



2^ο Φοιτητικό Συνέδριο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Τρίπολη | Αμφιθέατρο «Αντώνιος Μπουκουβάλας» | 3 Ιουνίου 2026



ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

Πρακτικά 2^{ου} Φοιτητικού Συνεδρίου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Τρίπολη, 3 Ιουνίου 2026

Αμφιθέατρο «Αντώνιος Μπουκουβάλας»

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Σχολή Οικονομίας και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

Διοργάνωση:

Οργανωτική Επιτροπή 2^{ου} Φοιτητικού Συνεδρίου Πληροφορικής και
Τηλεπικοινωνιών

Επιμέλεια Έκδοσης:

Οργανωτική Επιτροπή 2^{ου} Φοιτητικού Συνεδρίου Πληροφορικής και
Τηλεπικοινωνιών

Ιστοσελίδα Συνεδρίου:

<https://studentconf.dit.uop.gr/2026/>

Ηλεκτρονική έκδοση διαθέσιμη μέσω της επίσημης ιστοσελίδας του συνεδρίου και
της επίσημης ιστοσελίδας του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του
Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

© 2026 Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

ISSN: 3057-630X

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Μετρήσεις στο κέντρο της Καλαμάτας για τις τεχνολογίες LTE και 5G-NR με χρήση Wideband Scanner	1
Μελέτη Ασύρματης Διάδοσης και Ποιότητας Υπηρεσιών σε δίκτυα 5G.....	5
5G Network Slicing: Η Επανάσταση της Δυναμικής Εναλλαγής Slices	9
Τεχνολογία Massive MIMO στα δίκτυα 5G.....	13
Κωδικοποίηση Δεδομένων σε Έντυπο Μέσο.....	17
Τεχνητή Νοημοσύνη στην Ακαδημαϊκή Εκπαίδευση	21
COSTAS ACADEMY: Διαδικτυακή Πλατφόρμα Μάθησης για Φοιτητές και Διδάσκοντες με Εργαλεία Επανάληψης και Προοπτική Υποστήριξης με AI	25
Simple Power Analysis on Post-Quantum Code Based Cryptosystems	30
Ψηφιακό Χάσμα Γενεών: Πώς η τεχνολογία επηρεάζει κάθε γενιά	34
Σχεδιασμός και υλοποίηση ενσωματωμένου συστήματος για την παρακολούθηση διαδρομών αστικών λεωφορειογραμμών	38
Σύγχρονη κατασκευή μετωπιαίου άκρου ενός MINIC μεταγλωττιστή με παραγωγή ενδιάμεσης αναπαράστασης LLVM.....	42
AgroSphere: An Integrated IoT System for Smart Sheep Monitoring and Management.....	46
Μελέτη της Επίδρασης της Πυκνότητας των Επιβατών στην Απόδοση και την Εμπειρία του Χρήστη σε Δίκτυα 5G κατά τη Μετακίνηση με Λεωφορείο	51
What is the Internet of Things (IoT) and What Are Its Applications Today?	55
Polybot: Αλγοριθμικό Σύστημα Συναλλαγών σε Δυναμικές Αγορές Πρόβλεψης με Χρήση Μηχανικής Μάθησης	59
Σύστημα Ελέγχου και Παρακολούθησης Ηλιακού Θερμοσίφωνα μέσω IoT	63
UAVs as Autonomous Network Edge Nodes: Field Trials and Validation	68

Μετρήσεις στο κέντρο της Καλαμάτας για τις τεχνολογίες LTE και 5G-NR με χρήση Wideband Scanner

Διονύσιος Μπακάλης,
ΠΜΣ Σύγχρονες Ασύρματες Επικοινωνίες,
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών,
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, dit2407mst@go.uop.gr

Γεωργία Αθανασιάδου,
Εργαστήριο Ασυρμάτων και Κινητών Επικοινωνιών,
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών,
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, gathanas@uop.gr

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Παρόλο που οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών υπόσχονται πολλά σχετικά με την τεχνολογία 5G-NR, οι προκλήσεις όσο αφορά την κάλυψη, τη χωρητικότητα και την ποιότητα των υπηρεσιών, παραμένουν. Η μετάβαση από την τεχνολογία LTE σε 5G-NR είναι ακόμα σε αρχικά στάδια στην Ελλάδα, με τα δίκτυα 5G να χρησιμοποιούν τις προϋπάρχουσες δομές και πόρους των δικτύων LTE, που όμως δεν έχουν βελτιστοποιηθεί για την καινούργια τεχνολογία και για αυτό χρειάζεται διαρκή παρακολούθηση και αξιολόγηση του δικτύου από τους παρόχους, αλλά και από ανεξάρτητους φορείς, όπως τα ερευνητικά εργαστήρια. Ορμώνοντες από αυτή την αναγκαιότητα, χρησιμοποιήσαμε τον Scanner SeeGull IBflex της PCTEL, έναν μετρητή φάσματος για ταυτόχρονη μέτρηση των παραμέτρων ποιότητας σήματος RSRP, SINR και RSRQ, όλων των χρησιμοποιούμενων καναλιών 5G-NR και LTE. Οι μετρήσεις έγιναν για περισσότερο από μία ώρα κάθε φορά, σε σταθερό σημείο στο κέντρο της Καλαμάτας σε διαφορετικές μέρες κατά την περίοδο των χειμερινών εορτών. Διαπιστώσαμε ότι οι πάροχοι συνεχίζουν να βασίζονται κυρίως στην τεχνολογία LTE, ενώ τα δίκτυα 5G-NR χρησιμοποιούνται επικουρικά χωρίς να αποδίδουν το μέγιστο των δυνατοτήτων τους. Επίσης οι ζεύξεις LTE παρουσίαζαν καλύτερα χαρακτηριστικά, αφού το δίκτυο έχει αναπτυχθεί σύμφωνα με τις δικές τους απαιτήσεις.

Λέξεις κλειδιά: Παράμετροι ποιότητας σήματος, Σαρωτής RF, 5G-NR

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια βλέπουμε συνεχή αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών με την εμφάνιση της τεχνολογίας 5G, που σταδιακά εφαρμόζεται παντού αντικαθιστώντας τις προηγούμενες γενιές τηλεπικοινωνιών, ενώ οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών έχουν ήδη αρχίσει να σχεδιάζουν την επόμενη γενιά, 6G. Οι προκλήσεις όμως όσο αφορά την κάλυψη, τη χωρητικότητα και την ποιότητα των υπηρεσιών παραμένουν, ενώ η αναβάθμιση και η μετάβαση από το LTE στο 5G-NR, οδηγεί στην ανάγκη μετρήσεων στον πραγματικό κόσμο για την απόδοση, αλλά και την επιτυχή υλοποίηση και λειτουργία του δικτύου.

Σε αυτή την εργασία, στόχος μας ήταν η μελέτη της απόδοσης των δικτύων LTE και 5G κατά τη διάρκεια της μετάβασης από τη μία τεχνολογία σε τεχνολογία επόμενης γενιάς, σε μια μεγάλη επαρχιακή πόλη, την Καλαμάτα. Αυτό έγινε με την παρατήρηση μέσω ταυτόχρονων μετρήσεων των παραμέτρων ποιότητας σήματος RSRP (Reference Signal Received Power), SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) και RSRQ (Reference Signal Received Quality), όλων των

χρησιμοποιούμενων καναλιών, σε πολυσύχναστο, σταθερό σημείο στο κέντρο της πόλης, σε διαφορετικές μέρες κατά την περίοδο των χειμερινών εορτών. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε από τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ασυρμάτων και Κινητών Επικοινωνιών, τον μετρητή φάσματος Scanner SeeGull IBflex της PCTEL. Ακολουθήσαμε κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων, τόσο με έτοιμο λογισμικό όσο και με κώδικα MATLAB® που αναπτύχθηκε για αυτό τον σκοπό.

2. Μεθοδολογία Μετρήσεων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία προετοιμασίας που ακολουθήθηκε πριν αλλά και κατά την διάρκεια των μετρήσεων [1], όπως το περιβάλλον όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ο εξοπλισμός, οι παράμετροι που ελήφθησαν υπόψιν κλπ.



Σχήμα 1. Διάταξη και τοποθεσία μέτρησης.

2.1 Περιβάλλον μετρήσεων

Οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν στην Λαϊκή Βιβλιοθήκη του Πνευματικού Κέντρου της Καλαμάτας. Ο χώρος αυτός είναι ένα από τα πιο κεντρικά σημεία της πόλης και ακριβώς απέναντι από το κτήριο αυτό βρίσκονται κεραίες όλων των τηλεπικοινωνιακών παρόχων της χώρας. Αυτό το μέρος αποτελεί το ιδανικό περιβάλλον για τέτοιου είδους μετρήσεις καθώς μπορούμε να μελετήσουμε παραμέτρους όπως για απώλειες διαδρομής, παρεμβολές, χωρητικότητα, κάλυψη κλπ.

2.2 Εξοπλισμός μετρήσεων

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σαρωτή SeeGull IBflex της PCTEL. Είναι ένας σαρωτής RF προηγμένης τεχνολογίας, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την καταγραφή και ανάλυση σημάτων κινητής και ασύρματης τηλεφωνίας, όπως οι LTE και 5G-NR, αλλά και άλλων σύγχρονων και ασύρματων τεχνολογιών. Μπορεί να καταγράφει για όσο χρονικό διάστημα ζητηθεί τις παραμέτρους ποιότητας των σημάτων αυτών, RSRP, RSRQ και SINR. Ο σαρωτής ήταν συνδεδεμένος με μία ευρυζωνική κεραία RF (450MHz – 6GHz), με μία κεραία GPS για την διαρκή καταγραφή της τοποθεσίας του και επίσης ο έλεγχος της λειτουργίας της όλης διαδικασίας γίνονταν μέσω ενός laptop. Τέλος για την καταγραφή, τη παραμετροποίηση και την οπτική αναπαράσταση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Echo Studio (Enhancell).

2.3 Μεθοδολογία μετρήσεων

Προτού προχωρήσουμε στις μετρήσεις, εντοπίσαμε και καταγράψαμε τις συγκεκριμένες μπάντες και κανάλια αυτών, για τις δύο τεχνολογίες, που χρησιμοποιούνται στην πόλη. Μέσω του Echo Studio πραγματοποιήσαμε δύο smart scan, ένα για το LTE με διάρκεια περίπου 90 λεπτών και ένα για το 5G-NR με διάρκεια περίπου 30 λεπτών. Τα χρησιμοποιούμενα κανάλια 5G ήταν αριθμητικά

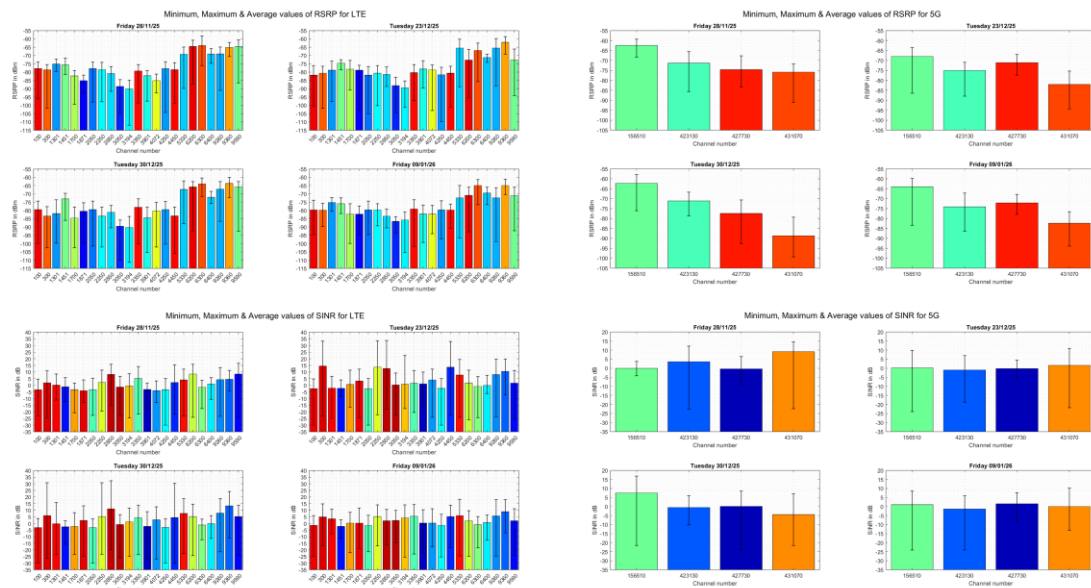
λιγότερα, αφού μόλις τέσσερα ενεργά κανάλια εντοπίστηκαν για το 5G και 23 κανάλια για το LTE. Έτσι έχοντας στην διάθεσή μας τα κανάλια και τις μάντες των δύο τεχνολογιών, παραμετροποιήσαμε ανάλογα τον σαρωτή, ώστε να επικεντρώνεται σε αυτά. Συνολικά πραγματοποιήσαμε τέσσερις ανεξάρτητες μετρήσεις από τον Νοέμβριο του 2025 μέχρι τον Ιανουάριο του 2026, όλες πρωινές ώρες, κάνοντας παράλληλα μετρήσεις για κάθε μία τεχνολογία (LTE και 5G-NR) στην ίδια πάντα τοποθεσία. Η όλη διαδικασία χωρίστηκε σε τρεις διαφορετικές περιόδους, προ-Χριστουγέννων, Χριστούγεννα και μετά-Χριστουγέννων για να συγκρίνουμε τη λειτουργία του δικτύου σε διαφορετικές περιόδους.

