehicle)	Delay Sensitive	5 ms	-	-	400 kbps (DL) 36 Mbps (UL)	1-20 Mbps
4	Lane Change (Cooperative Lane change or lane merging)	-	10-25 ms	-	90-99.99%	120 kbps (SL)	-
5	Infrastructure-Based Perception of Environment (Information about objects)	-	3-100 ms	-	-	4 Mbps (DL) 110 Mbps (UL)	50 Mbps
6	Collision Avoidance (Enable collision avoidance)	-	<10 ms	-	99.99%	80 kbps (SL)	-
7	Collective Information Sharing (Sharing of high-resolution data)	10 ms	100 ms	-	(high)	520 kbps (SL)	520 kbps
8	See Through for Passing (Transmission of video during car overtaking)	50 ms	10-50 ms	99%	90-99.99%	8 Mbps (SL)	10-700 Mbps
9	Emergency Trajectory Alignment (Trajectory information exchange)	-	3 ms	-	99.999%	48 kbps (SL)	30 Mbps
10	Intersection Crossing (Cooperative automated driving information exchange)	-	-	-	-	25 kbps (SL)	50 Mbps
11	Cooperative Driving (Exchange of information to coordinate vehicles)	-	<5 ms	-	99.99%	-	384 kbps

Table 1: UCs' requirements

3 Delay Analysis for V2X Communications

Latency is of pivotal importance for V2X given its relevance to very fast reactions to potential hazards. The following subsections analyze both control and user plane latency.

3.1 Control Plane Latency

Control plane latency is related to the network Radio Resource Control (RRC) connection establishment, paging, and handover (HO). The delay during these control functions can significantly impact the performance of autonomous driving applications. For the initial establishment of an RRC connection, 5G specifications are observed to reduce the latency from 50 ms in LTE-A to 20 ms [[5]. To eliminate the need for repeated user equipment (UE) context retrieval from the network when switching from an IDLE to a CONNECTED state, a new state called RRC INACTIVE has been introduced. This is accomplished by maintaining information about the UE within the Radio Access Network (RAN). The delay introduced when switching from this state to a CONNECTED one ranges from 11.3 to 17 ms, depending on the physical layer numerology. The paging procedure is performed by the network to access a UE when the latter is in IDLE or INACTIVE states. In 5G networks, the paging cycle is significantly more flexible compared to LTE's, with its lowest value around 10 ms [[5]. Additional transmission and processing time typically ranges from 1 to 2 ms. Upon receipt of a paging message, a UE must perform an RRC connection. Such delays suggest that servicing V2X UCs will be challenging if a vehicle is in an IDLE state. Conversely, having all vehicles in CONNECTED mode will require a significant amount of radio resources to be allocated to them. Regarding HO, dual connectivity is supported. This allows the usage of make-before-break HOs that minimize the disruption time to 0 ms. The penalty is the obvious consumption of additional radio resources.

3.2 User Plane Latency

User plane latency depends on whether the communication is taking place through the Uu interface (i.e., UE-gNB) or the sidelink. The delay also depends on the type of data exchange (i.e., unicast, multicast, or broadcast) and on the use of local data routing (i.e., the data path is completed just above the RAN). We focus on the communication through the Uu interface, as for the sidelink there is no detailed standardized information. In the UL direction, grant-free transmissions can be utilized to reduce the delay [6].

To have an estimate for the end-to-end latency in the user plane, we have adopted the numerology from [7], which is highly applicable for V2X communications. We have also used the assumption from [3] that a packet faces a 3 ms delay each time it crosses a network interface (e.g., gNB to UPF to V2X AS). Our analysis also includes delays related to multicast communication and the link to the V2X application server (V2X AS).

Table 2 illustrates the expected delay in the cases of: a) end-to-end unicast communication (packets are crossing two UPFs), b) only one UPF is used, c) multicast through the Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS), and d) multicast through Single Cell Point-To-Multipoint (SC-PTM). The results are compared against the UCs' requirements. While the communication delay between UE and gNB is rather small (i.e., in the range of 0.23 to 2.45 ms depending on the numerology [6]), the delay introduced in the core network (CN) could seriously affect the support of several delay-critical V2X UCs in 5G networks.

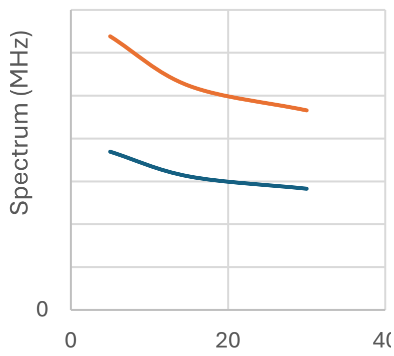
UCs	Uu Interface			
	Unicast	Unicast (Localized)	Multicast (MBSFN)	Multicast (SC-PTM)
Delay (ms)	18.59	12.59	35.8	16.8
Platooning	▽	▽	✕	▽
Sensor and State Map Sharing	✕	✕	✕	✕
Remote Driving	✕	✕	✕	✕
Lane Change	▽	▽	✕	▽
Infrastructure-Based Perception of Environment	▽	▽	▽	▽
Collision Avoidance	✕	✕	✕	✕
Collective Information Sharing	✓	✓	✓	✓
See Through for Passing	▽	▽	▽	▽
Emergency Trajectory Alignment	✕	✕	✕	✕
Cooperative Driving	✕	✕	✕	✕
✓ Fulfils ✕ Cannot fulfil ▽ Fulfil only the lower levels of automation				

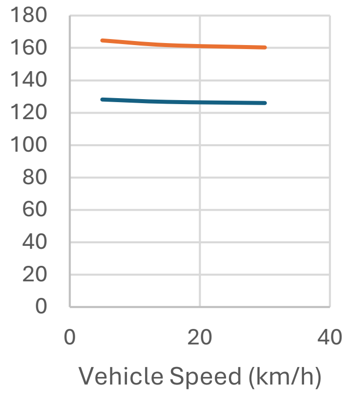
Table 2: User plane latency

4 5G Spectrum Analysis for V2X Communications

This section evaluates the needed spectrum to support the V2X UCs of Table 1. The framework provided by 5GAA in [4] is adopted for an urban intersection with six lanes on the vertical and horizontal axes. Following the analysis, we distinguish the following categories. The needed bandwidth B for V2V messages is given by: $B = \frac{M*T*a}{e*u}$ (1) where, M is the number of vehicles, T is the throughput of the service, a is the activity factor, e is the spectral efficiency, assumed to be 1.2 for the uplink 4 for the downlink and 0.6 for the sidelink, and u is the channel utilization factor equal to 0.336 for all UCs. This formula is applied to all UCs apart from UCs # 2, 3, and 5 of Table 1. Regarding the activity factor, we have assumed a value of 1 for all UCs (as they are considered to be in a fully communicating state), apart from "Platooning", "Lane Merging" (0.1), and "Collective Information Sharing" (0.8), as also assumed in 0. The spectrum needs for V2N UCs are given by: $B = \frac{T*M_D*A}{e}$ (2) where T is the required data rate per link in bit/s, M_D is the density of (transmitting or receiving) vehicles served per unit area in km^{-2}, e is the sector spectral efficiency in bits/s/Hz, and $A = \frac{}{2\sqrt{3}}ISD^2 = 0.072km^2$ is the area of the serving sector in a cell. The 5G macro cell inter-site distance (ISD) is 500m. The estimated spectrum needs of one (blue line) and two (orange line) intersections regarding the examined UCs are illustrated in **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**-3. Some of the examined UCs have limited bandwidth requirements. However, applications such as "Remote Driving," "Infrastructure-Based Perception of Environment," "Collective Information

Sharing," and "See Through for Passing" demand a significant amount of spectrum. This is due to the low spectral efficiency of uplink (UL) and sidelink (SL) transmissions.





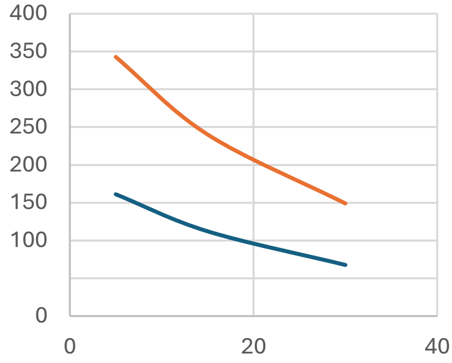


Figure 1. DL spectrum needs **Figure 2. UL spectrum needs** **Figure 3. SL spectrum needs**

5 Open Issues and Research Directions

The analysis presented identifies several open issues.

- Delay is a critical factor in wireless communications as it significantly impacts the performance and reliability of various applications. Communication through the Uu interface will experience considerable delays, particularly within the CN.
- Spectrum requirements depend on the needs and implementation of V2X UCs. Most have modest needs. However, some rely on transmitting HD video and maps, creating significant challenges due to the low spectral efficiency of the UL and SL.
- The ultra-densification of the network is a solution to support advanced V2X UCs. However, this approach will lead to a significant number of HOs and a dramatic increase in associated signaling.

The open issues mentioned present interesting opportunities for further research.

- 5G CN architecture optimization through the network functions placement (e.g., AMF, SMF, UPF) to reduce delay between the RAN and the data plane.
- Leveraging Multi-Access Edge Computing (MEC) [[10] to reduce CN delay by localizing traffic breakout to edge data centers.
- Maximizing the advantages of Multiple Input - Multiple Output (MIMO) systems.
- Combining several V2X UCs to enhance the vehicle's perception of the environment through multicasting and geo-casting techniques.
- Predictive (AI/ML-based) mobility management to pre-provision paths and reduce latency during HOs.

References

[1] 3GPP, TR 22.886 V16.2.0, "Study on enhancements and support for 5G V2X services" (Release 16), December 2018.
[2] 3GPP, TR 22.885 V14.0.0, "Study on LTE support for V2X services" (Release 14), December 2015.
[3] 5GAA, "Cellular V2X Conclusions based on Evaluation of Available Architectural Options", White Paper, February 2019.
[4] 5GAA, Study of spectrum needs for safety related intelligent transportation systems - day 1 and advanced use cases, June 2020.
[5] 3GPP TS 38.331, V18.5.1, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 18), March 2025.
[6] 3GPP TR 37.910, V18.0.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on self evaluation towards IMT-2020 submission (Release 18), April 2024.
[7] 3GPP TR 38.885 V16.0.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Study on NR Vehicle-to-Everything (V2X) (Release 16), March 2019.
[8] S. Roger and D.M. Sacristan, "Low-Latency Layer-2-Based Multicast Scheme for Localized V2X Communications," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 20, Issue 8, August 2019.

[9] D. M. Sacristan and S. Roger, "Low-Latency Infrastructure-Based Cellular V2V Communications for Multi-Operator Environments with Regional Split," IEEE Transactions on ITS, January 2020.
[10] Y. Mao, C. You et. al, "A survey of Mobile Edge Computing: The communication Perspective", IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol 19, No 1, 2017.