3. Στατιστική Ανάλυση

Έπειτα από τις μετρήσεις και την περισυλλογή των αποτελεσμάτων σειρά είχε η επεξεργασία αυτών με την βοήθεια ειδικά διαμορφωμένου κώδικα σε περιβάλλον MATLAB®. Έτσι υπολογίσαμε 1) Μέσες τιμές ανά κανάλι καθώς και 2) IQR (Interquartile Range) διασπορά και ενδιάμεσες τιμές ανά κανάλι, σύμφωνα με τα [1] και [2].

3.1 Μέσες τιμές ανά κανάλι

Έχοντας λοιπόν στην διάθεσή μας τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των τεσσάρων ημερών και ύστερα και από την επεξεργασία αυτών, υπολογίσαμε σε πρώτο στάδιο μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή για κάθε μία εκ των παραμέτρων ποιότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, όσον αφορά το LTE το επίπεδο του σήματος (RSRP) στα περισσότερα κανάλια είναι κατά μέσο όρο σε μέτρια επίπεδα. Δύο κανάλια έχουν καλύτερο RSRP, τα 9360 (773MHz) και 6300 (806MHz) με -64 dBm κατά μέσο όρο, ενώ τα υπόλοιπα με συχνότητα λειτουργίας κοντά σε αυτή των προαναφερθέντων καναλιών, έχουν RSRP πιο χαμηλό. Τα κανάλια αντιθέτως με υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας, γύρω στα 2100 MHz, έχουν RSRP σε μέτρια επίπεδα, αλλά το SINR είναι υψηλότερο σε σχέση με τα χαμηλής συχνότητας κανάλια για κάθε ημέρα μέτρησης. Ως προς το 5G ισχύει ακριβώς η ίδια λογική, το κανάλι 156510 (782.6 MHz) είναι αυτό που έχει το καλύτερο επίπεδο σήματος, αλλά με SINR γύρω στα 2dB, ενώ το κανάλι 431070 (2155.4 MHz) είναι αυτό με το χαμηλότερο RSRP και 1.5dB κατά μέσο όρο SINR.

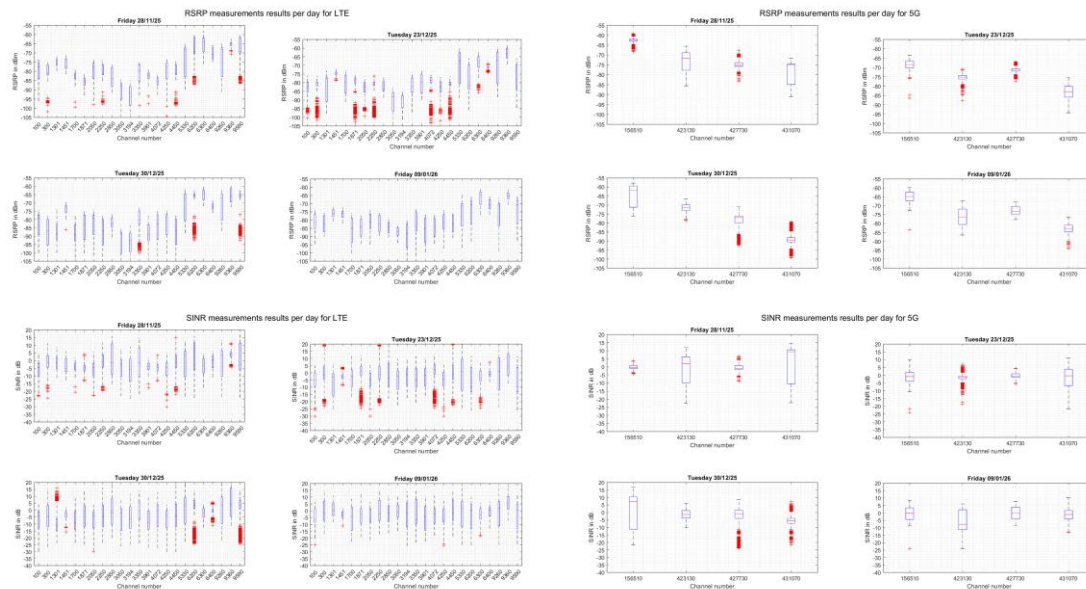


Σχήμα 2. Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές RSRP και SINR για LTE και 5G-NR ανά ημέρα μέτρησης.

3.2 IQR διασπορά και ενδιάμεσες (median) τιμές ανά κανάλι

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 3, στα Boxplot του RSRP για το 5G, το κανάλι 156510 έχει συνεχώς την υψηλότερη ενδιάμεση τιμή αλλά και την πιο περιορισμένη διασπορά τιμών, που αυτό σημαίνει πως όντως είναι πρώτο από πλευράς κάλυψης. Από την άλλη, τα υπόλοιπα κανάλια

έχουν σταδιακά χαμηλότερες ενδιάμεσες τιμές στο πέρας των ημερών, μάλλον λόγω αλλαγής των επιπέδων εκπεμπόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης παρατηρείται πως η διασπορά του μεγέθους RSRP παραμένει σε μέτρια επίπεδα για τα κανάλια, υποδεικνύοντας μια σταθερότητα στην κάλυψη. Ως προς το SINR το κανάλι 156510 διατηρεί την πιο ευνοϊκή και συνεπυγμένη κατανομή στο SINR, ενώ τα υπόλοιπα κανάλια παρουσιάζουν μεγαλύτερα IQR διαστήματα και με πολλές ακραίες τιμές. Τέλος για το LTE τα boxplot που αφορούν το RSRP δείχνουν να είναι σχετικά πιο συνεπυγμένα τα IQR διαστήματα στα περισσότερα κανάλια, υποδεικνύοντας υψηλή σταθερότητα κάλυψης και ως προς το SINR, τα boxplot φανερώνουν ότι οι ενδιάμεσες τιμές των καναλιών κυμαίνονται μεταξύ 0 έως 10 dB και έχουν πολύ λιγότερες ακραίες τιμές από ό,τι τα κανάλια του 5G.



Σχήμα 3. Boxplot RSRP και SINR για LTE και 5G-NR ανά ημέρα μέτρησης.

4. Συμπεράσματα

Η πιο ενδιαφέρουσα παρατήρηση ήταν ότι στο 5G-NR τα χαμηλής συχνότητα κανάλια διατηρούν συνεπυγμένες κατανομές SINR τιμών, ενώ τα υψηλότερης συχνότητας κανάλια παρουσιάζουν υψηλά IQR διαστήματα και πολλές ακραίες τιμές. Αντιθέτως οι μετρήσεις του LTE παρουσιάζουν συστηματικά χαμηλότερες τιμές διασποράς στο SINR με λιγότερες ακραίες τιμές, όπως επίσης σταθερές και οριακές συνθήκες παρεμβολών. Το δίκτυο έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της τεχνολογίας LTE και τα κανάλια που χρησιμοποιούσαν αυτή την τεχνολογία επιδείκνυαν πιο σταθερή συμπεριφορά. Η νέα τεχνολογία 5G-NR χρησιμοποιεί πόρους των ήδη εγκατεστημένων δικτύων LTE, έχοντας λιγότερα κανάλια με μεγάλες διακυμάνσεις, όπως επιβεβαιώνουν και οι μετρήσεις μας στην Καλαμάτα. Στόχος είναι να συνεχίσουμε τις μετρήσεις σε περισσότερες τοποθεσίες και κάτω από διαφορετικές συνθήκες για πιο ασφαλή συμπεράσματα και για παρακολούθηση της σταδιακής εξάπλωσης της τεχνολογίας 5G.

5. Αναφορές

- [1]. Δ.Μπακάλης: "Μετρήσεις στο κέντρο της πόλης της Καλαμάτας για τις τεχνολογίες LTE και 5G-NR με τη χρήση του Scanner SeeGull IBflex της PCTEL", 2026 Διπλωματική εργασία στο ΠΜΣ Σύγχρονες Ασύρματες Επικοινωνίες, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, 2026, pp. 1-66.
- [2]. D.Bakalis, G.Athanasiadou, G.Tsoulos, D.Zarbouti, S.Moukidou, "Temporal Stability Analysis of Fixed-Location Wideband 5G – 4G Measurements," 2026 8th Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET), 2026, pp. 1-4.

Μελέτη Ασύρματης Διάδοσης και Ποιότητας Υπηρεσιών σε δίκτυα 5G

Σοφία Μουκίδου, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, sofiamk@go.uop.gr

Γεωργία Αθανασιάδου, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, gathanas@uop.gr

Γεώργιος Τσούλος, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη, gtsoulos@uop.gr

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει μερικά από τα χαρακτηριστικά της ασύρματης διάδοσης όπως διαμορφώνονται λαμβάνοντας υπόψη την αστική δόμηση και τη μορφολογία του εδάφους για την πόλη της Τρίπολης (Πελοπόννησος, Ελλάδα), ενώ προσομοιώνει την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας τριών υπηρεσιών του 5G. Η μελέτη αξιολογεί τις επιδόσεις των υπηρεσιών eMBB, mMTC και URLLC σε δύο ζώνες συχνοτήτων (750 MHz και 2100 MHz), χρησιμοποιώντας ένα ντετερμινιστικό μοντέλο ψηφιακού διδύμου (Digital Twin), ώστε να γίνει εμφανής η επίδραση της αστικής γεωμετρίας στις απαιτήσεις των συγκεκριμένων υπηρεσιών τόσο σε λαμβανόμενη ισχύ, όσο και σε χρονική διασπορά καθυστέρησης. Τα αποτελέσματα για την υπηρεσία URLLC δείχνουν πως η πιθανότητα διακοπής της (outage), είναι σχεδόν 78% υπό συντηρητικές παραδοχές και περίπου 15% υιοθετώντας αισιόδοξες παραδοχές λειτουργίας.

Keywords: Digital Twin, pathloss, RMS delay spread, eMBB, mMTC, URLLC

1 Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G) είναι σχεδιασμένα για να υποστηρίξουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, οι οποίες διαφέρουν όχι μόνο ως προς την ελάχιστη λαμβανόμενη ισχύ, αλλά και ως προς τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την καθυστέρηση και την αξιοπιστία. Συνεπώς, η κατανόηση της επίδρασης του αστικού ιστού και του ανάγλυφου του εδάφους στα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού είναι απαραίτητη για τον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό του συστήματος και την καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος.

Οι ζώνες χαμηλών συχνοτήτων συνδέονται παραδοσιακά με διευρυμένη κάλυψη, ενώ οι υψηλότερες συχνότητες πλεονεκτούν ως προς τη χωρητικότητα και τη χωρική τους επαναχρησιμοποίηση. Οι περισσότερες μελέτες για την κάλυψη βασίζονται σε απλοποιημένα στατιστικά μοντέλα καναλιών, τα οποία δεν αποτυπώνουν πλήρως τους μηχανισμούς διάδοσης που απαντώνται σε πραγματικά αστικά περιβάλλοντα. Για την κάλυψη αυτού του κενού, προτείνονται οι ντετερμινιστικές τεχνικές ψηφιακού διδύμου (Digital Twin), οι οποίες αξιοποιούν λεπτομερείς γεωγραφικές βάσεις δεδομένων για τη μοντελοποίηση των ανακλάσεων, των περιθλάσεων και των αλληλεπιδράσεων με το έδαφος και τα κτίρια. Η τεχνολογία ψηφιακού διδύμου είναι βασισμένη στην ιχνηλάτηση ακτίνων (ray tracing) και παρά το γεγονός ότι τέτοιες προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό δικτύων και στην ανάλυση της κάλυψης [1–4], οι μελέτες που τις αξιοποιούν για τη συστηματική σύγκριση των φυσικών χαρακτηριστικών του καναλιού σε σχέση με τις απαιτήσεις των υπηρεσιών 5G, είναι σχετικά λίγες.

Εξετάζοντας τρεις βασικές υπηρεσίες του 5G (eMBB, URLLC και mMTC), η υπηρεσία URLLC παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα σχεδιασμού. Σε αντίθεση με τις υπηρεσίες eMBB και mMTC, η απόδοση της URLLC δεν περιορίζεται αποκλειστικά στον προϋπολογισμό ζεύξης (link budget), αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη χρονική διασπορά του καναλιού, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διασυμβολική παρεμβολή (Inter Symbol Interference – ISI) με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της αξιοπιστίας της. Παρόλο που οι προδιαγραφές του 3GPP ορίζουν συγκεκριμένες προδιαγραφές για τη διάρκεια του κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix – CP) [5-6], ο βαθμός στον οποίο οι πραγματικές παράμετροι του καναλιού ικανοποιούν αυτούς τους περιορισμούς, εξαρτάται κάθε φορά από συγκεκριμένα σενάρια υλοποίησης.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα μιας ντετερμινιστικής μελέτης ψηφιακού διδύμου στο αστικό περιβάλλον της πόλης της Τρίπολης, στα 750 MHz και 2100 MHz. Αξιοποιώντας γεωγραφικές βάσεις δεδομένων κτιρίων και εδάφους, εξάγουμε στοιχεία για την απώλεια διαδρομής (pathloss) και την χρονική διασπορά του ασύρματου καναλιού. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής υπηρεσίας (outage probability), σύμφωνα με τα πρότυπα του 3GPP.

2 Digital Twin και Μοντελοποίηση Περιβάλλοντος

2.1 Μεθοδολογία Digital Twin

Η ανάλυση βασίζεται σε μια μηχανή δημιουργίας ψηφιακού διδύμου που υπολογίζει τις φυσικές αλληλεπιδράσεις του ασύρματου καναλιού με την τρισδιάστατη δομή της πόλης. Η μηχανή προσομοιώνει τις ανακλάσεις από τις προσόψεις των κτιρίων και τις περιθλάσεις πάνω από τις στέγες, τις ακμές του εδάφους και της βλάστησης. Για κάθε σταθμό βάσης κατασκευάζεται ένα δέντρο ειδώλων (image tree) μέσω αναδρομικών κατόπτρων. Ο αλγόριθμος εξετάζει τις περιθλάσεις πάνω από τα κτίρια, πριν και μετά τις ανακλάσεις, ανιχνεύοντας τις υποψήφιες διαδρομές διάδοσης μέσω της αξιολόγησης των συνθηκών οπτικής επαφής (Line Of Sight), καθώς και την εξασθένηση λόγω διείσδυσης στη βλάστηση. Εφαρμόζοντας τη θεωρία της Γεωμετρικής Οπτικής (Geometrical Optics - GO) και της Ενιαίας Θεωρίας Περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction – UTD), υπολογίζονται οι παράμετροι του ηλεκτρικού πεδίου, ώστε να συντεθεί τελικά το προφίλ καθυστέρησης ισχύος (Power Delay Profile - PDP) για κάθε θέση χρήστη.

2.2 Μοντελοποίηση Περιβάλλοντος

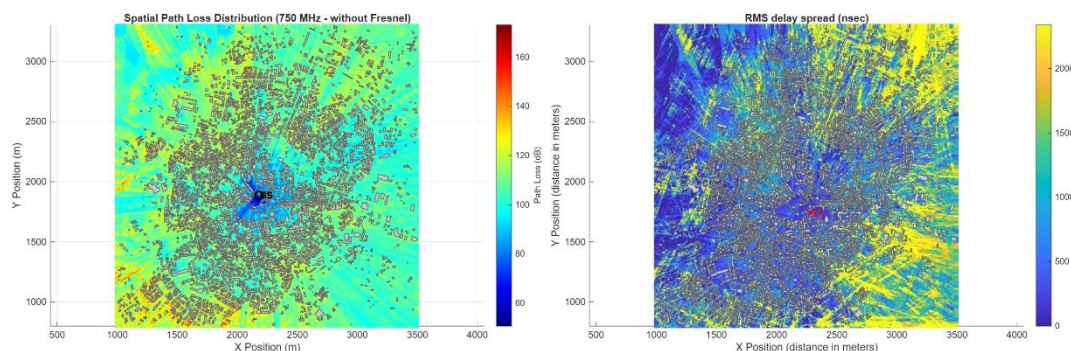
Το περιβάλλον προσομοίωσης βασίζεται σε γεωγραφικές βάσεις δεδομένων κτιρίων και εδάφους για περισσότερα από 53,000 κτίρια στην ευρύτερη περιοχή της Τρίπολης. Για την επεξεργασία τους και την οπτικοποίηση των δεδομένων της περιοχής ενδιαφέροντος, αναπτύχθηκε ένα εξειδικευμένο εργαλείο σε περιβάλλον MATLAB, με τη βοήθεια του οποίου αναπαρίστανται ψηφιακά τα κτίρια της περιοχής, καθώς και η ανύψωση του εδάφους. Το έδαφος διακριτοποιείται σε πλακίδια (tiles) διαστάσεων 10m x 10m και το υψόμετρο κάθε πλακιδίου προκύπτει με τη μέθοδο της παρεμβολής με αντίστροφη στάθμιση απόστασης (Inverse Distance Weight – IDW). Για τη βελτιστοποίηση της υπολογιστικής απόδοσης κατά των εντοπισμό των πλησιέστερων σημείων παρεμβολής, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος αναζήτησης πλησιέστερου γείτονα βασισμένος σε δομή K-d tree.

Η μελέτη επικεντρώνεται σε μια περιοχή 2.5 km x 2.5 km στην πόλη της Τρίπολης γύρω από ένα Σταθμό Βάσης (BS), ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ύψος 7m. Οι θέσεις των δεκτών βρίσκονται σε πλέγμα ανάλυσης 5m και σε ύψος 1m από το επίπεδο του δρόμου.

3 Οπτικοποίηση ασύρματης διάδοσης και πιθανότητα διακοπής υπηρεσίας

3.1 Οπτικοποίηση ασύρματης διάδοσης

Τα δεδομένα που προέκυψαν από την μοντελοποίηση του ψηφιακού διδύμου στην περιοχή ενδιαφέροντος, οπτικοποιήθηκαν με το εργαλείο MATLAB το οποίο αναφέρεται στην εργασία [7]. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν αφορούσαν στην συνολικά λαμβανόμενη ισχύ για κάθε σημείο του πλέγματος, στις απώλειες διαδρομής και στις συνθήκες διακοπής της υπηρεσίας για τις τρεις μελετώμενες υπηρεσίες του 5G, eMBB, mMTC και URLLC.



Εικόνα 1. Απώλειες διαδρομής και RMS διασπορά καθυστέρησης για τη συχνότητα 750 MHz στην πόλη της Τρίπολης.

Η ανάλυση των περιοχών διακοπής υπηρεσίας, έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές των αισθητήρων για eMBB, mMTC και URLLC [9-11]. Οι υπηρεσίες eMBB και mMTC χαρακτηρίζονται ως power limited, βασίζονται δηλαδή στον προϋπολογισμό ζεύξης (link budget), με αποτέλεσμα η λειτουργία τους να εξαρτάται μόνο από τη λαμβανόμενη ισχύ. Για την υπηρεσία υψηλής πιστότητας - χαμηλής καθυστέρησης, μελετώνται δύο σενάρια λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τόσο τις τιμές λαμβανόμενης ισχύος, όσο και την RMS διασπορά καθυστέρησης. Όταν υιοθετείται αισιόδοξο σενάριο λειτουργίας, υποθέτουμε ότι οι αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν με -140dBm τιμή λαμβανόμενης ισχύος και 2,340ns RMS διασπορά καθυστέρησης. Επίσης, υποθέτουμε πως ο τερματικός εξοπλισμός μπορεί να διαχειριστεί το φαινόμενο της πολλαπλής διαδρομής καθ' όλη τη διάρκεια του κυκλικού προθέματος. Στις συντηρητικές παραδοχές, υποθέτουμε πως ο εξοπλισμός στο τέλος της ζεύξης έχει τη δυνατότητα διαχείρισης του φαινομένου της πολλαπλής διαδρομής μόνο κατά το 25% της διάρκειας του κυκλικού προθέματος. Στην περίπτωση αυτή, η ανοχή στην RMS διασπορά καθυστέρησης μειώνεται σημαντικά, και οδηγούμαστε στο ιδιαίτερα μικρό παράθυρο ανοχής καθυστέρησης της τάξης των 292.5ns [8].

	eMBB	mMTC	URLLC (Optimistic)	URLLC (Conservative)
Limiting Factor	Power	Power	Power & Time Dispersion	Primarily Time Dispersion
Outage Threshold	130 dB	153 dB	140 dB & 2340 ns	140 dB & 292.5 ns
750 MHz Outage	0.86%	0.03%	15.06%	78.28%
2100 MHz Outage	6.24%	0.10%	15.74%	78.07%

Πίνακας Ι. Κριτήρια και ποσοστά διακοπής υπηρεσίας ανά συχνότητα για τις υπηρεσίες eMBB, mMTC και URLLC (Αισιόδοξο και Συντηρητικό Σενάριο) [8].

Όπως καταγράφεται στον Πίνακα I, οι υπηρεσίες eMBB και mMTC εμφανίζουν ιδιαίτερα χαμηλά ποσοστά πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και στις δύο μελετώμενες συχνότητες. Για την υπηρεσία URLLC, τα δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση ψηφιακού διδύμου, δείχνουν ότι υπάρχει περίπου 15% πιθανότητα διακοπής υπό αισιόδοξες συνθήκες λειτουργίας, ενώ για την περίπτωση της υιοθέτησης πιο αυστηρών παραδοχών, που αφορούν κυρίως στην RMS εξάπλωση καθυστέρησης, η πιθανότητα διακοπής της υπηρεσίας αυξάνεται σημαντικά, περίπου στο 78%.

4 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σπουδαιότητα της ανάπτυξης ντετερμινιστικών μοντέλων ψηφιακού διδύμου για τη μελέτη της πιθανότητας διακοπής υπηρεσιών 5G λαμβάνοντας υπόψη την αστική γεωμετρία και τη μορφολογία του εδάφους μίας συγκεκριμένης περιοχής ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την πόλη της Τρίπολης καταδεικνύουν ότι η απώλεια διαδρομής οφείλεται κυρίως στην επιλογή της συχνότητας, ενώ η RMS διασπορά καθυστέρησης καθορίζεται κυρίως από την αστική γεωμετρία. Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για τις υπηρεσίες eMBB και mMTC καθορίζεται κυρίως από τη λαμβανόμενη ισχύ, με τη ζώνη των 750 MHz να προσφέρει τη χαμηλότερη πιθανότητα διακοπής. Στην περίπτωση της υπηρεσίας URLLC, η συνδυαστική ανάλυση ισχύος-καθυστέρησης δείχνει ότι η διασπορά καθυστέρησης αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα για την πιθανότητα διακοπής της. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα διακοπής υπερβαίνει το 78% υπό συντηρητικές παραδοχές, ενώ περιορίζεται περίπου στο 15% υπό αισιόδοξες συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι, η απόδοση της URLLC είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στη χρονική διασπορά του καναλιού, ενώ το πλεονέκτημα της ευρύτερης κάλυψης που δίνουν οι χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων παραμένει ισχυρό και διασφαλίζει τη λειτουργία των υπηρεσιών eMBB και mMTC.

5 Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση – NextGenerationEU μέσω του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0», στο πλαίσιο του προγράμματος «SUB 1.1 – Συμπλέγματα Ερευνητικής Αριστείας (Clusters of Research Excellence – CREs)», έργο: «Ενσωμάτωση Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών και Δικτύων Αισθητήρων για την Ενίσχυση της Δημόσιας Ασφάλειας και των Υποδομών Έξυπνων Πόλεων», Αριθμός Χρηματοδότησης: ΥΠ3ΤΑ-0560607.

6 Αναφορές

- [1] T. E. Athanaiilas *et al.*, “Parallel radio-wave propagation modelling with image-based ray tracing techniques,” *Parallel Computing*, vol. 36, no. 12, pp. 679–695, 2010.
- [2] G. Athanasiadou, “Incorporating the Fresnel zone theory in ray tracing for propagation modelling of fixed wireless access channels,” in *Proc. IEEE PIMRC*, Athens, Greece, Sept. 3–7, 2007.
- [3] G. E. Athanasiadou *et al.*, “Deterministic propagation modelling and measurements for the broadband fixed wireless access channel,” in *Proc. IEEE VTC-Fall*, Los Angeles, CA, USA, Sept. 26–29, 2004.
- [4] G. E. Athanasiadou *et al.*, “A microcellular ray-tracing propagation model and evaluation of its narrowband and wideband predictions,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 322–335, Mar. 2000.
- [5] 3GPP, “NR; Physical channels and modulation,” 3GPP TS 38.211, v16.0.0, Jul. 2020.
- [6] P. Popovski *et al.*, “Wireless access for ultra-reliable low-latency communication: Principles and building blocks,” *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 2, pp. 16–23, Mar./Apr. 2018.
- [7] S. Moukidou and G. Athanasiadou, “Study of the wireless radiochannel with base stations on UAVs,” *Pelopas - Interdisciplinary Journal of the University of the Peloponnese*, vol. 8, no. 1, pp. 7–30, 2024.
- [8] S. Moukidou, G. Athanasiadou, and G. Tsoulos, “Service-Level Implications of Site-Specific Urban Pathloss and Delay Spread in 5G Networks,” in *Proc. 8th Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)*, Patras, Greece, Apr. 23–24, 2026.
- [9] 3GPP, “Study on scenarios and requirements for next generation access technologies,” 3GPP TR 38.913, v16.0.0, Jul. 2020.
- [10] 3GPP, “Study on evaluation methodology of new vehicle-to-everything (V2X) use cases for LTE and NR,” 3GPP TR 38.885, v16.0.0, Jun. 2019.
- [11] 3GPP, “NB-IoT; Technical report on radio transmission and reception,” 3GPP TR 45.820, v16.0.0, Jul. 2020.

5G Network Slicing: Η Επανάσταση της Δυναμικής Εναλλαγής Slices

Ιωάννης Νίκας, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τρίπολη — dit23148@go.uop.gr
3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει το 5G Network Slicing, εστιάζοντας στην καινοτόμο δυνατότητα της Δυναμικής Εναλλαγής Slices (Dynamic Slice Shifting), η οποία επιτρέπει τη διαρκή και απρόσκοπτη αναπροσαρμογή των εικονικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών, ανεξάρτητων εικονικών δικτύων πάνω στην ίδια φυσική υποδομή, αφήνοντας οριστικά στο παρελθόν το ανεπαρκές μοντέλο “one-size-fits-all”. Μέσω αυτής, το δίκτυο προσαρμόζεται για να εξυπηρετεί ετερογενείς απαιτήσεις υπηρεσιών (eMBB :enhanced Mobile Broadband, URLLC :Ultra-reliable and Low Latency Communications, mMTC :massive Machine Type Communications). Αναλύεται η αρχιτεκτονική 5G, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Radio Access Network (RAN) και του Core Network (CN), η ανοιχτή προσέγγιση του O-RAN (Open-RAN) και η διαχείριση του κύκλου ζωής (Lifecycle Management). Αναδεικνύεται πώς η νέα αυτή δυναμική ευελιξία μετασχηματίζει τις τηλεπικοινωνίες στο μοντέλο «Δικτύου ως Υπηρεσία» (NaaS).