Επίδραση της Θέσης του Χρήστη στην Ισχύ Κινητών Τηλεφώνων σε Εσωτερικά Περιβάλλοντα

Ιωάννα Ταξιαρχία Μίχου, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, dit22133@go.uop.gr

Αναστάσιος Καλομοίρης, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, dit22067@go.uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η εργασία αυτή εξετάζει την επίδραση της θέσης του χρήστη εντός εσωτερικών χώρων στην ισχύ του σήματος κινητής τηλεφωνίας. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ισχύος σε τρία σημεία διαφορετικής απόστασης από παράθυρο, με χρήση τριών κινητών Echo One και για τρεις διαφορετικούς παρόχους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από το παράθυρο, μειώνεται η λαμβανόμενη ισχύς και αυξάνεται η εκπεμπόμενη ισχύς του κινητού, επηρεάζοντας δυνητικά την ποιότητα της σύνδεσης και την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις μεταξύ παρόχων ως προς την κάλυψη, τη σταθερότητα και τα ποσοστά απώλειας δεδομένων. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν τη σημασία της χωρικής θέσης για την αξιοπιστία της σύνδεσης σε εσωτερικούς χώρους.

Λέξεις κλειδιά: Εκπεμπόμενη / λαμβανόμενη ισχύς, συστήματα κινητής τηλεφωνίας, κινητά τηλέφωνα, δίκτυο κινητής, ποιότητα σήματος

1 Εισαγωγή

Στην σύγχρονη εποχή, τα κινητά έχουν ενσωματωθεί στην καθημερινή ζωή. Οι άνθρωποι τα χρησιμοποιούν για όλες τους τις ανάγκες όπως επικοινωνία, online πληρωμές, πλοήγηση αλλά και για να περάσουν δημιουργικά τον χρόνο τους. Όλες οι παραπάνω λειτουργίες μπορούν να πραγματοποιηθούν σε οποιοδήποτε χώρο αρκεί να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα κινητής τηλεφωνίας ή Wi-Fi. Παρόλα αυτά, πολλές φορές κατά την χρήση του κινητού παρατηρούνται αλλαγές στο σήμα. Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια μία κλήσης στην οποία ο χρήστης κινείται μέσα σε έναν χώρο μπορεί να παρατηρηθούν διακοπές ή αυξομειώσεις του σήματος που οδηγούν σε αλλοίωση της ποιότητας των κλήσεων.

Για τον λόγο αυτόν, στην παρούσα εργασία, μελετάται η ισχύς σήματος που λαμβάνει το κινητό από τον σταθμό βάσης αλλά και η ισχύς σήματος που εκπέμπει το κινητό προς τον σταθμό βάσης. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν τρία κινητά Echo One [2] που καταγράφουν και αποθηκεύουν την λαμβανόμενη και εκπεμπόμενη ισχύς που περιγράφεται παραπάνω.

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του μαθήματος «Μετρήσεις σε Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα» του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών. Για την υλοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το μετρητικό σύστημα Echo One, το οποίο παρέχεται από το Εργαστήριο Ασυρμάτων και Κινητών Επικοινωνιών και έχει αποκτηθεί μέσω του ερευνητικού έργου ΠΑΝΔΩΡΑ [1].

2 Περιγραφή Μετρήσεων

Για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τρία κινητά τερματικά Echo One (Εικόνα 1&2) [2] . Τα κινητά αυτά είναι εξειδικευμένες συσκευές μέτρησης που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα και είναι σχεδιασμένα για την αξιολόγηση της απόδοσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

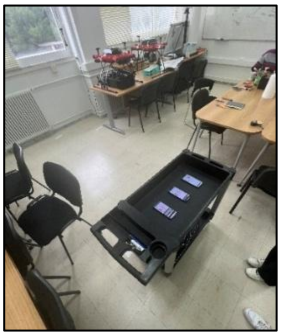
Εικόνα 1: Κινητό Echo One

Εικόνα 2: Τοποθέτηση κινητών σε πλαστικό καρότσι

2.1 Διαδικασία

Στην μελέτη αυτή, τα κινητά πραγματοποίησαν τρείς μετρήσεις σε τρία σημεία, απόστασης 0.5m (Εικόνα 3), 3.5m (Εικόνα 4) και 6m (Εικόνα 5) από το παράθυρο και από τρείς διαφορετικούς παρόχους. Οι αποστάσεις επιλέχθηκαν για να μετρηθεί η επίδραση της απόστασης από το κοντινότερο σημείο εισόδου φυσικού φωτός (παράθυρο) έως το πιο μακρινό (κέντρο του κτιρίου). Η κάθε μέτρηση είχε διάρκεια τέσσερα λεπτά στα οποία σημειώθηκαν περίπου 508 τιμές ισχύος με μια τιμή κάθε 500 msec περίπου.

Εικόνα 3: Σημείο Α



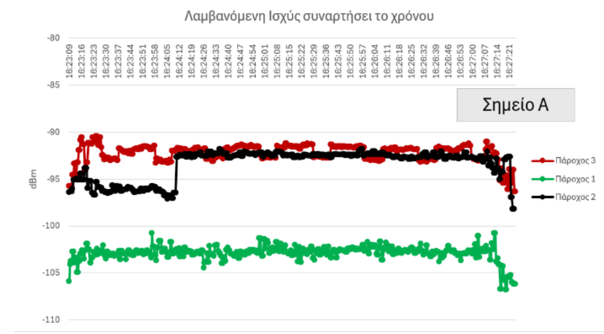
Εικόνα 4: Σημείο Β

Εικόνα 5: Σημείο Γ

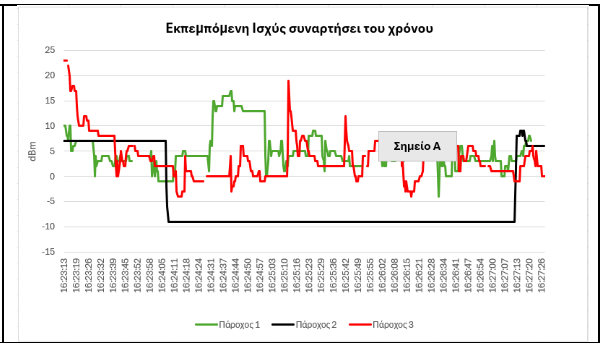
3 Αποτελέσματα

Κατόπιν των παραπάνω μετρήσεων, λήφθηκαν οι τιμές εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ισχύος με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων.

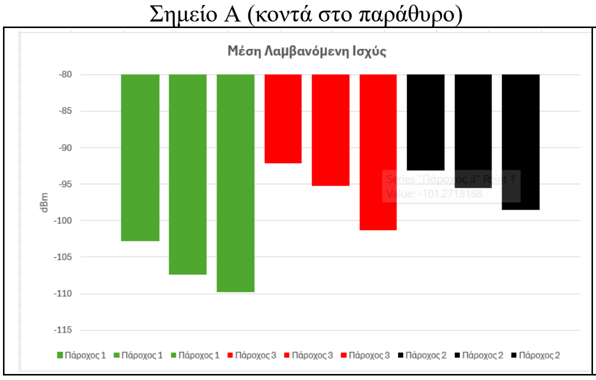
Στο διάγραμμα της Εικόνας 6, παρατηρείται ότι οι Πάροχοι 1 και 3 δεν παρουσιάζουν απότομες αλλαγές στην λαμβανόμενη ισχύ διατηρώντας τιμές περίπου από -100 έως -105 dBm και -90 έως -95 dBm αντίστοιχα. Αντίθετα ο Πάροχος 2 εμφανίζει απότομη αλλαγή από -97 στα -92 dBm.
Στο διάγραμμα της Εικόνας 7, φαίνεται ότι όλοι οι πάροχοι εμφανίζουν απότομες αλλαγές στις τιμές της εκπεμπόμενης ισχύς κατά την πάροδο του χρόνου με τον Πάροχο 2 να έχει τις λιγότερες.
Στην Εικόνα 8, παρατηρείται ότι η μέση λαμβανόμενη ισχύς, σε όλους τους παρόχους, μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το παράθυρο.



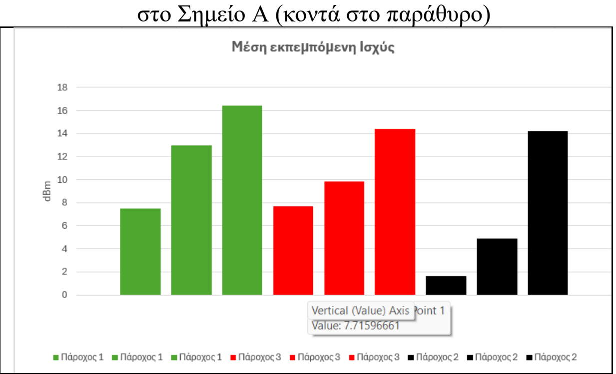
Εικόνα 6: Λαμβανόμενη ισχύς συναρτήσει του χρόνου στο Σημείο Α (κοντά στο παράθυρο)



Εικόνα 7: Εκπεμπόμενη ισχύς συναρτήσει του χρόνου στο Σημείο Α (κοντά στο παράθυρο)

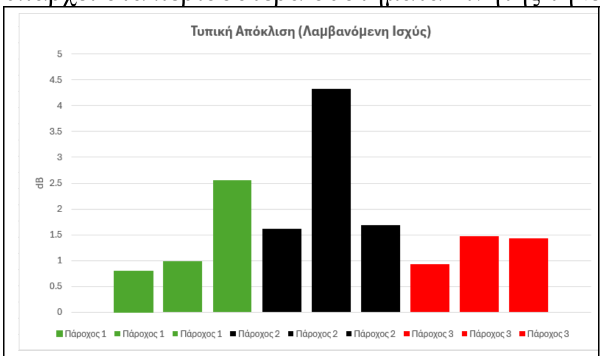


Εικόνα 8: Μέση λαμβανόμενη ισχύς

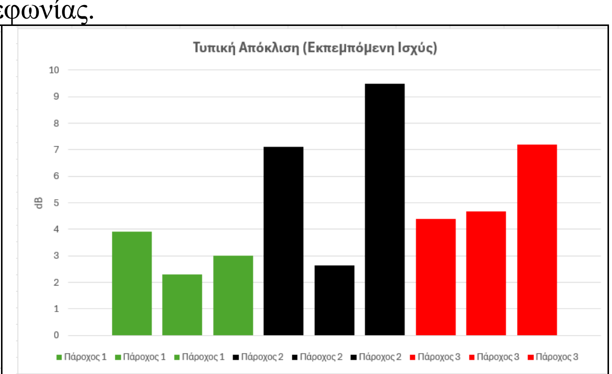


Εικόνα 9: Μέση εκπεμπόμενη ισχύς

Καθώς απομακρυνόμαστε από το παράθυρο, η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος μειώνεται επειδή το σήμα από τον σταθμό βάσης μπαίνει στον χώρο πιο εύκολα από τα ανοίγματα, όπως τα παράθυρα. Όσο πιο μακριά είναι το κινητό από την πηγή εισόδου του σήματος, τόσο περισσότερο το σήμα εξασθενεί, γιατί συναντά εμπόδια όπως τοίχους, έπιπλα και άλλα αντικείμενα, που προκαλούν απορρόφηση και ανακλάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φτάνει στο κινητό λιγότερη ενέργεια, άρα και μικρότερη ισχύς. Αντίθετα στην Εικόνα 9, παρατηρείται ότι η μέση εκπεμπόμενη ισχύς από τα κινητά αυξάνεται για όλους τους παρόχους, με την απόσταση από το παράθυρο. Αυτό συμβαίνει γιατί το κινητό «προσπαθεί» να κρατήσει επαφή με το σταθμό βάσης. Ειδικότερα, όταν το κινητό βρίσκεται μακριά από το παράθυρο, το σήμα που λαμβάνει από τον σταθμό βάσης είναι πιο αδύναμο, επειδή έχει εξασθενήσει περνώντας μέσα από τοίχους και άλλα εμπόδια. Για να μπορέσει το κινητό να διατηρήσει καλή επικοινωνία, αυξάνει αυτόματα την ισχύ με την οποία εκπέμπει, ώστε να φτάνει καλύτερα το σήμα του στον σταθμό βάσης. Αυτό γίνεται μέσω ενός μηχανισμού που λέγεται "power control", και υπάρχει στα περισσότερα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.