1. Εισαγωγή

Τα κινητά δίκτυα 5G καλούνται να υποστηρίξουν τεράστια ποικιλία υπηρεσιών, απαιτήσεων και αριθμό συσκευών [3]. Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική “one-size-fits-all” δεν επαρκεί πλέον. Με το network slicing δημιουργούνται πολλαπλά, ανεξάρτητα και εξειδικευμένα λογικά δίκτυα πάνω στην ίδια υποδομή, καθένα προσαρμοσμένο σε διαφορετικές απαιτήσεις καθυστέρησης, αξιοπιστίας, απόδοσης και κινητικότητας [1]. Μέσα σε ένα slice, οι λειτουργίες και τα στοιχεία του δικτύου υλοποιούνται σύμφωνα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εκάστοτε υπηρεσίας.

2. Αρχιτεκτονική 5G και Υπηρεσίες

- **Infrastructure layer:** Αναφέρεται στη φυσική υποδομή δικτύου που εκτείνεται τόσο στο RAN όσο και στο CN. Περιλαμβάνει την ανάπτυξη, τον έλεγχο και τη διαχείριση της υποδομής, την κατανομή πόρων στα slices και τον τρόπο με τον οποίο οι πόροι εκτίθενται προς τα ανώτερα επίπεδα [1].
- **Network Function layer:** Ενσωματώνει όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με τη διαμόρφωση και τον κύκλο ζωής (life-cycle management) των network functions που συνθέτουν μια end-to-end υπηρεσία [4].
- **Service layer & Management and Orchestration (MANO):** Το διακριτικό στοιχείο του 5G slicing είναι η end-to-end φύση του και η ανάγκη μια υπηρεσία να εκφράζεται μέσω high-level περιγραφής, και να αντιστοιχίζεται εύελικτα στα κατάλληλα infrastructural elements και network functions. Για τον σκοπό αυτό απαιτείται service layer και Network Slice Orchestration [1].

Κατηγορίες Υπηρεσιών (Use Cases)

- **enhanced Mobile Broadband (eMBB):** Παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων και ενισχυμένης συνδεσιμότητας για περιπτώσεις χρήσης που δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην καθυστέρηση.
- **Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC):** Υπηρεσίες υψηλής αξιοπιστίας με χαμηλή καθυστέρηση.
- **massive Machine Type Communications (mMTC):** Συνδεσιμότητα σε μεγάλο αριθμό συσκευών που στέλνουν/λαμβάνουν μικρές ποσότητες δεδομένων σπάνια, συνήθως με χαμηλό εύρος ζώνης.
- **Vehicle-to-Everything (V2X):** Υψηλοί ρυθμοί δεδομένων, μειωμένη καθυστέρηση και αξιόπιστη end-to-end αρχιτεκτονική για επικοινωνίες οχημάτων.

- **High-Performance Machine Type Communications (HMTc):** Χαμηλή καθυστέρηση, υψηλή αξιοπιστία και ταχύτητα για τοπικά συγκεντρωμένες εφαρμογές με χαμηλή κινητικότητα.

Το 3GPP χρησιμοποίησε αυτά τα use cases για τον ορισμό των τυποποιημένων network slices, ενώ επιτρέπει και μη τυποποιημένα slices, παρέχοντας ευελιξία σε παρόχους και πελάτες [3].

3. 5G Network Slicing

Σύμφωνα με το 3rd Generation Partnership Project (3GPP), ένα network slice είναι ένα λογικό δίκτυο που παρέχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και δυνατότητες δικτύου για την υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών [4].

3.1 RAN Slicing

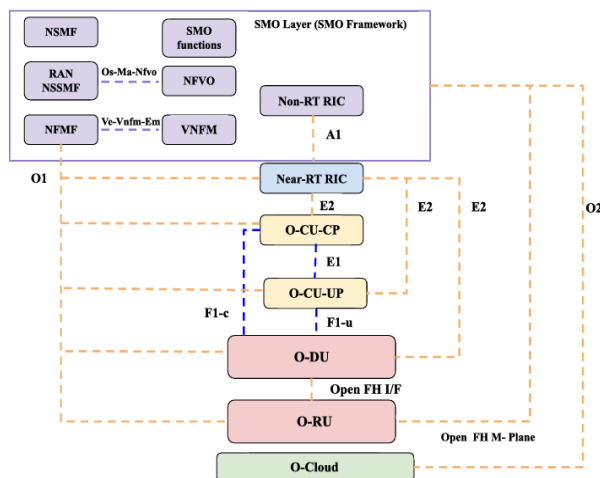
Το RAN συνδέει το User Equipment (UE) με το Core Network μέσω του backhaul link, χρησιμοποιώντας Radio Access Technology (RAT). Το RAN εκτελεί την επιλογή του network slice που σχετίζεται με το ραδιοσήμα και εφαρμόζει κατάλληλη διαμόρφωση για τη διαχείριση της κίνησης ανά slice. Το RAN virtualization επιτρέπει ορισμένες RAN functions να εκτελούνται σε απομακρυσμένο διακομιστή, ενώ το Software-Defined RAN (SD-RAN) αφαιρεί τους RAN πόρους και παρέχει APIs για διαχείριση και έλεγχο των πόρων που έχουν διατεθεί σε κάθε slice [1].

3.2 Core Network Slicing

Καλύπτει την ανάγκη για ευέλικτο και κλιμακούμενο κεντρικό δίκτυο. Οι κύριες Network Functions (NFs) είναι [4]:

- **Access and Mobility management Function (AMF):** Παροχή πρόσβασης στο δίκτυο και διαχείριση subscriber mobility.
- **Session Management Function (SMF):** Διαχείριση συνεδριών μέσω εντολών PDU session modification στην UPF.
- **User Plane Function (UPF):** Packet routing & forwarding και διασφάλιση QoS βάσει εντολών της SMF.
- **Unified Data Management (UDM):** Αποθήκευση πληροφοριών συνδρομητών και user network profiles.
- **Policy Control Function (PCF):** Επιβολή πολιτικών δικτύου και QoS με δυναμικές αποφάσεις βάσει συνθηκών δικτύου και προφίλ χρήστη.

Για την επιλογή του κατάλληλου slice (Slice Selection) χρησιμοποιείται το Single-Network Slice Selection Assistance Information (S-NSSAI), το οποίο αποτελείται από το Slice/Service Type (SST) ID και ένα προαιρετικό Slice Differentiator (SD). Το SST αναγνωρίζει τις αναμενόμενες υπηρεσίες ενός slice, ενώ το SD διαφοροποιεί πολλαπλές περιπτώσεις του ίδιου τύπου slice [4].



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική O-RAN — SMO framework, Non-RT/Near-RT RICs και O-CU, O-DU, O-RU [2].

3.3 O-RAN

Το O-RAN ALLIANCE διαχωρίζει το RAN στις παρακάτω λειτουργικές μονάδες [2]:

- **O-RAN Central Unit (O-CU):** Εκτελεί τα ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων της ραδιοδιεπαφής.
- **O-RAN Distributed Unit (O-DU):** Εκτελεί τα χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων· υπεύθυνη για slice-specific resource allocation και slice-specific performance metrics.
- **O-RAN Radio Unit (O-RU):** Φυσικός τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός (κεραία) που αναλαμβάνει την εκπομπή και λήψη των ραδιοκυμάτων.

Επιπλέον, εισάγει έξυπνους ελεγκτές (RAN Intelligent Controllers: RICs) [2]:

- **Non-Real-Time RAN Intelligent Controller (Non-RT RIC):** Συγκεντρώνει RAN slice data σε μεγάλη χρονική κλίμακα μέσω του Service Management and Orchestration (SMO) framework και αξιοποιεί machine-learning μοντέλα· συνεργάζεται με τον Near-RT RIC για καινοτόμες RAN slicing λύσεις.
- **Near-Real-Time RAN Intelligent Controller (Near-RT RIC):** Εκτελεί xApps σχετικά με slicing και επικοινωνεί τις απαραίτητες παραμέτρους σε O-CU/O-DU μέσω της διεπαφής E2, Εικόνα 1.

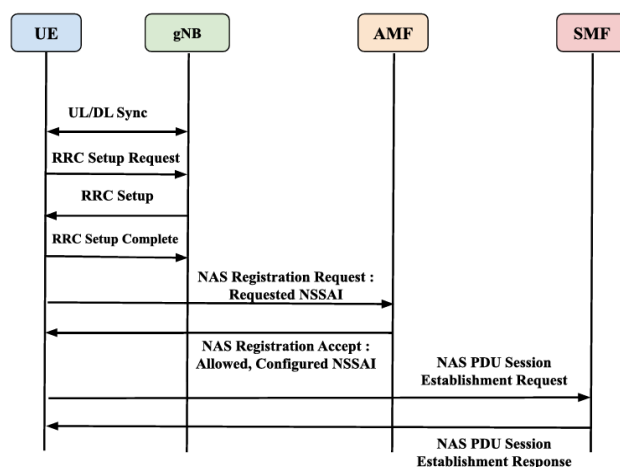
3.4 Ενорχήστρωση του Network Slicing

- **End-to-end Service Management & Orchestrator:** Δέχεται τα αιτήματα slice από τρίτους και δημιουργεί/ελέγχει το αντίστοιχο slice.
- **Virtual Resource Orchestration:** Ενσωμάτωση των Virtual Network Functions (VNFs), σύνθεση του γράφου ψηφιακών υπηρεσιών και διεκπεραίωση των διαδικασιών MANO.
- **Network Resource Programmable Controller:** Διαχωρίζει control από data plane, διευκολύνοντας τις διεργασίες VNF και τον έλεγχο του QoE.
- **Life-cycle Management:** Ασχολείται με το legacy management των slices [4].

3.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά (3GPP Rel. 15)

Subscription. Όταν ο χρήστης εγγράφεται σε ένα Public Land Mobile Network (PLMN)

και επιδιώκει πρόσβαση σε slice, το RAN λαμβάνει Radio Resource Control (RRC) signaling με το αιτούμενο Network Slice Selection Assistance Information (NSSAI) και επιλέγει κατάλληλη AMF. Η AMF ζητά από την UDM τη συνδρομή του UE· οι πληροφορίες περιέχουν ένα ή περισσότερα εγγεγραμμένα S-NSSAIs, με τουλάχιστον ένα default [4].



Εικόνα 2: Ροή σηματοδότησης RRC/NAS μεταξύ UE, gNB, AMF και SMF κατά την εγγραφή σε slice και την εγκατάσταση PDU session [4].

Configuration. Οι πληροφορίες διαμόρφωσης ενός slice περιέχουν ένα ή περισσότερα διαμορφωμένα NSSAIs, που ορίζονται είτε από το serving PLMN είτε από το Home Public Land Mobile Network

(HPLMN). Η διαμόρφωση του HPLMN ονομάζεται default configured NSSAI. Το UE χρησιμοποιεί το default configured NSSAI μόνο όταν δεν διαθέτει έγκυρα NSSAIs για το serving PLMN. Ένα PLMN configured NSSAI μπορεί να είναι standard ή PLMN-specific.

Update of Configuration. Μετά την αρχική διαδικασία εγγραφής, η AMF μπορεί να εκχωρήσει ένα UE νέο διαμορφωμένο NSSAI στο UE για το serving PLMN. Η NSSF ή η AMF είναι οι NFs που μπορούν να καθορίσουν τη διαμόρφωση NSSAI και τις σχετικές πληροφορίες αντιστοίχισης του UE. Το UE διαγράφει τοπικά όλες τις πληροφορίες network slicing που σχετίζονται με το PLMN, εάν η AMF επικοινωνήσει με το UE ότι η συνδρομή Network Slice Subscription (NS) έχει αλλάξει. Επιπλέον, το UE ενημερώνει τις τρέχουσες πληροφορίες διαμόρφωσης network slicing του PLMN με βάση τις νέες πληροφορίες και τιμές που λαμβάνει από την AMF.

Operation. Η συνδεσιμότητα στο User Plane μέσω ενός slice instance δημιουργείται σε βήματα: επιλογή serving AMF, δημιουργία PDU session με το απαιτούμενο Data Network (DN). Κατά τη registration procedure, το UE δίνει το αιτούμενο NSSAI στο next Generation NodeB (gNB) και στο core μέσω Access Stratum (AS)/ Non-Access Stratum (NAS) signaling. Το RAN δρομολογεί τα NAS μηνύματα σε AMF επιλεγμένη βάσει του NSSAI, και ακολουθεί SMF discovery & selection. Η επιλεγμένη SMF δημιουργεί την PDU session για το slice instance βάσει S-NSSAI και Data Network Name (DNN), Εικόνα 2.

Modification. Η "Δυναμική Εναλλαγή Slices" αποτελεί μια λειτουργία όπου το σύνολο των network slices ενός UE μπορεί να μεταβληθεί οποιαδήποτε στιγμή κατά την παραμονή του σε ένα PLMN. Είτε η πρωτοβουλία ανήκει στο δίκτυο είτε στο ίδιο το UE, το σύστημα παρέχει άμεσα τα νέα δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων των νέων πληροφοριών χαρτογράφησης προς το HPLMN, των configured NSSAIs του PLMN και των allowed NSSAIs για πολλαπλούς τύπους πρόσβασης. Η διαδικασία είναι σχεδιασμένη για μέγιστη αποδοτικότητα: εάν η εναλλαγή απαιτεί μετακίνηση σε νέα serving AMF, η παλιά AMF δίνει εντολή στο UE για επανεγγραφή και ελευθερώνει τη NAS σύνδεση, περνώντας το UE σε idle state. Το UE στη συνέχεια διαγράφει τα προγενέστερα δεδομένα και συνδέεται δυναμικά στη νέα AMF μεταδίδοντας το αιτούμενο NSSAI. Αυτή η τεχνολογία ξεχωρίζει στις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, όπου η μετάβαση «αναστέλλεται» έξυπνα —η AMF δεν απελευθερώνει τη σύνδεση NAS μέχρι να ολοκληρωθεί πλήρως η κρίσιμη PDU session, εγγυώμενη παροχή ασφάλειας. Επιπλέον, το σύστημα προσφέρει αυτοματοποίηση: εάν ενεργοποιηθεί η διαδικασία network slice replacement, η AMF αναλαμβάνει αυτόματα τις αλλαγές. Διαφορετικά, εάν το δίκτυο δεν βρίσκεται πλέον στην τρέχουσα AMF, το UE αναλαμβάνει προληπτικά να ενημερώσει την SMF για την απελευθέρωση των παλιών PDU sessions, διασφαλίζοντας την απελευθέρωση των πόρων. [4].