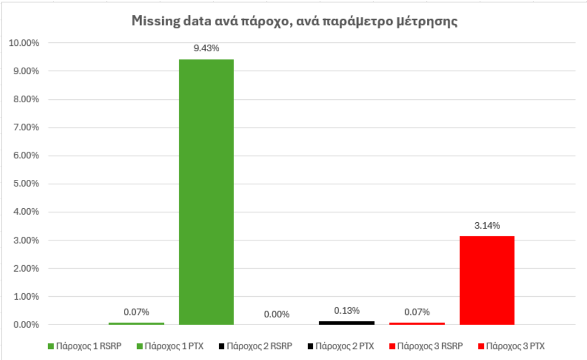
Εικόνα 10: Τυπική απόκλιση της λαμβανόμενης ισχύος



Εικόνα 11: Τυπική απόκλιση της εκπεμπόμενης ισχύος

Επιπλέον, στο διάγραμμα της Εικόνας 10 φαίνεται η τυπική απόκλιση της λαμβανόμενης ισχύς του σήματος. Ο Πάροχος 1 έχει τις μικρότερες αποκλίσεις στα σημεία Α και Β. Ο Πάροχος 2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση που μετρήθηκε στα 4.5 dB στο Σημείο Β.

Στην Εικόνα 11 φαίνεται η τυπική απόκλιση της εκπεμπόμενης ισχύς, και εδώ η μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται στις μετρήσεις του Παρόχου 2, φτάνοντας τα 9 dB στο Σημείο Γ, όταν η μέση εκπεμπόμενη ισχύς στο ίδιο σημείο είναι στα 14 dBm. Το κινητό ανεβοκατεβάζει την ισχύ εκπομπής του έντονα, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της σύνδεσης, π.χ. σε φωνητικές κλήσεις ή σε χρήση δεδομένων.



Εικόνα 12: Missing data ανά πάροχο, ανά παράμετρο μέτρησης

Το διάγραμμα της Εικόνας 12 δείχνει τα ποσοστά απώλειας δεδομένων. Παρατηρούμε ότι απώλεια δεδομένων εμφανίζεται πρακτικά μόνο στην εκπεμπόμενη ισχύ (9.43% για τον Πάροχο 1, 0.13% για τον Πάροχο 2 και 3.14% για τον 3). Τα missing data στην εκπεμπόμενη ισχύ πιθανόν οφείλονται στο ότι το κινητό δεν εκπέμπει συνεχώς, ειδικά αν δεν υπάρχει κίνηση δεδομένων εκείνη τη στιγμή. Οπότε δεν υπήρχε μέτρηση να καταγραφεί. Αντίθετα, το κινητό λαμβάνει συνεχώς σήμα από τον σταθμό βάσης, οπότε η λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να καταγράφεται σταθερά.

4 Συμπεράσματα

Αρχικά, παρατηρείται ότι η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται, καθώς αυξάνεται η απόσταση του τερματικού από το παράθυρο ενώ, η εκπεμπόμενη ισχύς αυξάνεται, για να διατηρηθεί η σύνδεση με τον σταθμό βάσης. Ενδεικτικά, η μέση εκπεμπόμενη ισχύς του Παρόχου 1, αν μετακινηθούμε 6 μέτρα μακριά από το παράθυρο, αυξάνεται από 7.5 dBm στα 16.5 dBm (αύξηση περίπου 9 dB), ενώ η μέση λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται από -103 dBm στα -110 dBm (μείωση 7 dB).

Αυτό δείχνει ότι σε εσωτερικούς χώρους η απόσταση από τα ανοίγματα (όπως τα παράθυρα) επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα του σήματος. Επιπλέον, όταν το κινητό χρειάζεται να εκπέμπει με μεγαλύτερη ισχύ, καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, κάτι που μπορεί να επηρεάσει και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Άρα, σε χώρους με χαμηλή κάλυψη, δεν επηρεάζεται μόνο η σύνδεση, αλλά και η αυτονομία της συσκευής.

Σε ό,τι αφορά τους παρόχους:

- Ο Πάροχος 2 παρουσίασε τη μεγαλύτερη λαμβανόμενη ισχύ (καλύτερη κάλυψη),
- ενώ ο Πάροχος 1 εμφάνισε τη σταθερότερη συμπεριφορά, τόσο ως προς τη λήψη όσο και ως προς την εκπομπή.

Τα ποσοστά απώλειας δεδομένων ήταν γενικά χαμηλά, με εξαίρεση τον Πάροχο 1, ο οποίος εμφάνισε σημαντικές απώλειες στις μετρήσεις εκπεμπόμενης ισχύος.

5 Αναφορές

[1] PANDORA | Wireless and Mobile Comminications Lab, “Ερευνητικό Έργο ΠΑΝΔΩΡΑ,” [Online]. Available: https://wmclab.uop.gr/pandora.php. [Accessed: 3-Jun-2025].

[2] WMCLab, “Παραλαβή εξοπλισμού έργου ΠΑΝΔΩΡΑ,” [Online]. Available: https://wmclab.uop.gr/pandora/items/2022.07.20_paralavi_exoplismou.html. [Accessed: 3-Jun-2025].

Πειραματική διάταξη συστήματος κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς

Εμμανουήλ-Ζαφείριος Μπόζης, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, mbozis@go.uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα ελεγχόμενα από λογισμικό (Software defined Radio) αποτελούν ένα βασικό στοιχείο των πειραματικών διατάξεων για την έρευνα σε ασύρματα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G) κυρίως λόγω της ευελιξίας και της δυνατότητας προγραμματισμού τους μέσω λογισμικού. Ταυτόχρονα, η πολυπλοκότητα των προτύπων που καθορίζουν την λειτουργία των δικτύων 5G αυξάνεται λόγω της αύξησης των εφαρμογών που βασίζονται σε αυτά. Τα νέα βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε όλα τα επιπέδου της στοίβας πρωτοκόλλων σε σχέση με την προηγούμενη γενιά κινητών επικοινωνιών, συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας τόσο στην ανάπτυξη λογισμικού, όσο και στον τομέα των μετρήσεων και της αξιολόγησης της απόδοσης. Η παρούσα εργασία προτείνει μια ευέλικτη πλατφόρμα συστήματος 5G από άκρο σε άκρο (E2E) που έχει τις δυνατότητες επαναπρογραμματισμού και επέκτασης σε διαφορετικά πεδία έρευνας. Παρουσιάζονται οι κύριες δυνατότητες και οι περιπτώσεις χρήσης του συστήματος και εξάγονται συμπεράσματα με βάση τις δοκιμές και μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί στο εργαστήριο.

Λέξεις κλειδιά : Συστήματα κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς, Ανοικτό Λογισμικό, Linux, Open Air Interface

1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση του Δικτύου Πρόσβασης (Radio Access Network ή RAN) και του Δικτύου Κορμού (Core Network ή CN) με λογισμικό και συσκευές SDR διευκόλυνε την ανάπτυξη ιδιωτικών δικτύων 5G στον τομέα της έρευνας και των βιομηχανικών εφαρμογών. Το λογισμικό σε αρκετές από αυτές τις υλοποιήσεις είναι ανοιχτού κώδικα, συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση του κόστους σε συνδυασμό με τη χρήση υλικού διαθέσιμου στο εμπόριο (Commercial off-the-self). Στις υλοποιήσεις με λογισμικό του δικτύου 5G RAN περιλαμβάνονται το srsRAN [1] και το Open Air Interface (OAI) [2]. Μια άλλη υλοποίηση συστήματος 5G είναι η Amarisoft [3], αλλά είναι κλειστού κώδικα και προσφέρεται ως συνδυαστική λύση λογισμικού-υλικού. Για το δίκτυο κορμού 5G, οι κύριες υλοποιήσεις ανοιχτού κώδικα είναι το Open5GS [4] και το OAI CN5G [5].

Μεταξύ των λύσεων ανοιχτού κώδικα, το OAI έχει την πιο γρήγορη και συστηματική ανάπτυξη, συγκεντρώνοντας το ενδιαφέρον για την υλοποίηση της στοίβας πρωτοκόλλων του 5G από τους παρόχους δικτύων κινητής τηλεφωνίας, τους προμηθευτές υλικού RF, τα πανεπιστήμια και τα ερευνητικά κέντρα. Η αρχιτεκτονική και τα κύρια χαρακτηριστικά του OAI παρουσιάζονται στις δημοσιεύσεις [6] και [7]. Το OAI, σε αντίθεση με τις εναλλακτικές λύσεις, προσφέρει υλοποίηση συστήματος 5G από άκρο σε άκρο, συμπεριλαμβανομένου ακόμη και του λογισμικού για τον εξοπλισμό χρήστη (new radio User Equipment ή nrUE), το δίκτυο κορμού και τον σταθμό βάσης 5G (gNB), έχοντας τη μέγιστη ευελιξία και προσαρμοστικότητα. Η ευελιξία αυτή όμως επιτυγχάνεται με τίμημα την αυξημένη δυσκολία στην εκμάθηση και παραμετροποίηση του συστήματος. Τα προγράμματα που υλοποιούν το UE και το gNB είναι εκτελέσιμα στο λειτουργικό σύστημα Linux, ενώ οι συναρτήσεις του δικτύου κορμού (Network Functions ή NF), μπορούν να εκτελεστούν είτε ως διεργασίες του λειτουργικού συστήματος είτε μέσα σε κοντέινερ (containers). Εκτός από τη δυνατότητα μετάδοσης και λήψης κυματομορφών 5G χρησιμοποιώντας συσκευές SDR, το OAI διαθέτει πολλά εργαλεία λογισμικού γνωστά ως Phy Simulators , που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μιας πλατφόρμας εξομοίωσης συστήματος 5G. Έτσι, η εξομοίωση ολόκληρου του συστήματος 5G από το δίκτυο κορμού μέχρι την συσκευή χρήστη μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας κοντέινερ docker που έχουν αναπτυχθεί σε έναν μόνο κεντρικό υπολογιστή [8].