4. Επίλογος

Το Network Slicing αποτελεί βάση της αρχιτεκτονικής 5G, επιτρέποντας τη μετάβαση από δίκτυα γενικής χρήσης σε ένα ευέλικτο μοντέλο «Δικτύου ως Υπηρεσία» (NaaS). Μέσω του δυναμικού κύκλου ζωής των slices και των διαδικασιών ελέγχου από AMF και SMF, το δίκτυο προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις ανάγκες του χρήστη. Η εξέλιξη των προτύπων 3GPP διασφαλίζει ότι το slicing μπορεί να υποστηρίξει από απλές ευρυζωνικές υπηρεσίες έως βιομηχανικές εφαρμογές και αυτόνομα οχήματα, θέτοντας τις βάσεις για το ψηφιακό μέλλον των τηλεπικοινωνιών.

Χρησιμοποιήθηκε εργαλείο Τεχνητής Νοημοσύνης για τη γλωσσική επιμέλεια της εργασίας.

Αναφορές

- [1] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, M. K. Marina, "Network Slicing in 5G: Survey and Challenges," IEEE Communications Magazine, May 2017.
- [2] K. Alam et al., "A Comprehensive Tutorial and Survey of O-RAN: Exploring Slicing-Aware Architecture, Deployment Options, Use Cases, and Challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 28, 2026.
- [3] M. Shafi et al., "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," IEEE JSAC, vol. 35, no. 6, 2017.
- [4] R. V. Chintalapati, N. Tripathi, J. Reed, "Following the Journey of Network Slicing in 5G and 5G Advanced," IEEE Access, vol. 13, 2025.

Τεχνολογία Massive MIMO στα δίκτυα 5G

Βασίλειος Βήχας-Φάσος, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο
Πελοποννήσου, Τρίπολη, dit23139@go.uop.gr

3 Ιουνίου 2026

Επιβλέπων Καθηγητής: Γ. Τσούλος

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει την τεχνολογία Massive MIMO ως τον κεντρικό πυλώνα των δικτύων 5G. Τα δίκτυα 5G καλούνται να ικανοποιήσουν πολλαπλές απαιτήσεις, στοχεύοντας σε ρυθμούς δεδομένων έως 20 Gbps, καθυστέρηση της τάξης του 1 ms και ταυτόχρονη συνδεσιμότητα 1.000.000 συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Η τεχνολογία Massive MIMO, αξιοποιώντας δεκάδες στοιχεία κεραίας, επιτρέπει τη δραματική βελτίωση της απόδοσης και της χωρητικότητας χωρίς την ανάγκη αύξησης του φάσματος. Αναλύεται η αναγκαία μετάβαση σε νέες αρχιτεκτονικές ελέγχου, όπως το C-RAN και το O-RAN, για τη διαχείριση της αυξημένης πολυπλοκότητας. Παρουσιάζεται ο μηχανισμός της μορφοποίησης δέσμης (beamforming) και η λειτουργία TDD, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μαθηματικές ιδιότητες που προκύπτουν από τον μεγάλο αριθμό κεραιών, όπως η σκλήρυνση καναλιού (Channel Hardening) και η ευνοϊκή διάδοση (Favorable Propagation). Τέλος, αναλύεται το πώς η τεχνολογία αυτή καταφέρνει να συνδυάσει την υψηλή φασματική απόδοση με τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά (έως 6): 5G, Massive MIMO, C-RAN, O-RAN, Beamforming,

1 Εισαγωγή στο 5G και οι προκλήσεις του φάσματος

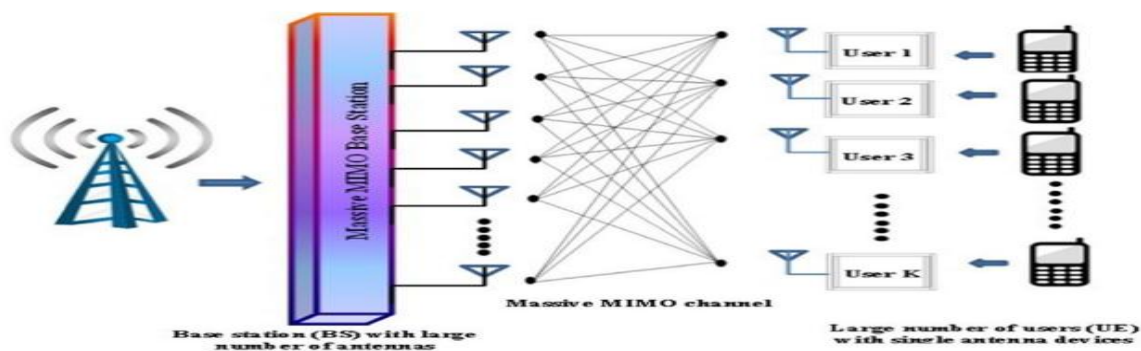
Τα δίκτυα 5G σχεδιάστηκαν για να υποστηρίξουν τρεις βασικούς πυλώνες υπηρεσιών: eMBB (enhanced Mobile Broadband) για υψηλές ταχύτητες, URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication) για κρίσιμες εφαρμογές με χαμηλή καθυστέρηση και mMTC (massive Machine Type Communications) για τη μαζική συνδεσιμότητα συσκευών [1]. Για την επίτευξη των κορυφαίων ρυθμών δεδομένων, χρησιμοποιούνται ζώνες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mm-waves) οι οποίες παρέχουν το απαραίτητο μεγάλο εύρος ζώνης [6]. Ωστόσο, η χρήση τους συνοδεύεται από ραγδαία εξασθένηση σήματος (high path loss) και αδυναμία επαρκούς κάλυψης από εξωτερικούς σε εσωτερικούς χώρους. Η αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού επιβάλλει τη λειτουργία σε συχνότητες κάτω των 6 GHz σε συνδυασμό με την τεχνολογία Massive MIMO, η οποία σχεδιάστηκε για να ελαχιστοποιεί τις απώλειες διάδοσης και να αυξάνει κατακόρυφα τη χωρητικότητα [6].

2 Η λύση του Massive MIMO και η νέα αρχιτεκτονική

Το MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) είναι τεχνική ασύρματης επικοινωνίας στην οποία χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Σε αντίθεση με ένα απλό SISO (Single-Input Single-Output) σύστημα, το MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) αξιοποιεί τη χωρική διάσταση του καναλιού χρησιμοποιώντας N_t κεραίες εκπομπής και N_r κεραίες λήψης. Σε πραγματικά ασύρματα περιβάλλοντα, το σήμα δεν φτάνει στον δέκτη μόνο από μία διαδρομή, ανακλάται, σκεδάζεται και περιθλάται από αντικείμενα όπως τοίχους, κτίρια, έδαφος και ανθρώπους. Αυτό δημιουργεί πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation). Ενώ στα συμβατικά συστήματα αυτό προκαλεί fading και παρεμβολές, το MIMO το αξιοποιεί θετικά, δημιουργώντας διαφορετικές χωρικές διαδρομές μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης.

Όταν το κανάλι διαθέτει επαρκώς ανεξάρτητες χωρικές διαδρομές, εφαρμόζεται η τεχνική της χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing). Ο δέκτης διαχωρίζει τις ροές δεδομένων, με τον μέγιστο αριθμό ανεξάρτητων χωρικών ροών να ισούται με $N_s \leq \min(N_t, N_r)$. Αυτό αυξάνει κατακόρυφα το throughput (ρυθμό μετάδοσης) χωρίς να απαιτείται επιπλέον εύρος ζώνης φάσματος [4].

Η επικοινωνία στα συστήματα Massive MIMO αφορά αρχιτεκτονικές πολλαπλών χρηστών (Multi-User MIMO). Το Massive MIMO αποτελεί την τεχνολογική απάντηση στις αυξημένες απαιτήσεις του 5G. Αξιοποιεί έναν υπερβολικά μεγάλο αριθμό στοιχείων κεραίας (συνήα 64 ή περισσότερες) στον σταθμό βάσης. Μέσω της τεχνικής της Χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing), το σύστημα μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλαπλούς χρήστες στον ίδιο χρόνο και συχνότητα [4], [6] κάτι που αποτυπώνεται ξεκάθαρα και στην Εικόνα 1. Παράλληλα, η κλιμάκωση σε Massive MIMO (δεκάδες ή εκατοντάδες κεραίες) εισάγει προκλήσεις, όπως η αμοιβαία σύζευξη (mutual coupling) και η απαίτηση για αποκλειστική αλυσίδα ραδιοσυχνοτήτων (RF chain) ανά στοιχείο [4].



Εικόνα 1. Βασική αρχιτεκτονική Massive MIMO [4]

Για τη διαχείριση της αυξημένης υπολογιστικής πολυπλοκότητας (π.χ. σε τεχνικές Zero Forcing), το 5G υιοθετεί νέες αρχιτεκτονικές ελέγχου δικτύου ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network - RAN):

- **C-RAN (Cloud RAN):** Μεταφέρει την υπολογιστική ευφυΐα στο cloud [2]. Η κεραία λειτουργεί παθητικά, συμπιέζοντας και προωθώντας τα σήματα (Compress-and-Forward) στον κεντρικό επεξεργαστή, εγείροντας ωστόσο προκλήσεις διαχείρισης του θορύβου κβαντισμού [2].
- **O-RAN (Open RAN):** Αποτελεί την εξέλιξη που προσφέρει πλήρη ευελιξία. Ο σταθμός βάσης διαχωρίζεται σε τρία διακριτά μέρη: RU (στην κεραία), DU και CU. Μέσω του RAN Intelligent Controller (RIC), το δίκτυο αποκτά τη δυνατότητα να αυτο-ρυθμίζεται και να βελτιστοποιείται σε πραγματικό χρόνο.[3]

3 Μηχανισμός Beamforming και λειτουργία TDD

Η τεχνολογία Beamforming σταθμίζει τα σήματα στις κεραίες εκπομπής κατάλληλα ως προς το πλάτος και τη φάση, ώστε το σήμα να εστιάζεται προς επιθυμητές κατευθύνσεις και να μειώνεται προς τις ανεπιθύμητες [5]. Αν μεταδίδεται ένα σύμβολο s , το διάνυσμα εκπομπής γράφεται ως $\mathbf{x} = \mathbf{w}s$ όπου $\mathbf{w}$ είναι το διάνυσμα προκωδικοποίησης (precoding vector). Για ένα σύστημα MISO (πολλαπλές εκπομπές, μία λήψη), μία συχνή επιλογή είναι η μετάδοση μέγιστης απολαβής (Maximum Ratio Transmission - MRT), όπου $\mathbf{w} = \frac{\mathbf{h}}{\|\mathbf{h}\|}$. Αυτό ευθυγραμμίζει το μεταδιδόμενο σήμα με το κανάλι, μεγιστοποιώντας τον λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio - SNR) υπό συγκεκριμένους περιορισμούς ισχύος.

Η λειτουργία του Beamforming όσο αφορά το Massive MIMO βασίζεται στο Time Division Duplex (TDD) και στην αμοιβαιότητα του καναλιού (channel reciprocity) [6]. Αρχικά, οι χρήστες εκπέμπουν πιλοτικά σήματα (pilots). Ο σταθμός βάσης λαμβάνει τα σήματα και εξάγει ακριβείς εκτιμήσεις (Channel Estimation) για την κατάσταση του καναλιού. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ψηφιακή προκωδικοποίηση (precoding) και το σύστημα εκπέμπει την πληροφορία στοχευμένα στον χρήστη (downlink) [6].

4 Μαθηματική μοντελοποίηση και χωρητικότητα MIMO

Το βασικό μοντέλο ενός στενόςζωνου, επίπεδου MIMO καναλιού εκφράζεται ως: $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$ όπου $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ το διάνυσμα εκπομπής, $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ το διάνυσμα λήψης, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ ο πίνακας καναλιού και $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ το διάνυσμα μιγαδικού θορύβου Gauss $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I})$. Το στοιχείο h_{ij} του πίνακα $\mathbf{H}$ εκφράζει τον μιγαδικό συντελεστή καναλιού από την j -οστή κεραία εκπομπής προς την i -οστή κεραία λήψης. Περιλαμβάνει φαινόμενα όπως εξασθένηση, μεταβολή φάσης, πολυδιαδρομική διάδοση και fading. Υπό την υπόθεση ότι ο δέκτης γνωρίζει το κανάλι και η ισχύς κατανέμεται ισότιμα, η χωρητικότητα του MIMO καναλιού δίνεται από:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR}) \text{ bits/s/Hz} \quad (1)$$

Για MIMO κανάλι, υπό την υπόθεση ότι ο δέκτης γνωρίζει το κανάλι και ότι η ισχύς κατανέμεται ισότιμα στις κεραίες εκπομπής, η χωρητικότητα δίνεται από:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \text{ bits/s/Hz} \quad (2)$$

Αν χρησιμοποιηθεί παραγοντοποίηση ιδιαζουσών τιμών (Singular Value Decomposition - SVD), η χωρητικότητα μπορεί να γραφτεί ως:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_t} \sigma_i^2 \right) \quad (3)$$

Επεξήγηση Μαθηματικών Συμβολισμών: Στις παραπάνω μαθηματικές σχέσεις, το $\det$ αναπαριστά την ορίζουσα του πίνακα, το $\mathbf{I}_{N_r}$ συμβολίζει τον μοναδιαίο πίνακα διάστασης r , το $r = \text{rank}(\mathbf{H})$ είναι ο βαθμός του πίνακα $\mathbf{H}$ και σ_i^2 είναι οι ιδιάζουσες τιμές (singular values) του καναλιού, ενώ ο εκθέτης $\mathbf{H}^H$ δηλώνει τον συζυγή ανάστροφο του πίνακα.