Σε αυτήν την εργασία, στοχεύουμε στην ανάπτυξη ενός αυτόνομου (standalone) συστήματος 5G βασιζόμενο σε λογισμικό ανοιχτού κώδικα και υλικού διαθέσιμου στο εμπόριο, που διευκολύνει τον χρήστη να δοκιμάσει διαφορετικά σενάρια συνδεσιμότητας και εφαρμογές. Για την υλοποίηση της στοίβας πρωτοκόλλων 5G, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το OAI για όλα τα επί μέρους τμήματα του δικτύου 5G, συμπεριλαμβανομένων των gNB, CN και nrUE. Αξιοποιήσαμε το οικοσύστημα Linux με την πληθώρα διαθέσιμων εργαλείων ανοιχτού κώδικα και δυνατότητα προγραμματισμού του κελύφους (bash shell), προκειμένου να υλοποιήσουμε τα σενάρια συνδεσιμότητας και να αυτοματοποιήσουμε τη διαδικασία εκκίνησης των διεργασιών.

2 Περιγραφή Προβλήματος

Ενώ η χρήση ελεύθερου λογισμικού για την υλοποίηση της στοίβας πρωτοκόλλων του 5G προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην διαμόρφωση του συστήματος, η εκκίνηση των υποσυστημάτων και η εναλλαγή μεταξύ των διαφορετικών ρυθμίσεων είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία. Η δυσκολία αυτή σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στην πολυπλοκότητα των ίδιων των πρωτοκόλλων, ωστόσο εντείνεται από το γεγονός ότι το Open Air Interface δεν προσφέρει μια εύχρηστη διεπαφή και η ρύθμιση των παραμέτρων του γίνεται μέσα από την επεξεργασία αρχείων ρυθμίσεων. Επιπροσθέτως τα αρχεία ρυθμίσεων πρέπει να καλούνται κάθε φορά από το κύριο πρόγραμμα που εκκινεί τον σταθμό βάσης ή την συσκευή χρήστη. Το κενό αυτό έρχονται να καλύψουν λύσεις όπως το OAIBOX [9] το οποίο απευθύνεται στην ερευνητική κοινότητα και το Firecell [10] που είναι προσανατολισμένο στα ιδιωτικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών 5G για βιομηχανικές εφαρμογές. Τα συστήματα αυτά αποτελούν συνδυαστικές λύσεις υλικού και λογισμικού και παρέχουν στον χρήστη μια ολοκληρωμένη διεπαφή μέσα από την οποία μπορεί να παραμετροποιήσει και να παρακολουθήσει τους βασικούς δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators ή KPIs) του δικτύου. Ωστόσο το κόστος απόκτησης τέτοιων συστημάτων μπορεί να είναι αποτρεπτικό για ένα μικρό εκπαιδευτικό ή ερευνητικό φορέα. Το κενό αυτό καλύπτει το προτεινόμενο σύστημα που αναλύεται στο Κεφάλαιο 3.

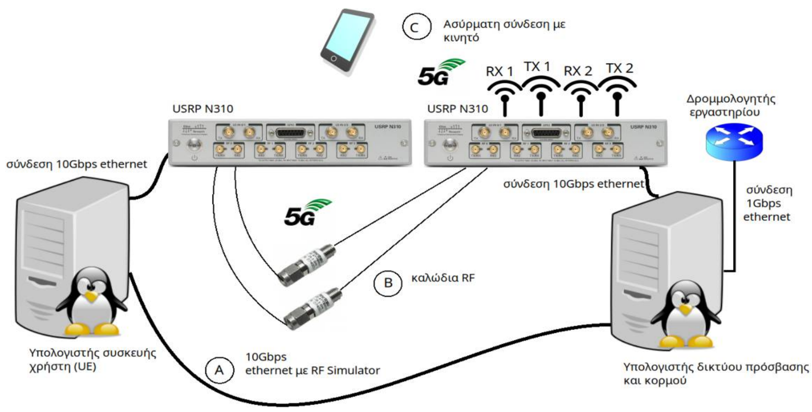
3 Προτεινόμενη Λύση

Το λειτουργικό διάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος δοκιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Σε αυτό ο χρήστης μπορεί να διασυνδέσει το UE στον σταθμό βάσης με τρεις διαφορετικούς τρόπους: (A) εξομοιώνοντας το ασύρματο κανάλι με χρήση του εργαλείου RF simulator της OAI, (B) χρησιμοποιώντας συσκευές SDR για την εκπομπή και λήψη του σήματος 5G μέσω καλωδίων RF και (C) με ασύρματη σύνδεση της κινητής συσκευής. Με βάση την αρχική ιδέα, το σύστημα μπορεί να επεκταθεί και να αναβαθμιστεί χρησιμοποιώντας επιπλέον υλικό και εργαλεία λογισμικού για να καλύψει διαφορετικές ερευνητικές ανάγκες. Οι βασικές παράμετροι του συστήματος (συχνότητα φέροντος, Τμήμα Εύρους Ζώνης (BWPs), διαμόρφωση των χρονοθυρίδων Time Division Duplex (TDD), αριθμός κεραιών, κ.λπ.) μπορεί να δοκιμαστεί αρχικά χρησιμοποιώντας την προσομοίωση RF πριν από μια ασύρματη μετάδοση με συσκευές SDR, διευκολύνοντας έτσι τον γρήγορο πειραματισμό καθώς και τον εντοπισμό σφαλμάτων. Η διαδικασία υλοποίησης ενός συγκεκριμένου σεναρίου, η εκκίνηση των στοιχείων λογισμικού, η δημιουργία δικτυακής κίνησης και η διεξαγωγή μετρήσεων αυτοματοποιείται με τα scripts στο φλοιό bash που αναπτύξαμε ενσωματώνοντας εργαλεία ανοιχτού κώδικα για το λειτουργικό σύστημα Linux [11-12]. Το κόστος του συστήματος είναι το χαμηλότερο δυνατόν και εξαρτάται μόνο από το κόστος του hardware, αφού το λογισμικό είναι ανοικτού κώδικα.

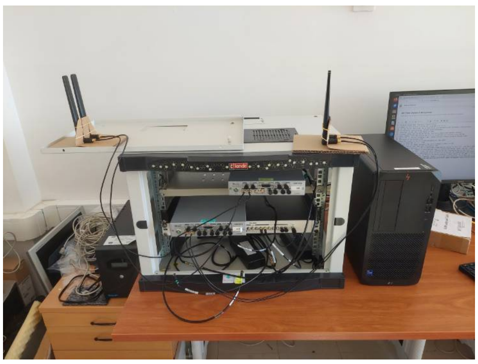
Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει τα σενάρια ρυθμίσεων που υλοποιήθηκαν με την διάταξη αυτή καθώς και τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων που επιτεύχθηκε στην λήψη της συσκευή χρήστη (UE) για κάθε σενάριο και τύπο συσκευής χρήστη. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση της υλοποίησης του UE με το λογισμικό της OAI καθώς και με την κινητή συσκευή Huawei P40. Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται το σύστημα με τις συσκευές SDR μαζί με τον εξοπλισμό διασύνδεσης που βρίσκεται στο εργαστήριο Ψηφιακών Επικοινωνιών και Συστημάτων της Σχολής Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου.

Σενάριο	Εύρος Ζώνης (MHz)	αριθμός εισόδων – εξόδων (SISO-MIMO)	Μέγιστος ρυθμός δεδομένων στο DL (Mbps)	Συσκευή χρήστη (UE)
1	10	SISO	20	OAI UE
2	20	SISO	40 / 60	OAI UE/ Huawei P40
3	40	SISO	70 / 100	OAI UE/ Huawei P40
4	100	SISO	290	Huawei P40
5	40	MIMO 2x2	250	Huawei P40
6	100	MIMO 2x2	>500	Huawei P40

Πίνακας 1. Σενάρια διαφορετικού εύρους ζώνης και μέγιστος ρυθμός δεδομένων στο Downlink



Εικόνα 1. Σύστημα δοκιμών 5G με 3 δυνατότητες διασύνδεσης (A έως C) της συσκευής χρήστη



Εικόνα 2. Φωτογραφία του συστήματος στο εργαστήριο Ψηφιακών Επικοινωνιών και Συστημάτων

4 Συμπεράσματα

Από την λειτουργία του συστήματος 5G με ανοικτό λογισμικό και συσκευές SDR και την συνεχή προσπάθεια αναβάθμισης και επίλυσης των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κερδίσαμε πολύ σημαντική εμπειρία. Αν και η λειτουργία του συστήματος αυτού απαιτεί μεγάλη προσπάθεια και γνώση αντικειμένων από διαφορετικά πεδία, υπερέχει στην ευελιξία και στο χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τις ανταγωνιστικές έτοιμες λύσεις [3],[9-10]. Στα μελλοντικά σχέδιά μας είναι η αναβάθμιση του συστήματος με διάταξη συγχρονισμού των υπολογιστών και του δικτύου πρόσβασης, ώστε να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε περισσότερες μετρήσεις στο φυσικό επίπεδο και με διαφορετικές αρχιτεκτονικές όπως είναι ο διαχωρισμός του δικτύου πρόσβασης σε κεντρική και αποκεντρωμένη μονάδα (CU-DU split).

5 Αναφορές

[1] srsRAN Project, https://www.srslte.com//, προσπελάστηκε στις 23 Μαΐου, 2025.
[2] Open Air Interface, https://openairinterface.org/, προσπελάστηκε στις 23 Μαΐου, 2025.
[3] Amarisoft, https://www.amarisoft.com/, προσπελάστηκε στις 23 Μαΐου, 2025.
[4] Open5GS, https://open5gs.org/, προσπελάστηκε στις 23 Μαΐου, 2025.
[5] Repository for the Open Air Interface Core Network development, https://gitlab.eurecom.fr/oai/cn5g, προσπελάστηκε στις 23 Μαΐου, 2025.
[6] Kaltenberger, Florian & Silva, Aloizio & Gosain, Abhimanyu & Wang, Luhan & Nguyen, Tien-Thinh. (2020). OpenAirInterface: Democratizing Innovation in the 5G Era. Computer Networks. 176.107284. 10.1016/j.comnet.2020.107284.
[7] W. T. Han and R. Knopp, "OpenAirInterface: A Pipeline Structure for 5G," *2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, Shanghai, China, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICDSP.2018.8631835.
[8] E. -Z. G. Bozis, M. C. Batistatos and N. C. Sagias, "Overview Of SDR Platforms Based On Open Source Software: A 5G System Emulation With Open Air Interface," *2022 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)*, Tripolis, Greece, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/PACET56979.2022.9976373.
[9] OAI BOX, https://www.oaibox.com/ , προσπελάστηκε στις 23 Μαΐου, 2025.
[10] Firecell, https://firecell.io/, προσπελάστηκε στις 23 Μαΐου, 2025.
[11] E. -Z. G. Bozis, N. C. Sagias, M. C. Batistatos, M. -A. Kourtis, G. K. Xilouris and A. Kourtis, "A Versatile 5G Standalone Testbed Based On Commodity Hardware," *2024 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)*, Thessaloniki, Greece, 2024, pp. 1-4, doi:10.1109/PACET60398.2024.10497086.
[12] E. -Z. G. Bozis, N. C. Sagias, M. C. Batistatos, M. -A. Kourtis, G. K. Xilouris and A. Kourtis, Enhancing 5G performance: A standalone system platform with customizable features, AEU - International Journal of Electronics and Communications, Volume 187, 2024,155515, https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155515.

Σύγχρονες Εφαρμογές IoT στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατοκαλλιεργειών και Αλιείας

Σοφία Μουκίδου, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, sofiamk@go.uop.gr

Δημήτριος Τσουκαλάς, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Καλαμάτα, fst22151@go.uop.gr

Δημήτριος Παυλίδης, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Καλαμάτα, d.pavlidis@go.uop.gr

11 Ιουνίου 2025

Περίληψη

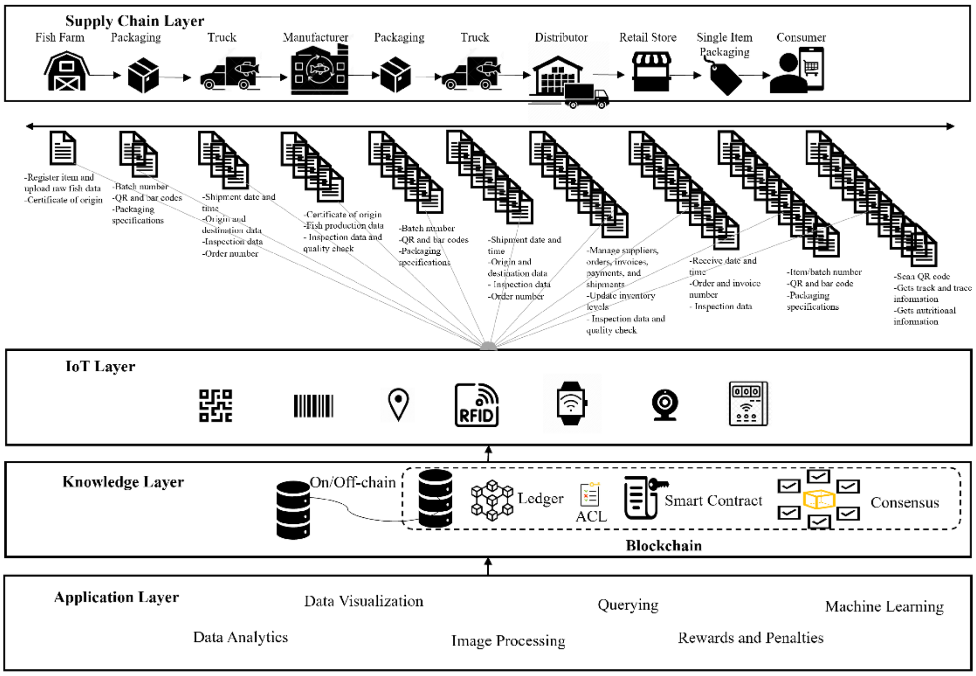
Η ενσωμάτωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) στη βιομηχανία των αλιευμάτων, αξιοποιεί σύγχρονες τεχνολογίες αιχμής όπως η έξυπνη παρακολούθηση, η λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων και τα αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου. Η παρούσα εργασία διερευνά τον αντίκτυπο της χρήσης της τεχνολογίας IoT σε τέσσερις βασικούς τομείς: την υδατοκαλλιέργεια, τις αλιευτικές δραστηριότητες, τη μεταποίηση και τον ποιοτικό έλεγχο των αλιευμάτων. Εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα δίκτυα αισθητήρων, οι πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους και οι αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο μπορούν να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, στη διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος, ενώ ταυτόχρονα ενισχύουν την ιχνηλασιμότητα και στηρίζουν τους στόχους της βιωσιμότητας. Παρουσιάζονται επίσης οι προκλήσεις και οι μελλοντικές κατευθύνσεις για τη συνεχή καινοτομία και την υιοθέτηση των νέων αυτών τεχνολογιών. Πρόσφατη βιβλιογραφία αναδεικνύει τη σημασία της προσαρμογής των συστημάτων IoT στις υδατοκαλλιέργειες, της χρήσης δικτύων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς και του συνδυασμού του Διαδικτύου των Πραγμάτων με Τεχνητή Νοημοσύνη, με σκοπό τη μείωση της σπατάλης των τροφίμων και την ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας τους. Αυτές οι καινοτόμες λύσεις υπογραμμίζουν τη δυνατότητα του IoT να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες παραγωγής τροφίμων, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζει τις πρακτικές της κυκλικής οικονομίας ενισχύοντας τα πρότυπα ασφάλειας τροφίμων σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. Συνολικά, η αξιοποίηση του IoT στον τομέα των αλιευμάτων λειτουργεί ως καταλύτης για την ψηφιακή μετάβαση της βιομηχανίας, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα, τη διαφάνεια και την αποδοτικότητα. Ωστόσο, η πλήρης υιοθέτησή του προϋποθέτει ενεργή υποστήριξη από τους φορείς χάραξης πολιτικής, μέσω κινήτρων και στρατηγικής προώθησης των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα έξυπνα συστήματα.

Λέξεις κλειδιά: Internet of Things (IoT), Υδατοκαλλιέργεια, Ασφάλεια Τροφίμων, Διαχείριση Ψυκτικής Αλυσίδας, Βιωσιμότητα

1 Εισαγωγή

Τα ψάρια και άλλα θαλασσινά προϊόντα (γνωστά με το γενικό όρο «θαλασσινά» ή «αλιεύματα»), αποτελούν πολύτιμη πηγή ζωικής πρωτεΐνης και θρεπτικών συστατικών στην ανθρώπινη διατροφή [1, 20]. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τομέας της βιομηχανίας των τροφίμων αντιμετωπίζει αυξανόμενες πιέσεις από την κλιματική αλλαγή, την υπεραλίευση και τους αυστηρούς κανονισμούς ασφάλειας [2, 18]. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), αποτελείται από ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων αισθητήρων και συσκευών και είναι σε θέση να προσφέρει ισχυρά εργαλεία για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, επιτρέποντας την παρακολούθηση κρίσιμων τιμών σε πραγματικό χρόνο, τον αυτοματισμό και την ανάλυση δεδομένων σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα των θαλασσινών. Η παρούσα εργασία παρέχει μια περιεκτική επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο το IoT εφαρμόζεται στην υδατοκαλλιέργεια, την αλιεία, τη μεταποίηση και την εξασφάλιση της ποιότητας, με στόχο την ενίσχυση της παραγωγικότητας, της ασφάλειας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Ο συνδυασμός του IoT με την τεχνολογία blockchain επιτρέπει την επαλήθευση και την ιχνηλάτηση των δεδομένων σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Η αυξημένη διαφάνεια που προκύπτει από τη χρήση αυτών των τεχνολογιών διευκολύνει τους παραγωγούς θαλασσινών να ανταποκριθούν τόσο στις αυξανόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών, όσο και στους ολοένα αυστηρότερους κανονισμούς, συμβάλλοντας έτσι στη μακροχρόνια βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα του κλάδου. [3, 18].



Εικόνα 1. Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος Supply Chain με δυνατότητα blockchain IoT [3]

2 Εφαρμογές IoT στις Υδατοκαλλιέργειες

Η υδατοκαλλιέργεια, δηλαδή η εντατική εκτροφή ψαριών και άλλων υδρόβιων οργανισμών, αποτελεί ένα σημαντικό τομέα της παραγωγής τροφίμων παγκοσμίως. Κάθε χρόνο, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, υπάρχει σημαντική αύξηση της ζήτησης τους και το γεγονός αυτό ασκεί πίεση στον τομέα της αλιείας γενικότερα. [1, 4]. Ωστόσο, η διατήρηση βέλτιστων συνθηκών στο υδάτινο περιβάλλον παρουσιάζει πολλές και σημαντικές προκλήσεις. Οι τεχνολογίες IoT είναι σε θέση να αλλάξουν ριζικά την υδατοκαλλιέργεια, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και δυνατότητες αυτοματισμού [4,5].

Αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως οι εμφυτευμένοι βιοαισθητήρες και τα αυτόνομα υποβρύχια drones, επεκτείνουν ακόμα περισσότερο τις δυνατότητες του IoT στην υδατοκαλλιέργεια [4]. Αυτά τα προηγμένα εργαλεία επιτρέπουν μη παρεμβατική διάγνωση της υγείας και παρακολούθηση του οικοσυστήματος με μεγάλη χωρική και χρονική ακρίβεια, ανοίγοντας τον δρόμο για πρακτικές ακρίβειας στην υδατοκαλλιέργεια [4, 6].

Πρόσφατες μελέτες υποδεικνύουν την ανάγκη για προσαρμοσμένες λύσεις IoT, κατάλληλες για τις ιδιαίτερες απαιτήσεις διαφορετικών συστημάτων υδατοκαλλιέργειας, όπως οι δεξαμενές εσωτερικής εγκατάστασης και οι εγκαταστάσεις ανοιχτής θαλάσσης. Άλλες προκλήσεις όπως η ενεργειακή επάρκεια και η ασταθής συνδεσιμότητα των ασύρματων δικτύων αντιμετωπίζονται με τεχνολογίες όπως αισθητήρες που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια και δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής κατανάλωσης (LPWAN) [19].

Συγκεκριμένα παραδείγματα της επιτυχημένης ενσωμάτωσης του IoT στην υδατοκαλλιέργεια αποτελούν αυτά της Scottish Sea Farms στη Σκωτία, όπου εγκαταστάθηκαν αισθητήρες για την παρακολούθηση παραμέτρων ποιότητας νερού (π.χ. θερμοκρασία, pH, αλατότητα, οξυγόνο) σε κλωβούς σολομού, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της υγείας των ψαριών και της αποτελεσματικότητας της διαχείρισης [21]. Αντίστοιχα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το έργο SEASTAR ενσωμάτωσε αισθητήρες στα ψάρια για την παρακολούθηση του στρες μέσω της καταγραφής του καρδιακού τους ρυθμού σε πραγματικό χρόνο. Ταυτόχρονα μέσω υποβρύχιων αισθητήρων, συλλέγονται δεδομένα για την υποστήριξη ακαδημαϊκών μελετών σχετικά με την κλιματική αλλαγή και την υγεία των ωκεανών [22]. Στην Ταϊλάνδη, το πιλοτικό πρόγραμμα "Project for Nurturing New Industries in ASEAN and Japan" καθώς και άλλες συνεργασίες με την Internet Initiative Japan, εφάρμοσαν συστήματα LoRaWAN και cloud-based αναλύσεις για την παρακολούθηση θερμοκρασίας, pH, οξυγόνου και άλλων παραμέτρων, επιτυγχάνοντας βελτίωση της επιχειρησιακής αποτελεσματικότητας και των διαδικασιών αναπαραγωγής γαρίδας [23]. Τέλος, στην Ινδία, με την αξιοποίηση της υπολογιστικής όρασης, σημειώθηκε αυξημένη ακρίβεια στην καταμέτρηση γόνου γαρίδας έως και 60% [24]. Συνολικά, οι ανά τον κόσμο εφαρμογές, αποδεικνύουν πως το IoT συμβάλλει καθοριστικά στον εκσυγχρονισμό και τη βιωσιμότητα του τομέα των υδατοκαλλιεργειών.