Η αποτελεσματικότητα του Massive MIMO πηγάζει από μαθηματικές ιδιότητες που εμφανίζονται όταν ο αριθμός των κεραίων $\mathbf{M}$ γίνεται πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των χρηστών $\mathbf{K}$ [6]:

- **Array Gain:** Το κέρδος που προκύπτει από την εστίαση της ενέργειας, επιτρέπει τη μείωση της ισχύος εκπομπής κάθε κεραίας χωρίς απώλεια ποιότητας:

$$\text{Array Gain (dB)} = 10 \log_{10}(\mathbf{M}) \quad (4)$$

- **Favorable Propagation (Ευνοϊκή διάδοση):** Καθώς το M αυξάνεται, τα πολυδιάστατα κανάλια των χρηστών τείνουν να γίνουν ορθογώνια μεταξύ τους. Μαθηματικά, το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων τους τείνει στο μηδέν, επιτρέποντας τον πλήρη χωρικό διαχωρισμό τους.

$$\frac{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{h}_2|}{\|\mathbf{h}_1\| \cdot \|\mathbf{h}_2\|} \rightarrow 0 \quad (5)$$

- **Channel Hardening (Σκλήρυνση καναλιού):** Οι τυχαίες διακυμάνσεις του καναλιού λόγω διαλείψεων (fading) μειώνονται δραστικά. Το κανάλι συμπεριφέρεται σχεδόν ντετερμινιστικά

$\|h\|^2 \approx E\{\|\mathbf{h}\|^2\}$ εξαλείφοντας την ανάγκη για πολύπλοκο προγραμματισμό μεταδόσεων (scheduling).

5 Ενεργειακή και Φασματική Απόδοση (EE vs. SE)

Στα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, η αύξηση της Φασματικής Απόδοσης (Spectral Efficiency) βάσει του θεωρήματος Shannon ($\log_2(1 + \text{SNR})$) απαιτεί εκθετική αύξηση της ισχύος εκπομπής, κατακρημνίζοντας έτσι την Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency). Το Massive MIMO αποτελεί τη μοναδική τεχνολογία που ανατρέπει αυτόν τον συμβιβασμό (trade-off). Η Ενεργειακή Απόδοση (EE) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ρυθμοαπόδοσης R προς τη συνολική καταναλισκόμενη ισχύ.

$$EE = \frac{R}{P_{TX} + P_{CP}} \quad (6)$$

Λόγω του Array Gain, η ακτινοβολούμενη ισχύς εκπομπής P_{tx} μπορεί να μειωθεί ανάλογα με το $1/M$. Παρόλο που η ισχύς που καταναλώνουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα P_{cp} αυξάνεται γραμμικά με την προσθήκη νέων κεραιών, η δραστική βελτίωση του λόγου Σήματος προς Παρεμβολή και Θόρυβο (SINR) και η ικανότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης χρηστών (Spatial Multiplexing), οδηγούν τελικά στην ταυτόχρονη μεγιστοποίηση τόσο της φασματικής όσο και της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου.

6 Επίλογος

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τον καθοριστικό ρόλο της τεχνολογίας Massive MIMO στην υλοποίηση των φιλόδοξων στόχων των δικτύων 5G. Από την ανάλυση κατέστη σαφές ότι το Massive MIMO δεν αποτελεί απλή επέκταση των υφιστάμενων τεχνικών, αλλά θεμελιώδη αλλαγή προσέγγισης στην ασύρματη επικοινωνία. Το συνδυαστικό αποτέλεσμα του Channel Hardening, της Favorable Propagation και του Array Gain επιτρέπει την εξυπηρέτηση δεκάδων χρηστών ταυτόχρονα με ελάχιστες παρεμβολές, μειώνοντας παράλληλα δραστικά την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής. Η ενσωμάτωση προηγμένων αρχιτεκτονικών όπως το O-RAN ανοίγει τον δρόμο για ευφυή, αυτο-ρυθμιζόμενα δίκτυα ικανά να ανταποκρίνονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες κίνησης. Ωστόσο, η ευρεία υλοποίηση του Massive MIMO εξακολουθεί να αντιμετωπίζει ανοιχτές προκλήσεις, όπως η αντιμετώπιση του pilot contamination, η αποτελεσματική διαχείριση της αμοιβαίας σύζευξης κεραιών και η ανάπτυξη αλγορίθμων προκωδικοποίησης χαμηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Μελλοντικές κατευθύνσεις περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής μάθησης για βελτιστοποίηση εκτίμησης καναλιού, καθώς και την εξερεύνηση υβριδικής προκωδικοποίησης για συστήματα mmWave Massive MIMO στα δίκτυα 5G-Advanced και 6G.

Αναφορές

- [1] M. Shafi *et al.*, "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," *IEEE JSAC*, vol. 35, no. 6, 2017.
- [2] Murtadha Hassan Naji *et al.*, "A survey comprehensive study of 5G architecture," 2023.
- [3] K. Alam *et al.*, "A Comprehensive Tutorial and Survey of O-RAN: Exploring Slicing-Aware Architecture, Deployment Options, Use Cases, and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2026.
- [4] S. Senger *et al.*, "A comprehensive survey of massive-MIMO based on 5G antennas," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022.
- [5] D. Vouyioukas, "A Survey on Beamforming Techniques for Wireless," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013.
- [6] E. Björnson, "Basics of Massive MIMO", https://www.youtube.com/watch?v=qjqYRHYLoWo&list=PLTv48TzNRhaKOPQ_nDTHzSDJK36AKuqaW, 2018.

Κωδικοποίηση Δεδομένων σε Έντυπο Μέσο

Νίκος Ραουντόνους, Ψηφιακά Συστήματα, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Σπάρτη,
nikos.raudonus@gmail.com

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ένα σύστημα κωδικοποίησης αρχείων υπολογιστή σε εκτυπώσιμες εικόνες υψηλής ανάλυσης για αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων σε χαρτί. Τα δεδομένα αναπαρίστανται ως πλέγμα δυαδικών εικονοστοιχείων με παραμετροποιήσιμη ανάλυση, ενώ ο κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων εξασφαλίζει ανθεκτικότητα σε αλλοιώσεις κατά την εκτύπωση και σάρωση. Η μέθοδος επιτυγχάνει χωρητικότητα εκατοντάδων kilobytes σε A4 χαρτί στα 200 ppi, συγκρίσιμη με υπάρχον εργαλεία. Το σύστημα απευθύνεται τόσο σε εκπαιδευτικά πλαίσια όσο και στην ψηφιακή παλαιότητα (digital obsolescence).

Λέξεις κλειδιά: κωδικοποίηση δεδομένων, αποθήκευση σε χαρτί, Reed-Solomon, ψηφιακή παλαιότητα, barcode, bitmap

1 Εισαγωγή

Η ψηφιακή αποθήκευση δεδομένων σε έναν κόσμο όπου η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς αντιμετωπίζει διάφορα προβλήματα όπως φθορά του μέσου, τεχνολογική παλαιότητα και πιο σημαντικά, ότι γίνεται όλο και πιο αδιαφανής. Σήμερα αποθηκεύουμε αρχεία σε δίσκους ή υπηρεσίες cloud που δουλεύουν ως μαύρα κουτιά. Ξέρουμε ότι δουλεύει αλλά όχι πως τα δεδομένα γράφονται, διαβάζονται, προστατεύονται ή κινδυνεύουν. Αυτή η απόσταση από το μέσο στερεί τον προγραμματιστή από την κατανόηση του τι συμβαίνει κάτω από τα στρώματα αφαίρεσης και οδηγεί σε περαιτέρω προβλήματα. Το χαρτί ως μέσο αποθήκευσης παρέχει μια λύση σε αυτό το πρόβλημα στο πλαίσιο της εκπαίδευσης και επίσης της ψηφιακής παλαιότητας (digital obsolescence), λόγω του πλήθους τεχνολογιών που γράφουν και διαβάζουν από αυτό.

1.1 Σχετικές εργασίες

Η ιδέα της αποθήκευσης υψηλής χωρητικότητας δεδομένων σε χαρτί δεν είναι καινούργια. Υπάρχουν ήδη εργαλεία όπως το Optar [1] και PaperBack [2] με εστίαση στην ψηφιακή παλαιότητα. Με εκτυπωτές υψηλών dpi, φτάνουν έως και 200-500 KB, παρόμοια χωρητικότητα με τη λύση που παρουσιάζεται εδώ.

2 Περιγραφή Προβλήματος

Μοτίβα που κωδικοποιούν πληροφορία είναι γνωστά ως “Barcodes” και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στη καθημερινότητα όπως π.χ. τα QR Codes που γνωρίζουμε. Για μεγάλη πυκνότητα πληροφορίας όπως αρχεία υπολογιστή δεν επαρκούν τέτοιου τύπου Barcodes όμως και πρέπει να σχεδιαστεί ένα format που:

1. Έχει υψηλή χωρητικότητα που είναι επεκτάσιμη
2. Να μπορεί να υποστεί έως ένα ρυθμιζόμενο ποσοστό από σφάλματα
3. Να είναι όσο πιο απλό γίνεται για λόγους διαφάνειας

3 Προτεινόμενη Λύση

Η προτεινόμενη λύση είναι ένα σύστημα κωδικοποίησης δεδομένων σε εικόνες ρυθμιζόμενης ανάλυσης κατάλληλες για εκτύπωση. Το σύστημα αποτελείται από δύο βασικές λειτουργίες: την κωδικοποίηση (encoding) της πληροφορίας σε εικόνα και την αποκωδικοποίηση (decoding) από σαρωμένη εικόνα πίσω στα αρχικά δεδομένα. Τα δεδομένα κωδικοποιούνται πάνω σε πλέγμα από μαύρα και λευκά τετράγωνα, δηλαδή ένα 2D Barcode matrix.

3.1 Παράμετροι

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει παραμέτρους όπως το πλάτος και το ύψος (σε ίντσες) της επιφάνειας που θα αποθηκεύσει τις πληροφορίες, την πυκνότητα / ανάλυση σε PPI (pixel ανά ίντσα) καθώς και το μοντέλο ελέγχου αθροίσματος και την ισχύ διόρθωσης, δηλαδή πόσο από τον κώδικα χρησιμοποιείται για διόρθωση.

3.2 Διόρθωση Σφαλμάτων

Ένα από τα κεντρικά τεχνικά στοιχεία της λύσης είναι η χρήση κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων Reed-Solomon. Κατά την εκτύπωση και σάρωση υπάρχουν αναπόφευκτες αλλοιώσεις: σκόνη, φθορά χαρτιού, ατέλειες εκτυπωτή. Ο αλγόριθμος Reed-Solomon [3] προσθέτει πλεονασματικά δεδομένα (redundancy) στην κωδικοποιημένη εικόνα, ώστε να είναι δυνατή η ανάκτηση των αρχικών δεδομένων ακόμα και αν ένα ποσοστό της εικόνας έχει καταστραφεί. Πρόκειται για τον ίδιο αλγόριθμο που χρησιμοποιείται σε CD, DVD και QR Codes. Επιπλέον, σε περίπτωση ανεπανόρθωτης απώλειας, γίνεται χρήση κώδικα CRC (Cyclic Redundancy Check) [4] ώστε να μπορέσουμε να εντοπίσουμε ότι τα δεδομένα δεν είναι πλέον έγκυρα.

3.3 Δομή

Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 1, κάθε barcode περιέχει:

1. **Σήματα ευθυγράμμισης (alignment markers):** Γνωστά μοτίβα στις γωνίες και στο περιθώριο της εικόνας, που επιτρέπουν στον αποκωδικοποιητή να διορθώσει στρέψη (rotation) και παραμόρφωση (skew) από τη σάρωση
2. **Ωφέλιμο φορτίο (payload):** Τα κωδικοποιημένα δεδομένα, προστατευμένα από Reed-Solomon και CRC



Εικόνα 1. Format του Barcode

3.4 Ροή Κωδικοποίησης και Αποκωδικοποίησης

Η διαδικασία κωδικοποίησης περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Ανάγνωση του αρχείου εισόδου ως ακολουθία bytes
2. Εφαρμογή κωδικοποίησης Reed-Solomon για παραγωγή προστατευμένων δεδομένων
3. Χαρτογράφηση των bits σε pixels του πλέγματος και byte spreading για ανθεκτικότητα σε συνεχόμενα σφάλματα
4. Εξαγωγή της εικόνας σε μορφή κατάλληλη για εκτύπωση (π.χ. bitmap)

Η αποκωδικοποίηση ακολουθεί αντίστροφη πορεία: σάρωση εικόνας → διόρθωση γεωμετρίας → ανίχνευση bits → αποκωδικοποίηση Reed-Solomon → ανάκτηση δεδομένων.

3.5 Χωρητικότητα

$$C = w * h * PPI^2 * (1 - a) * (1 - e) / 8 \quad (1)$$

Όπου w , h είναι οι διαστάσεις της επιφάνειας σε ίντσες που πολλαπλασιάζουμε με τα pixels ανά ίντσα, το a (ίσο με ~2%) είναι το ποσοστό των pixels που χρειαζόμαστε για τα σήματα ευθυγράμμισης και το e είναι το ποσοστό των δεδομένων που πάνε προς κώδικα διόρθωσης Reed Solomon και CRC (περίπου 40-50% τυπικά). Μία A4 με περίγραμμα 0.5in και τυπικές παραμέτρους βγαίνει ~220 KB σε χωρητικότητα.

3.6 Υλοποίηση

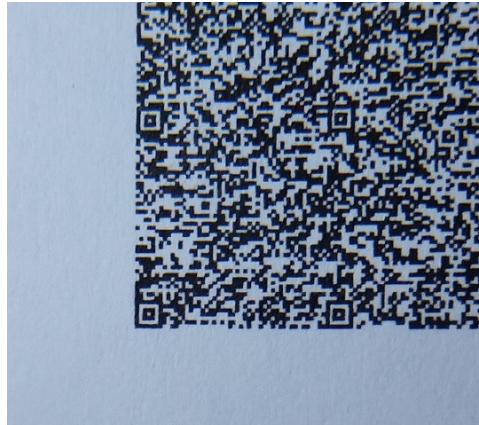
Λογισμικό για αυτό το Barcode υλοποιήθηκε σε C++ / python και εκτελείται μέσω γραμμής εντολών. Ο πηγαίος κώδικας διαχωρίζεται σε λογικά modules: core για την κύρια λογική κωδικοποίησης, error για τον αλγόριθμο Reed-Solomon και img για διαχείριση εικόνας. Για διόρθωση γεωμετρίας της σκαναρισμένης εικόνας, γίνεται χρήση από python με opencv. Η λύση διατίθεται ως ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα: <https://codeberg.org/Niko64/BarcodeStorage>

4 Συμπεράσματα και Αποτελέσματα

Για να συνοψίσουμε, το Barcode format που παρουσιάστηκε μας επιτρέπει με καθημερινά εργαλεία (μονάχα έναν εκτυπωτή και scanner) να αποθηκεύσουμε δεδομένα σε ένα καθημερινό A4 χαρτί ή σε όποια άλλη επιφάνεια επιθυμούμε.

4.1 Πρακτικός έλεγχος

Ένα αρχείο μεγέθους ~200 KB κωδικοποιήθηκε και εκτυπώθηκε σε ανάλυση 200 ppi (600 dpi) σε χαρτί A4. Η αναγνωσιμότητα του επιβεβαιώθηκε με μεγεθυντικό φακό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Ωστόσο, ο κύκλος εκτύπωσης→σάρωσης→ανάκτησης δεν ολοκληρώθηκε, καθώς δεν υπήρχε πρόσβαση σε προσωπικό σαρωτή υψηλής ανάλυσης και οι διαθέσιμες υπηρεσίες σάρωσης δεν παρείχαν τον απαιτούμενο έλεγχο παραμέτρων για σάρωση χωρίς απώλειες. Εναλλακτικά, επιβεβαιώθηκε η λειτουργικότητα της ανάκτησης μέσω προσομοίωση: δημιουργήθηκε συνθετική εικόνα σάρωσης με περιστροφή, μικρή κλίση επιφάνειας και θόρυβο και το πρόγραμμα έκανε ορθή ανάγνωση του.



Εικόνα 2. 1 cm² του barcode κάτω από μεγέθυνση

5 Αναφορές

- [1] <https://ronja.twibright.com/optar/>
- [2] <https://ollydbg.de/Paperbak/>
- [3] Reed, I.S., & Solomon, G., “Polynomial Codes Over Certain Finite Fields”, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 8(2), 300-304, 1960
- [4] Peterson, W., & Brown, D., “Cyclic Codes for Error Detection”, *Proceedings of the IRE*, 49(1), 228-235, 1961

Τεχνητή Νοημοσύνη στην Ακαδημαϊκή Εκπαίδευση

Αρούσι Ράνι Κουμάρ, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου,
Τρίπολη, dit24086@go.uop.gr

03 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη χρήση εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης στην ακαδημαϊκή εκπαίδευση, μέσα από την προσωπική εμπειρία φοιτήτριας του Τμήματος Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Διευρύνεται η χρήση εργαλείων όπως το ChatGPT και το DeepSeek κατά το πρώτο εξάμηνο σπουδών, υπό ιδιαίτερα πειστικές συνθήκες, και καταδεικνύονται τα οφέλη αλλά και οι περιορισμοί τους. Τα κύρια ευρήματα δείχνουν ότι τα γενικής χρήσης εργαλεία Τεχνητής Νοημοσύνης, παρόλο που συμβάλλουν στην κατανόηση ύλης, στην επίλυση ασκήσεων και στην οργάνωση σημειώσεων, δεν είναι βελτιστοποιημένα για τις ανάγκες στην διδασκαλία. Βασισμένη σε αυτά τα ευρήματα, η εργασία προτείνει την ανάπτυξη εξειδικευμένου AI βοηθού, με πρόσβαση στο διδακτικό υλικό, δωρεάν πρόσβαση για όλους τους φοιτητές και ενσωματωμένη Socratic μεθοδολογία για την προώθηση της κριτικής σκέψης.

Λέξεις κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη, ChatGPT, ακαδημαϊκή εκπαίδευση, Πληροφορική, AI βοηθός

1. Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή, τα εργαλεία της Τεχνητής Νοημοσύνης ή γνωστά ως AI έχουν αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο ένας φοιτητής μελετάει σε καθημερινή βάση. Διακεκριμένα πανεπιστήμια διεθνώς έχουν αρχίσει να ενσωματώνουν εργαλεία Τεχνητής Νοημοσύνης στην εκπαιδευτική διαδικασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Harvard, στο πλαίσιο της οποίας δημιουργήθηκε ένα προσαρμοσμένο AI tutor με ειδικές οδηγίες για τις ανάγκες της διδασκαλίας. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι φοιτητές που χρησιμοποίησαν το AI κατανόησαν το μεγαλύτερο μέρος της ύλης σε λιγότερο χρόνο, σε σύγκριση με φοιτητές που παρακολούθησαν μόνο τις διαλέξεις[2][7]. Εργαλεία όπως το ChatGPT, DeepSeek, Gemini κτλ. υποστηρίζουν τη μελέτη, την κατανόηση δύσκολων εννοιών και την επίλυση ασκήσεων. Παρ' όλα αυτά, η χρήση τους παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανοργάνωτη, καθώς δεν είναι οικονομικά εφικτό για όλους τους φοιτητές να έχουν πρόσβαση σε όλα τα διαθέσιμα εργαλεία Τεχνητής Νοημοσύνης. Επιπλέον, χωρίς την απαραίτητη καθοδήγηση, υπάρχει πιθανότητα οι πληροφορίες που παρέχουν τα AI να μην ανταποκρίνονται στις εξειδικευμένες ακαδημαϊκές απαιτήσεις. Η εργασία αυτή αποτελεί κριτική αποτίμηση της προσωπικής εμπειρίας από τη χρήση εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης κατά τη διάρκεια σπουδών στο Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, και διατυπώνει μια πρόταση για την δημιουργία ενός εξειδικευμένου ακαδημαϊκού AI βοηθού για το τμήμα.

2. Περιγραφή Προβλήματος

Η προσωπική εμπειρία συνίσταται στη χρήση εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης κατά τη διάρκεια εξ αποστάσεως σπουδών στο πρώτο έτος του Τμήματος Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, υπό ιδιαίτερα πιεστικές συνθήκες. Η παρακολούθηση των μαθημάτων ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2024, καθώς αρχικά εξεταζόταν το ενδεχόμενο υποβολής αίτησης μετεγγραφής σε αντίστοιχο τμήμα, αν και τελικά διαπιστώθηκε ότι δεν συγκεντρώνονταν οι απαραίτητες προϋποθέσεις. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να απομείνει ελάχιστος χρόνος για την κάλυψη της ύλης του εξαμήνου πριν από την εξεταστική περίοδο. Παράλληλα, η επαγγελματική απασχόληση και η δυνατότητα παρακολούθησης μαθημάτων μόνο μία φορά την εβδομάδα, σε συνδυασμό με τις ελλείψεις σημειώσεις, καθιστούσαν τη μελέτη ιδιαίτερα απαιτητική. Ωστόσο, με τη χρήση εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης κατέστη εφικτό να καλυφθεί η ύλη αποτελεσματικά και να επιτευχθεί προβιβάσιμος βαθμός σε τέσσερα μαθήματα του πρώτου εξαμήνου.

Σύμφωνα με τους Zheng et al. η έρευνά τους, βασίστηκε στην μετα-ανάλυση 69 πειραματικών μελετών (2022–2024) και κατέδειξε ότι το ChatGPT βελτιώνει σημαντικά την ακαδημαϊκή επίδοση, μειώνει τη νοητική προσπάθεια και ενισχύει τα κίνητρα μάθησης [3]. Συγκεκριμένα, τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε τρεις βασικούς τομείς.

2.1 Κατανόηση θεωρητικής ύλης

Σε περιπτώσεις όπου δεν υπήρχαν επαρκείς σημειώσεις και ο διαθέσιμος χρόνος για μελέτη του συγγράμματος ήταν ανεπαρκής, το ChatGPT αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσπάθεια κατανόησης σύνθετων εννοιών από το μάθημα της Λογικής Σχεδίασης: αντί να μελετηθεί ολόκληρο το κεφάλαιο, υποβλήθηκαν στοχευμένες ερωτήσεις στο ChatGPT, όπως «Εξήγησέ μου τι είναι ένας πίνακας αλήθειας με ένα απλό παράδειγμα». Το εργαλείο διαιρούσε την ύλη σε μικρότερες, διαχειρίσιμες ενότητες και παρείχε επανειλημμένες εξηγήσεις με διαφορετική διατύπωση κάθε φορά που η απάντηση δεν ήταν κατανοητή. Αντίστοιχα, από παγκόσμια έρευνα σε 23.218 φοιτητές από 109 χώρες προέκυψε ότι το ChatGPT χρησιμοποιείται κυρίως για την απλοποίηση σύνθετων πληροφοριών και τη δημιουργία περιλήψεων [4].

2.2 Επίλυση ασκήσεων και debugging κώδικα

Στις αρχικές ασκήσεις προγραμματισμού σε γλώσσα C, ο εντοπισμός σφαλμάτων αποτελούσε συχνά ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα αναδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο το ChatGPT συνέβαλε στην επίλυσή τους.

Στην πρώτη περίπτωση, σε άσκηση επεξεργασίας αλφαριθμητικών, το πρόγραμμα εκτύπωνε ακατανόητους χαρακτήρες μετά το τέλος της συμβολοσειράς. Ύστερα από αρκετή ώρα αναζήτησης χωρίς αποτέλεσμα, ο κώδικας υποβλήθηκε στο ChatGPT με την ερώτηση «Γιατί το αλφαριθμητικό μου εκτυπώνει περιττούς χαρακτήρες στο τέλος;». Το εργαλείο εντόπισε ότι απουσίαζε ο χαρακτήρας τερματισμού `\0`, εξηγώντας ότι χωρίς αυτόν η C συνεχίζει να διαβάζει τυχαία δεδομένα από τη μνήμη.

Στη δεύτερη περίπτωση, ένας βρόχος δεν τερματιζόταν ποτέ (infinite loop), παγώνοντας την εκτέλεση του προγράμματος. Το ChatGPT εντόπισε ότι η συνθήκη τερματισμού ήταν διατυπωμένη με τρόπο που δεν μπορούσε ποτέ να αξιολογηθεί ως ψευδής, και εξήγησε βήμα προς βήμα τη λογική αξιολόγησης συνθηκών σε βρόχους. Αντίστοιχα, το DeepSeek αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμο για την κατανόηση πιο σύνθετων δομών προγραμματισμού.

2.3 Οργάνωση σημειώσεων και δημιουργία οδηγών μελέτης

Τα εργαλεία Τεχνητής Νοημοσύνης αξιοποιήθηκαν επίσης για τη δημιουργία δομημένων οδηγών μελέτης (study guides) από μη οργανωμένο εκπαιδευτικό υλικό. Παραδείγματος χάρη, υποβλήθηκαν στο ChatGPT αποσπάσματα από διαφάνειες διαλέξεων και ζητήθηκε να τα οργανώσει σε συνοπτικές, ιεραρχημένες σημειώσεις με σαφή δομή θεμάτων και υποθεμάτων. Το αποτέλεσμα ήταν ένας αναλυτικός οδηγός μελέτης ο οποίος επέτρεψε την εστιασμένη επανάληψη της ύλης σε σύντομο χρονικό διάστημα, μέθοδος που αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική ενόψει της εξεταστικής.

Ωστόσο, οι απαντήσεις που παρείχαν τα εργαλεία δεν ήταν πάντοτε πλήρως εναρμονισμένες με τις απαιτήσεις των μαθημάτων, καθώς τα συστήματα αυτά δεν διαθέτουν εξειδικευμένη γνώση της ύλης κάθε ακαδημαϊκού τμήματος. Η σχετική έρευνα επισήμανε ότι οι φοιτητές θεωρούσαν το ChatGPT λιγότερο αξιόπιστο για υποστήριξη συγκεκριμένων μαθημάτων σε σχέση με τη γενική κατανόηση θεμάτων [4]. Επιπλέον, η αποτελεσματική χρήση εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτεί εξοικείωση με τεχνικές διατύπωσης ερωτημάτων (prompt engineering), την οποία ο μέσος φοιτητής δεν διαθέτει. Συνολικά, διαπιστώνεται ότι τα υπάρχοντα εργαλεία, παρά τη χρησιμότητά τους, δεν είναι βελτιστοποιημένα για τις ανάγκες των ακαδημαϊκών τμημάτων [3].