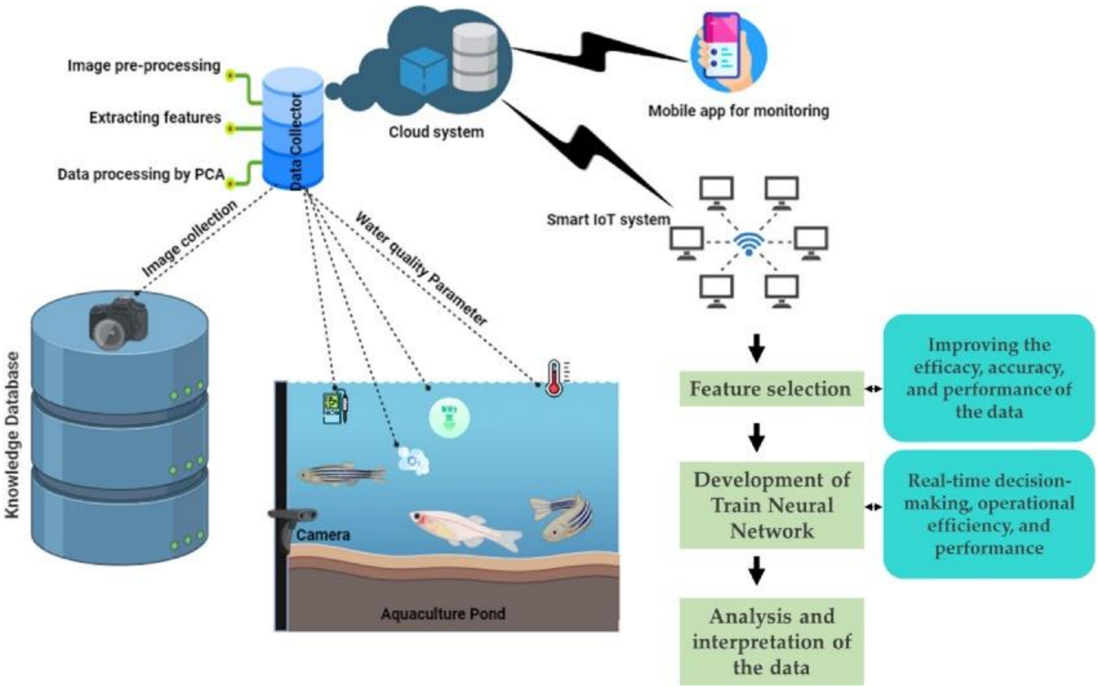
2.1 Smart Monitoring και Health Management στην Υδατοκαλλιέργεια

Οι αισθητήρες μπορούν να εγκαθίστανται σε λίμνες, δεξαμενές και κλωβούς ανοικτής θαλάσσης και είναι υπεύθυνοι για τη μέτρηση βασικών παραμέτρων της ποιότητας του νερού (γλυκού και αλμυρού), όπως η θερμοκρασία, το διαλυμένο οξυγόνο (Dissolved Oxygen - DO), το pH και η αλατότητα [5,7]. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν καθοριστικά την υγεία των ψαριών, τον ρυθμό ανάπτυξης τους και την εμφάνιση ασθενειών. Για παράδειγμα, μια ξαφνική πτώση των επιπέδων οξυγόνου μπορεί να εντοπιστεί πολύ γρήγορα από τους αισθητήρες και να αντιμετωπιστεί άμεσα μέσω της αυτόματης ενεργοποίησης των συστημάτων αερισμού [8]. Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα σε συνεχή χρόνο και τα αποθηκεύουν σε βάσεις δεδομένων, όπου και πραγματοποιείται η επεξεργασία τους.

Η επεξεργασία των δεδομένων μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης δίνει τη δυνατότητα για ανίχνευση μη φυσιολογικής συμπεριφοράς των ψαριών, ενδεικτική για την εμφάνιση ασθενειών. Ο έγκαιρος εντοπισμός των ασθενειών, επιτρέπει στοχευμένες κτηνιατρικές παρεμβάσεις, μειώνοντας τη θνησιμότητα του πληθυσμού και τη χρήση αντιβιοτικών, δείχνοντας το δρόμο για τη μετάβαση σε στρατηγικές που βασίζονται στην πρόληψη και όχι στην εκ των υστέρων αντίδραση, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο και τη συνολική ευζωία των ζώων [8]. Παράδειγμα της αρχιτεκτονική ευφυούς υδατοκαλλιέργειας για τη διαχείριση ασθενειών των αλιευμάτων απεικονίζεται στην Εικόνα 2.

Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα για ενσωμάτωση μοντέλων πρόβλεψης των καιρικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο, ώστε το σύστημα IoT της υδατοκαλλιέργειας να είναι σε θέση να ανταποκριθεί άμεσα σε περιβαλλοντικές μεταβολές, όπως οι τοξικές ανθίσεις φυκιών και η βιομηχανική ρύπανση [9].

Το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος στις υδατοκαλλιέργειες οφείλεται στη σίτιση των ψαριών. Τα συστήματα IoT μπορούν να παρακολουθούν τη συμπεριφορά των ψαριών μέσω υποβρύχιων καμερών και ακουστικών αισθητήρων, προσαρμόζοντας την παροχή τροφής σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η στοχευμένη σίτιση μειώνει τη σπατάλη και το κόστος, περιορίζει την περιβαλλοντική ρύπανση και βελτιώνει τον λόγο μετατροπής της τροφής [4,7].



Εικόνα 2. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική ευφυούς υδατοκαλλιέργειας για τη διαχείριση ασθενειών των ψαριών [8]

Πρόσφατες καινοτομίες περιλαμβάνουν τεχνολογίες υπολογιστικής όρασης που εκτιμούν τη βιομάζα, τα επίπεδα πρόσληψης τροφής των ιχθυοπληθυσμών, επιτρέποντας δυναμικές προσαρμογές της σίτισης. Αυτά τα συστήματα IoT, ενισχυμένα με τεχνητή νοημοσύνη, συμβάλλουν περαιτέρω στη βελτιστοποίηση της διατροφικής απόδοσης και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος [7].

2.2 Αυτοματοποίηση και βιωσιμότητα στην Υδατοκαλλιέργεια και Εμπορική Αλιεία

Οι πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους που χρησιμοποιούνται στις ολοκληρωμένες και έξυπνες υδατοκαλλιέργειες, είναι σε θέση να εντάξουν ακόμα περισσότερες αυτοματοποιημένες λειτουργίες όπως ο φωτισμός και ο αερισμός, όλα ελεγχόμενα εξ αποστάσεως και με τη χρήση ειδοποιήσεων σε κινητές συσκευές [6, 17].

Παρομοίως, στην εμπορική αλιεία, οι τεχνολογίες IoT οδηγούν σε μια μετάβαση προς εξυπνότερες και πιο βιώσιμες πρακτικές. Τα GPS και τα συστήματα αυτόματης αναγνώρισης (Automatic Identification System - AIS) επιτρέπουν την παρακολούθηση των αλιευτικών σκαφών σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την πλοήγηση, την αποδοτικότητα των καυσίμων και την ασφάλεια, ενώ υποστηρίζουν τη συμμόρφωση με τους ναυτικούς κανονισμούς [10].

Έξυπνα αλιευτικά εργαλεία εξοπλισμένα με αισθητήρες βάθους, σόναρ και κάμερες, εντοπίζουν πληθυσμούς ψαριών και άλλων θαλασσινών και βοηθούν στη στοχευμένη αλίευση συγκεκριμένων ειδών, μειώνοντας τις ανεπιθύμητες συλλήψεις (bycatch) και τις ζημιές στο θαλάσσιο περιβάλλον [11].

Τα συστήματα ηλεκτρονικής παρακολούθησης των σκαφών, επιτρέπουν επίσης την καταγραφή σε πραγματικό χρόνο των διαδρομών και των τοποθεσιών αλίευσης, διευκολύνοντας έτσι την ηλεκτρονική ιχνηλασιμότητα και τη διαχείριση της αλιείας [12]. Επιπλέον, η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών δεδομένων (π.χ. θερμοκρασία επιφάνειας θάλασσας, συγκέντρωση χλωροφύλλης, θαλάσσια ρεύματα κλπ) σε συνδυασμό με πληροφορίες από δορυφορικές πηγές, τροφοδοτούν τα προγνωστικά μοντέλα και καθοδηγούν τη σύγχρονη αλιεία σε περισσότερο βιώσιμες και χαμηλού περιβαλλοντικού αντίκτυπου πρακτικές [13].

3 Εφαρμογές IoT στην Επεξεργασία και Διανομή Αλιευμάτων

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών IoT στην επεξεργασία και διανομή των θαλασσινών μπορεί να βελτιώσει την επιχειρησιακή αποδοτικότητα, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια των προϊόντων και επιτρέποντας την ιχνηλασιμότητα τους σε πραγματικό χρόνο. Από τις έξυπνες εγκαταστάσεις που παρακολουθούν την υγιεινή των ιχθυηρών και τη ορθότερη χρήση των πόρων στις υδατοκαλλιέργειες, έως τα προηγμένα συστήματα διαχείρισης της ψυκτικής αλυσίδας που διατηρούν τη φρεσκάδα, η τεχνολογία του IoT είναι σε θέση να προσφέρει πλήρη έλεγχο και διαφάνεια σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα των θαλασσινών.

3.1 Έξυπνη Επεξεργασία και Διαχείριση Εγκαταστάσεων

Η επεξεργασία των θαλασσινών αποτελεί ένα ιδιαίτερα κρίσιμο στάδιο, όπου τα προϊόντα καθαρίζονται, συσκευάζονται και προετοιμάζονται για διανομή, απαιτώντας αυστηρούς ελέγχους υγιεινής και περιβαλλοντικών συνθηκών. Αισθητήρες συνδεδεμένοι με τεχνολογία IoT είναι σε θέση να παρακολουθούν συνεχώς τις βασικές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ποιότητα του αέρα και το μικροβιακό φορτίο στις εγκαταστάσεις [17]. Αν οποιαδήποτε παράμετρος ξεπεράσει τα όρια ασφαλείας, αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν να στείλουν εγκαίρως ειδοποιήσεις ή να προσαρμόσουν τα συστήματα HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) ώστε να αποκατασταθούν άμεσα οι ασφαλείς συνθήκες [14].

Ο αυτοματισμός της ροής εργασίας αποτελεί μια ακόμη σημαντική εφαρμογή. Εξοπλισμός με ενσωματωμένη τεχνολογία IoT μπορεί να εκτελεί εργασίες όπως η διαλογή και η συσκευασία, ενώ η ανάλυση επιδόσεων σε πραγματικό χρόνο βοηθά στον εντοπισμό ανεπαρκειών και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης της παραγωγής. Παράλληλα, το IoT υποστηρίζει τη διαχείριση ενέργειας και πόρων, παρακολουθώντας την κατανάλωση νερού και ρεύματος μέσω έξυπνων μετρητών, επιτρέποντας στις μονάδες επεξεργασίας να μειώνουν τη σπατάλη και να συμβάλλουν στους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης [16]. Αυτές οι εξελίξεις στη «έξυπνη» βιομηχανία τροφίμων που ενσωματώνουν την Τεχνητή Νοημοσύνη και το IoT επιτρέποντας την ιχνηλάτηση των αποβλήτων, τη μείωση και την επαναξιοποίησή τους σε όλα τα στάδια παραγωγής, συμβάλλουν θετικά στην ενίσχυση των πρακτικών της κυκλικής οικονομίας [16, 20].

3.2 Διασφάλιση Ποιότητας και Ιχνηλασιμότητα στη Ψυκτική Αλυσίδα

Το IoT διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της ποιότητας των θαλασσινών σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα. Αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και αερίων ενσωματωμένοι σε έξυπνες συσκευασίες και δοχεία μεταφοράς παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τις συνθήκες του προϊόντος. Για παράδειγμα, εάν η θερμοκρασία αποκλίνει από τα ασφαλή όρια, αποστέλλονται άμεσες ειδοποιήσεις που επιτρέπουν διορθωτικές ενέργειες, προστατεύοντας τη φρεσκάδα και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς ασφάλειας των τροφίμων [17, 18].

Η ιχνηλασιμότητα είναι εξίσου κρίσιμη. Κάθε παρτίδα θαλασσινών μπορεί να επισημανθεί με RFID ή κωδικούς QR συνδεδεμένους σε βάση δεδομένων IoT, παρακολουθώντας την προέλευση, το ιστορικό επεξεργασίας και τη διαδρομή διανομής. Αυτή η πλήρης ορατότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας ενισχύει την ασφάλεια των τροφίμων, υποστηρίζει τη ρυθμιστική συμμόρφωση και επιτρέπει γρήγορες και στοχευμένες ανακλήσεις προϊόντων, όταν αυτό απαιτείται [15]. Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός IoT με blockchain και συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης, ενισχύει τη διαφάνεια και την ακεραιότητα της ψυκτικής αλυσίδας, ενδυναμώνοντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών στα θαλασσινά προϊόντα [15, 17].

4 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή του IoT στην παραγωγή θαλασσινών αντιπροσωπεύει ένα καινοτόμο και εναλλακτικό τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε, συλλέγουμε, επεξεργαζόμαστε και διανέμουμε τα αλιεύματα. Μέσω της έξυπνης παρακολούθησης, του αυτοματισμού και της ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, το IoT επιτρέπει μεγαλύτερη αποδοτικότητα, βιωσιμότητα και ιχνηλασιμότητα σε ολόκληρη την αλυσίδα των θαλασσινών.

Φυσικά, παραμένουν αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε να διασφαλιστεί η ευρεία υιοθέτησή του. Οι υψηλές αρχικές επενδύσεις, η τεχνολογική πολυπλοκότητα, οι ανησυχίες για την ιδιωτικότητα των δεδομένων, καθώς και τα ζητήματα διαλειτουργικότητας των πλατφορμών, παραμένουν σημαντικά εμπόδια. Οι μελλοντικές εξελίξεις θα πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στη δημιουργία χαμηλού κόστους, ενεργειακά αποδοτικών αισθητήρων, αλλά και σε πρωτόκολλα επικοινωνίας κατάλληλα για την ενσωμάτωσή τους σε πλατφόρμες Τεχνητής Νοημοσύνης για την αποδοτικότερη λήψη αποφάσεων. Καθοριστική θα είναι επίσης η ύπαρξη υποστηρικτικών οικονομικών κινήτρων, ρυθμιστικών πλαισίων και προγραμμάτων ενδυνάμωσης για παραγωγούς και αλιείς μικρής κλίμακας.

Αναδυόμενες τεχνολογίες όπως το edge computing, η συνδεσιμότητα 5G και τα συστήματα που βασίζονται σε βιοαισθητήρες, αναμένεται να επεκτείνουν περαιτέρω τις εφαρμογές του IoT στον τομέα των θαλασσινών. Η συνεργατική καινοτομία μεταξύ ακαδημαϊκής κοινότητας, βιομηχανίας και των υπεύθυνων χάραξης πολιτικής είναι απαραίτητη για την πλήρη αξιοποίηση του IoT και την οικοδόμηση μιας ανθεκτικής, διαφανούς και υψηλής ποιότητας βιομηχανίας θαλασσινών, που να ανταποκρίνεται στις εξελισσόμενες απαιτήσεις τόσο των καταναλωτών όσο και της περιβαλλοντικής διαχείρισης.

Επιπλέον, η επέκταση της ψηφιακής υποδομής και των προγραμμάτων κατάρτισης μπορεί να βοηθήσει στην άρση του τεχνολογικού χάσματος για τους παραγωγούς και αλιείς μικρής κλίμακας. Η συμπερίληψη αυτή είναι κρίσιμη, ώστε να διασφαλιστεί ότι τα οφέλη της καινοτομίας θα διανέμονται δίκαια, συμβάλλοντας στην παγκόσμια διατροφική ασφάλεια και στη βιώσιμη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων.

5 Αναφορές

[1] A. G. J. Tacon, J. Levy, R. Coelho, T. M. Machado, C. R. P. Neiva, and D. E. L. Lemos, "Fish for health: Role of fish in global food and animal protein supply," *Rev. Fish. Sci. Aquacult.*, vol. 33, no. 2, pp. 319–333, 2024, doi: 10.1080/23308249.2024.2420917.

[2] I. Issifu, J. J. Alava, V. W. Lam, and U. R. Sumaila, "Impact of ocean warming, overfishing and mercury on European fisheries: A risk assessment and policy solution framework," *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, p. 770805, 2022, doi: 10.3389/fmars.2021.770805.

[3] S. Ismail, H. Reza, K. Salameh, H. Kashani Zadeh, and F. Vasefi, "Toward an intelligent blockchain IoT-enabled fish supply chain: A review and conceptual framework," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5136, 2023, doi: 10.3390/s23115136.

[4] U. F. Mustapha, A. W. Alhassan, D. N. Jiang, and G. L. Li, "Sustainable aquaculture development: A review on the roles of cloud computing, internet of things and artificial intelligence (CIA)," *Rev. Aquacult.*, vol. 13, no. 4, pp. 2076–2091, 2021, doi: 10.1111/raq.12559.

[5] Y. Adityas, M. Ahmad, M. Khamim, K. Sofi, and S. R. Riady, "Water quality monitoring system with parameter of pH, temperature, turbidity, and salinity based on internet of things," *J. Informatika dan Sains (JISA)*, vol. 4, no. 2, pp. 138–143, 2021, doi: 10.31326/jisa.v4i2.965.

[6] K. L. Tsai, L. W. Chen, L. J. Yang, H. J. Shiu, and H. W. Chen, "IoT-based smart aquaculture system with automatic aerating and water quality monitoring," *J. Internet Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 177–184, 2022, doi: 10.53106/160792642022012301018.

[7] C. Zhou, D. Xu, K. Lin, C. Sun, and X. Yang, "Intelligent feeding control methods in aquaculture with an emphasis on fish: A review," *Rev. Aquacult.*, vol. 10, no. 4, pp. 975–993, 2018, doi: 10.1111/raq.12218.

[8] S. I. Islam, F. Ahammad, and H. Mohammed, "Cutting-edge technologies for detecting and controlling fish diseases: Current status, outlook, and challenges," *J. World Aquacult. Soc.*, vol. 55, no. 2, p. e13051, 2024, doi: 10.1111/jwas.13051.

[9] N. Renaldo, "Integration of internet of things and digital accounting systems for marine resources monitoring," *Interconnection: An Economic Perspective Horizon*, vol. 2, no. 1, pp. 50–59, 2024, doi: 10.61230/interconnection.v2i1.91.

[10] T. S. Shanthi *et al.*, "Illegal fishing, anomalous vessel behavior detection through automatic identification system," in *Proc. IEEE 3rd Glob. Conf. Adv. Technol. (GCAT)*, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.127.

[11] S. Lucas and P. Berggren, "A systematic review of sensory deterrents for bycatch mitigation of marine megafauna," *Rev. Fish Biol. Fish.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–33, 2023, doi: 10.1007/s11160-022-09736-5.

[12] A. T. van Helmond *et al.*, "Electronic monitoring in fisheries: Lessons from global experiences and future opportunities," *Fish Fish.*, vol. 21, no. 1, pp. 162–189, 2020, doi: 10.1111/faf.12425.

[13] A. Razzaq, S. A. H. Mohsan, Y. Li, and M. H. Alsharif, "Architectural framework for underwater IoT: Forecasting system for analyzing oceanographic data and observing the environment," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 2, p. 368, 2023, doi: 10.3390/jmse11020368.

[14] P. Chaudhari, Y. Xiao, M. M.-C. Cheng, and T. Li, "Fundamentals, algorithms, and technologies of occupancy detection for smart buildings using IoT sensors," *Sensors*, vol. 24, no. 7, p. 2123, 2024, doi: 10.3390/s24072123.

[15] Y. Bouzembrak, M. Klüche, A. Gavai, and H. J. Marvin, "Internet of things in food safety: Literature review and a bibliometric analysis," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 94, pp. 54–64, 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.11.002.

[16] S. Jagtap, G. Garcia-Garcia, and S. Rahimifard, "Optimisation of the resource efficiency of food manufacturing via the internet of things," *Comput. Ind.*, vol. 127, p. 103397, 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103397.

[17] S. Sarkar, K. S. Akshatha, A. Saurabh, B. Samanvitha, and M. F. Sarwar, "IoT-enabled cold supply chain monitoring system," in *Proc. IEEE 3rd Glob. Conf. Adv. Technol. (GCAT)*, Oct. 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/GCAT55367.2022.9972137.

[18] B. Jæger and A. Mishra, "IoT platform for seafood farmers and consumers," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4230, 2020, doi: 10.3390/s20154230.

[19] H. Rastegari *et al.*, "Internet of things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends," *Smart Agric. Technol.*, vol. 4, p. 100187, 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100187.

[20] A. Hassoun *et al.*, "Use of industry 4.0 technologies to reduce and valorize seafood waste and by-products: A narrative review on current knowledge," *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 6, p. 100505, 2023, doi: 10.1016/j.crfs.2023.100505.

[21] Libelium, *Aquaculture Health Monitoring in Scottish Salmon Sea Farms with Libelium IoT Platform*, [Online]. Available: https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/aquaculture-health-monitoring-in-scottish-salmon-sea-farms-with-libelium-iot-platform/. Accessed: 2 Jun. 2025.

[22] EASTAR Project, *Home – SEASTAR*, [Online]. Available: https://www.seastar-project.eu/. Accessed: 2 Jun. 2025.

[23] Internet Initiative Japan Inc., *IIJ Launches Field Trial in the Thai Aquaculture Industry with IoT, Backed by JETRO's "Project for Nurturing New Industries in ASEAN and Japan"*, [Online]. Available: https://www.iij.ad.jp/en/news/pressrelease/2018/pdf/thai_iot_E.pdf. Accessed: 2 Jun. 2025..

[24] Aquaculture Magazine, *The Benefits of Aquaculture with IoT Technology*, [Online]. Available: https://aquaculturemag.com/2018/06/26/the-benefits-of-aquaculture-with-iot-technology/. Accessed: 2 Jun. 2025.

Evaluating future air traffic management security

Konstantinos Spalas, MSc in Computer Science, Tripoli, dit2318cst@go.uop.gr

11 June 2025

Abstract

The L-Band Digital Aviation Communication System (LDACS) aims to modernize communications between the aircraft and the tower. Besides the major project to digitize this type of communication, the contributors focus on protecting them against cyber attacks. There are several proposals regarding LDACS security, and a recent one suggests the utilization of Physical Unclonable Functions (PUFs) for the authentication module. This work demonstrates this PUF-based authentication mechanism along with its potential vulnerabilities. Sophisticated models are able to predict PUFs and the behavior of PUF-based protocol, jeopardizing the authentication mechanism and giving the ability to perform impersonation attacks. On the other hand, aging is a characteristic that affects the stability of PUFs, which may occur to instability issues, rendering the system unavailable. In this context, this work proposes the well-established Public Key Infrastructure (PKI), as an alternative solution.

Key words : PUF, LDACS, Aviation, Communications, Post-Quantum

1 Introduction

By now, communications between the aircraft and the control tower utilize analog RF signals. However, the growing congestion of radio frequencies, especially at popular airports, implies the need to upgrade these communication infrastructure, mitigating the risks when multiple aircraft request tower radio contact. In addition, current communication systems lack resilience against cyber attacks [1]. Hence, the Single European Sky ATM[1] Research (SESAR) [2] takes on this challenge, making ATM modern by addressing a number of systematic problems. One of its pillars is to establish the L-Band Digital Aviation Communication System (LDACS) [3], [4], which will serve our skies in the future, promising to include Post-Quantum Cryptography (PQC).

The main purpose of this work is to evaluate a recent PUF-based authentication mechanism of LDACS [5], [6]. In return, a PQC- based PKI is proposed as a countermeasure. The following Ch. 2 briefly refers to the background in order to support the evaluation in Ch. 3.

2 Background

PUF: A Physical Unclonable Function (PUF) [7] is a hardware-based security primitive that leverages the unique physical characteristics of a device to produce a distinct response R when given a specific input, named challenge C. PUFs are commonly used for secure authentication, key generation, and protection against hardware cloning.

[1]Air Traffic Management

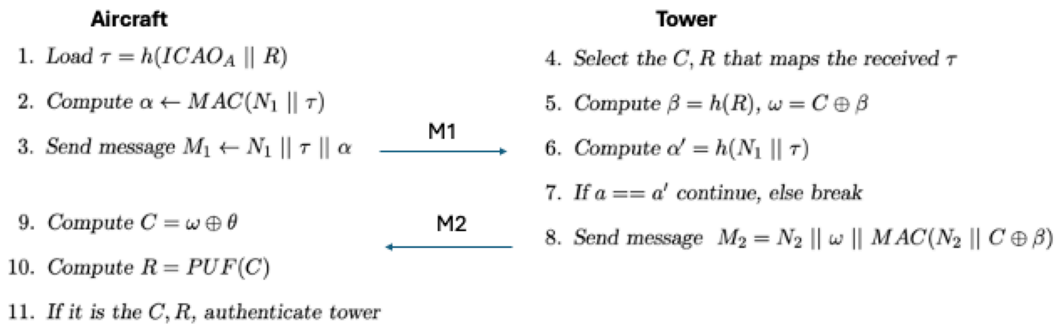


Figure 1: Aircraft authenticates tower

ICAO address: The International Civil Aviation Organization address $\mathrm{ICAO_A}$[2] is a unique 24-bit identifier assigned to every aircraft transponder. Issued by national aviation authorities, this address ensures global aircraft identification and tracking, enabling reliable communication between aircraft and ground-based surveillance systems.

CMA-ES ML algorithm: Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) is an advanced evolutionary algorithm designed for continuous optimization problems. The authors in [8] utilized the CMA-ES algorithm to predict the behavior of PUFs, with great success.

Quantum computers: Advanced machines that use the principles of quantum mechanics to process information. Unlike classical computers, which use bits (0s and 1s) to represent data, quantum computers use quantum bits (qubits). Grover [9] has proven that quantum computers can reduce the cost of a search to $\mathcal{O}(2^{n/2})$, rather than to $\mathcal{O}(2^n)$ the classical computer needs.

3 The authentication protocol

To understand the aforementioned lightweight PUF-based authentication mechanism for LDACS, first we must go through the *registration* phase, which is a one-time procedure, performed offline prior to system deployment. It ensures that the aircraft and tower secretly share the cryptographic material necessary for mutual authentication in the open air. Thus, the former's radio unit stores τ and $\theta = h(R)$, while the latter's stores $\mathrm{ICAO_A}$, C, R, τ, where:

$$\tau = h(\mathrm{ICAO_A}||R)_{24} \tag{1}$$

$$R = PUF(C) \tag{2}$$

with h to be a hash function. Note that τ contains the first 24 bits of the hash.

After being registered, a radio unit can serve an aircraft. So, if pilots request radio contact during flight or even before engines start, the authentication protocol exchanges several messages. The process leads the system to produce the same symmetric key for a secure channel, utilizing Key Encapsulation Mechanism (KEM). This operation is illustrated in Fig. 1, until the step where the aircraft authenticates the tower. MAC is denoted as a Message Authentication Code and N_1 and N_2 are nonce values to keep communication fresh.

3.1 Leakage of C, R

Despite that crucial information sent is hashed, someone could receive these signals using the appropriate hardware [10], isolating any part of the messages for further processing. So, he can easily extract the value τ from the message M_1 because he knows its structure [6]. Consequently, in a small airport, where flights are rare, it would be easy to match τ with the corresponding

[2]https://en.wikipedia.org/wiki/ICAO_code

$\mathrm{ICAO_A}$, which is a public and permanent value that uniquely describes an aircraft. For the tower point of view, the pseudo-address τ functions as a filter on the C, R pair look-up table, as depicted in Fig. 1 and thus it might also be unique for each aircraft.

Moreover, in [11] is mentioned that an ideal PUF would consist of a 32-bit challenge C and a 128-bit response R. As these deterministic functions are one-to-one, the challenge set $\mathcal{C} = \{0,1\}^{32}$ maps 2^{32} responses to the set $\mathcal{R} = \{0,1\}^{128}$. Consequently, the C, R pair that interests an LDACS attacker is the one that solves (1) and (2).

Attack, method 1: Recall Ch.2 where the authors managed to predict the behavior of several PUFs utilizing the sophisticated CMA-ES ML technique. In this context, if an attacker cannot precisely replicate a PUF chip using advanced fabrication techniques or cannot acquire one produced by the same vendor, a well-trained model might be able to predict the behavior of the embedded PUF. In this case, the model will map $\mathcal{C} \to \mathcal{R}$, and then Eq. 1, 2 will be used by the adversary to create a look up table with the values τ, $ICAO_A$ and the pair C, R. Alg.1 presents the rationale behind the impersonation of the tower. Note that disclosure of the secret C, R allows a bidirectional impersonation attack.

Input: Many messages M_1 containing $ICAO_A$
Output: A matching pair (C, R) such that $h(ICAO_A||R) = \tau$

Map each $ICAO_A$ to corresponding τ;
Success $\leftarrow$ **false**;
repeat
  Train model to map vectors from set $\mathcal{C} \to \mathcal{R}$;
  Receive M_1;
  Isolate τ from M_1;
  foreach $R \in \mathcal{R}$ **do**
    Compute $h(ICAO_A||R)$;
    if $\tau = h(ICAO_A||R)$ **then**
      Select corresponding C from $\mathcal{C}$;
      Success $\leftarrow$ **true**;
      return (C, R);
until *Success*;

Algorithm 1: Attack, method 1

Attack, method 2: Both $ICAO_A$ and τ have 24 bit length and each of them uniquely identifies an aircraft. Then, we can deduce that the whole set $\mathcal{R} = \{0,1\}^{128}$ can be used to produce these 2^{24} τ, describing the total amount of the fleet. Hence, for a single τ, thereby a single aircraft, there are $2^{128-24} = 2^{104}$ different R that can solve Eq. 1. In such a case, the quantum preimage algorithm [12] can reduce the total cost from $\mathcal{O}(2^n)$ to $\mathcal{O}(2^{n/3}) = \mathcal{O}(2^{104/3}) \approx \mathcal{O}(2^{33})$, which is feasible with quantum computers[3] future capabilities. Taking into account the protocol in Fig. 1, this type of attack can impersonate only the aircraft.

3.2 PUF aging

Aging is inevitable in PUFs, but there are sometimes ways to mitigate it. In any case, [13] mentions that aging increases by 19% every two years, and in this context, consideration arises about their reliability on authentication mechanisms.

4 Conclusions and proposals

While authorities tend to transform future aviation communications to a modern and more secure environment with PUF-based authentication mechanisms, the strength of future quantum

[3] https://www.ibm.com/roadmaps/quantum/2030/

computation, combined with ML algorithms threatens these future communications. This results in the need for a more secure and latency-free resistance system. Instead, a well-established PQC-based PKI between the aircraft, tower and a certification authority could be a significant alternative.

References

[1] Chris W. Johnson. "Cyber security and the future of safety-critical air traffic management: Identifying the challenges under NextGen and SESAR". In: *10th IET System Safety and Cyber-Security Conference 2015*. 2015, pp. 1–6. **doi**: 10.1049/cp.2015.0276.

[2] Rainer Koelle and Martin Hawley. "Sesar security 2020: How to embed and assure security in system-of-systems engineering?" In: *2012 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*. 2012, E8-1-E8–11. **doi**: 10.1109/ICNSurv.2012.6218393.

[3] C. Rihacek et al. "L-band Digital Aeronautical Communications System (LDACS) activities in SESAR2020". In: *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)*. 2018, 4A1-1-4A1–8. **doi**: 10.1109/ICNSURV.2018.8384880.

[4] Nils Mäurer et al. "A Secure Cell Attachment Procedure of LDACS". In: Sept. 2021. **doi**: 10.1109/EuroSPW54576.2021.00019.

[5] Nils Mäurer et al. "PMAKE: Physical unclonable function-based mutual authentication key exchange scheme for digital aeronautical communications". In: *2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*. IEEE. 2021, pp. 206–214.

[6] Suleman Khan et al. "Enhancing Cybersecurity for LDACS: a Secure and Lightweight Mutual Authentication and Key Agreement Protocol". In: *2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. 2023, pp. 1–10. **doi**: 10.1109/DASC58513.2023.10311307.

[7] Charles Herder et al. "Physical Unclonable Functions and Applications: A Tutorial". In: *Proceedings of the IEEE* 102.8 (2014), pp. 1126–1141. **doi**: 10.1109/JPROC.2014.2320516.

[8] Chongyao Xu et al. "Modeling Attack Resistant Strong PUF Exploiting Stagewise Obfuscated Interconnections With Improved Reliability". In: *IEEE Internet of Things Journal* (2023), pp. 1–1. **doi**: 10.1109/JIOT.2023.3267657.

[9] Lov K Grover. "A fast quantum mechanical algorithm for database search". In: *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*. 1996, pp. 212–219.

[10] Erwin Orye, Gabor Visky, and Olaf Maennel. "Analysing the Actual Use of Controller–Pilot Data Link Communications". In: *Engineering Proceedings* 28.1 (2023), p. 18.

[11] Avi Miller et al. "A highly reliable SRAM PUF with a capacitive preselection mechanism and pre-ECC BER of 7.4 E-10". In: *2019 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. IEEE. 2019, pp. 1–4.

[12] Ping Wang et al. "Quantum algorithms for hash preimage attacks". In: *Quantum Engineering* 2.2 (2020), e36. **doi**: https://doi.org/10.1002/que2.36.

[13] Rui Wang et al. "Long-term continuous assessment of SRAM PUF and source of random numbers". In: *2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. IEEE. 2020, pp. 7–12.