3. Προτεινόμενη Λύση

Προτείνεται η ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου AI βοηθού για το Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Ο βοηθός αυτός θα διαφέρει θεμελιωδώς γενικά εργαλεία όπως το ChatGPT, καθώς θα είναι πλήρως ενσωματωμένος στο ακαδημαϊκό περιβάλλον του τμήματος.

Συγκεκριμένα, ο βοηθός θα διαθέτει πρόσβαση στο πρόγραμμα σπουδών, στις σημειώσεις των μαθημάτων που αναρτώνται από τους διδάσκοντες, καθώς και στις οδηγίες εκπόνησης εργασιών. Αυτό θα του επιτρέπει να απαντά σε ερωτήσεις που σχετίζονται άμεσα με το διδακτικό υλικό, χωρίς αποκλίσεις ή αντιφάσεις. Επιπλέον, θα είναι ενημερωμένος για τις εξεταστικές περιόδους, τις προθεσμίες εργασιών και τους κανονισμούς του τμήματος, λειτουργώντας ως ένας ολοκληρωμένος ακαδημαϊκός οδηγός. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δωρεάν παροχή του εργαλείου, εξασφαλίζοντας ισότιμη πρόσβαση για όλους τους φοιτητές, ανεξαρτήτως οικονομικής δυνατότητας. Τέλος, οι διδάσκοντες θα μπορούν να παρέχουν κατάλληλα διαμορφωμένα ερωτήματα (prompts) που θα καθοδηγούν πιο στοχευμένα τη μελέτη της.

Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της πρότασης αφορά την ακαδημαϊκή δεοντολογία. Ο βοηθός θα ενσωματώνει μηχανισμούς που θα αποθαρρύνουν την αντιγραφή, ενθαρρύνοντας τους φοιτητές να κατανοούν τις έννοιες αντί να αντιγράφουν απλώς τις απαντήσεις [6]. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω καθοδηγητικής μεθοδολογίας Socratic, κατά την οποία ο βοηθός δεν θα δίνει άμεσες λύσεις αλλά οδηγεί τον φοιτητή βήμα προς βήμα στη διαδικασία σκέψης [5]. Συγκεκριμένα, ενώ το ChatGPT ερωτώμενο «Πώς λειτουργεί ο αλγόριθμος X;» θα παρείχε αμέσως πλήρη εξήγηση, ο εξειδικευμένος βοηθός θα απαντούσε ανταπαντώντας: «Τι γνωρίζεις ήδη για τον X;». Μέσα από αυτό τον διάλογο, ο φοιτητής οδηγείται να ανακαλύψει μόνος του τη λύση, αναπτύσσοντας κριτική σκέψη και βαθύτερη κατανόηση που δεν θα ήταν εφικτή με την παθητική λήψη έτοιμων απαντήσεων.

Η υλοποίηση του συστήματος θα μπορούσε να βασιστεί σε υπάρχουσες τεχνολογίες API γλωσσικών μοντέλων, με εξειδίκευση μέσω τεχνικής Retrieval-Augmented Generation (RAG), η οποία επιτρέπει στο μοντέλο να ανακτά πληροφορίες από τη βάση ακαδημαϊκών εγγράφων του τμήματος [1].

4. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αναδεικνύει τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη χρήση γενικής χρήσης εργαλείων AI, όπως το ChatGPT, στο πλαίσιο ακαδημαϊκών σπουδών Πληροφορικής. Η εμπειρία αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα γενικά εργαλεία AI, αν και χρήσιμα, δεν μπορούν να υποκαταστήσουν έναν εξειδικευμένο ακαδημαϊκό βοηθό προσαρμοσμένο στις ανάγκες συγκεκριμένου τμήματος. Ο προτεινόμενος βοηθός αντιμετωπίζει αυτό το κενό, προσφέροντας στους φοιτητές ένα αξιόπιστο, δεοντολογικά υπεύθυνο και ακαδημαϊκά εναρμονισμένο εργαλείο. Η υλοποίησή του θα μπορούσε να αποτελέσει πρότυπο για άλλα τμήματα και ιδρύματα, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση ενός νέου μοντέλου συνεργασίας ανθρώπου και Τεχνητής Νοημοσύνης στην εκπαίδευση. Ως μελλοντική κατεύθυνση, προτείνεται η πειραματική εφαρμογή του συστήματος σε ένα μάθημα του τμήματος, με αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω ερωτηματολογίων φοιτητών και μέτρησης ακαδημαϊκής επίδοσης.

5. Αναφορές

- [1] P. Lewis et al., “Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, pp. 9459–9474, 2020.
- [2] G. Kestin, K. Miller, A. Klales, T. Milbourne, and G. Ponti, “AI Tutoring Outperforms Active Learning,” preprint, Research Square, 2024. [Online]. Available: <https://www.researchsquare.com/article/rs-4243877/v1>
- [3] Y. Zheng et al., “Does ChatGPT Enhance Student Learning? A Systematic Review and Meta-Analysis of Experimental Studies,” *Computers & Education*, vol. 220, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105224>
- [4] T. K. F. Chiu et al., “Higher Education Students’ Perceptions of ChatGPT: A Global Study of Early Reactions,” 2024. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11798494/>
- [5] C.-Y. Teng et al., “Socratic Wisdom in the Age of AI: A Comparative Study of ChatGPT and Human Tutors in Enhancing Critical Thinking Skills,” *Frontiers in Education*, 2025. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2025.1528603/full>
- [6] The Conversation, “The greatest risk of AI in higher education isn’t cheating — it’s the erosion of learning itself,” 2025. [Online]. Available: <https://theconversation.com/the-greatest-risk-of-ai-in-higher-education-isnt-cheating-its-the-erosion-of-learning-itself-270243>
- [7] Harvard University, “AI Teaching Resources,” 2024. [Online]. Available: <https://www.harvard.edu/ai/teaching-resources/>

COSTAS ACADEMY: ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΜΑΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΦΟΙΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΕΣ ΜΕ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΑΙ

Γ. Κ. Φωτόπουλος*

Τμήμα Τεχνολογιών Ψηφιακής Βιομηχανίας,
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ψαχνά
sdt2200234@uoa.gr

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει το **Costas Academy**, μια δωρεάν διαδικτυακή πλατφόρμα μάθησης που αναπτύχθηκε με στόχο την παροχή ενός οργανωμένου, καθαρού και προσιτού περιβάλλοντος μελέτης και υποστήριξης της διδασκαλίας για φοιτητές, διδάσκοντες και αυτοδίδακτους χρήστες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εμπειρία χρήστη, καθώς πολλά διαθέσιμα εργαλεία μελέτης, όπως εφαρμογές για flashcards ή πλατφόρμες οργάνωσης εκπαιδευτικού υλικού, παρουσιάζουν συχνά δυσχρηστία, περιττή πολυπλοκότητα, περιορισμούς στη δωρεάν χρήση ή σχεδιασμό που δεν υποστηρίζει αποτελεσματικά τη συστηματική και καθημερινή επανάληψη. Το Costas Academy επιχειρεί να συνδυάσει οργανωμένο περιεχόμενο, πρακτική εφαρμογή, κοινότητα και εργαλεία μελέτης σε ένα ενιαίο, καθαρό και εύχρηστο περιβάλλον, χωρίς διαφημίσεις ή paywalls.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρονική Μάθηση, Εκπαιδευτική Τεχνολογία, Εμπειρία Χρήστη, Ενεργή Ανάκληση, Κοινότητα Μάθησης, Τεχνητή Νοημοσύνη

1 Εισαγωγή

Η αξιοποίηση διαδικτυακών τεχνολογιών στην εκπαίδευση έχει δημιουργήσει νέες δυνατότητες για την πρόσβαση σε εκπαιδευτικό υλικό, την οργάνωση της μελέτης και την υποστήριξη της διδασκαλίας. Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη μεγάλου όγκου διαθέσιμου περιεχομένου δεν συνεπάγεται απαραίτητα αποτελεσματική μάθηση. Πολλοί φοιτητές και αυτοδίδακτοι χρήστες βασίζονται σε αποσπασματικές πηγές, βίντεο χωρίς ενιαία δομή, σημειώσεις χωρίς συνέχεια ή πλατφόρμες που δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στην ποσότητα του περιεχομένου παρά στη βαθιά κατανόηση. Παράλληλα, οι διδάσκοντες συχνά χρειάζονται συμπληρωματικά ψηφιακά εργαλεία που να μπορούν να υποστηρίξουν την οργάνωση του υλικού, την επανάληψη, την πρακτική εφαρμογή και την αλληλεπίδραση των εκπαιδευόμενων.

Σημαντικό ρόλο στη μαθησιακή διαδικασία έχουν τεχνικές όπως η ενεργή ανάκληση και η επαναλαμβανόμενη αυτοαξιολόγηση, καθώς βοηθούν τον εκπαιδευόμενο να ελέγχει τι πραγματικά έχει κατανοήσει και να εντοπίζει κενά στη γνώση του [4, 1]. Ωστόσο, αρκετά υπάρχοντα εργαλεία μελέτης είτε είναι περιορισμένα στη δωρεάν χρήση τους είτε παρουσιάζουν δυσχρηστία, περιττή πολυπλοκότητα και έλλειψη σύνδεσης με το υπόλοιπο εκπαιδευτικό περιεχόμενο. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη για πλατφόρμες που

δεν παρέχουν απλώς υλικό, αλλά συνδυάζουν οργανωμένη διδασκαλία, πρακτική εφαρμογή, εργαλεία επανάληψης, κοινότητα και καλή εμπειρία χρήστη.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία παρουσιάζει το **Costas Academy** (<https://costasacademy.eu>), μια δωρεάν διαδικτυακή πλατφόρμα μάθησης που σχεδιάστηκε με στόχο την παροχή ενός καθαρού, εύχρηστου και οργανωμένου περιβάλλοντος για φοιτητές, διδάσκοντες και αυτοδίδακτους χρήστες. Η πλατφόρμα συνδυάζει δομημένα μαθήματα, πρακτικά projects, flashcards, forum, δυνατότητες συνεργατικής μελέτης και προφίλ χρηστών, με έμφαση στη βαθιά κατανόηση, στη σύνδεση θεωρίας και πράξης, και στη χαμηλή τριβή κατά τη μελέτη.

2 Περιγραφή Προβλήματος

Η ανάπτυξη του Costas Academy προέκυψε από την ανάγκη για ένα ενιαίο, δωρεάν και εύχρηστο μαθησιακό περιβάλλον που να συνδυάζει εκπαιδευτικό περιεχόμενο, πρακτική εφαρμογή, εργαλεία επανάληψης και κοινότητα. Σε πολλές περιπτώσεις, ο εκπαιδευόμενος χρειάζεται να χρησιμοποιήσει διαφορετικές πλατφόρμες για να παρακολουθήσει υλικό, να οργανώσει σημειώσεις, να δημιουργήσει flashcards, να κάνει ερωτήσεις ή να συνεργαστεί με άλλους χρήστες. Αυτή η κατακερματισμένη εμπειρία αυξάνει την πολυπλοκότητα της μελέτης και μπορεί να αποσπάσει την προσοχή από τον κύριο στόχο, δηλαδή την ουσιαστική κατανόηση.

Ένα επιπλέον πρόβλημα που παρατηρείται σε αρκετά υπάρχοντα μαθησιακά εργαλεία είναι ότι, παρότι προσφέρουν χρήσιμες λειτουργίες, η εμπειρία χρήστη συχνά λειτουργεί αποτρεπτικά για τη συστηματική χρήση τους. Πολύπλοκες ροές, υπερφορτωμένα περιβάλλοντα, περιορισμοί σε βασικές λειτουργίες και έλλειψη καθαρής οργάνωσης μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα εργαλείων όπως τα flashcards, τα οποία βασίζονται στην τακτική και γρήγορη επανάληψη. Για τον λόγο αυτόν, το Costas Academy σχεδιάστηκε με έμφαση στην απλότητα, την καθαρή πλοήγηση και τη χαμηλή τριβή κατά τη μελέτη, ακολουθώντας τη γενικότερη αρχή ότι η ευχρηστία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην ποιότητα ενός διαδραστικού συστήματος [3].

Παράλληλα, η σύνδεση θεωρίας και πράξης παραμένει σημαντική πρόκληση. Η απλή κατανάλωση εκπαιδευτικού περιεχομένου δεν αρκεί πάντα για την ανάπτυξη ουσιαστικής γνώσης, ιδιαίτερα σε αντικείμενα όπως ο προγραμματισμός, τα μαθηματικά, οι τηλεπικοινωνίες, και γενικότερα οι τεχνολογικές επιστήμες. Οι εκπαιδευόμενοι χρειάζονται παραδείγματα, projects και μηχανισμούς επανάληψης που να τους βοηθούν να μετατρέπουν τη θεωρητική πληροφορία σε εφαρμόσιμη γνώση. Αντίστοιχα, οι διδάσκοντες μπορούν να επωφεληθούν από μια πλατφόρμα που λειτουργεί συμπληρωματικά προς τη διδασκαλία, προσφέροντας οργανωμένο υλικό, κοινότητα ερωτήσεων και εργαλεία μελέτης.

Τέλος, η αυξανόμενη χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) δημιουργεί νέες δυνατότητες για την υποστήριξη της μάθησης, υπό την προϋπόθεση ότι αξιοποιούνται με προσεκτικό και παιδαγωγικά υπεύθυνο τρόπο. Στην περίπτωση του Costas Academy, η μελλοντική ενσωμάτωση AI Assistant δεν αντιμετωπίζεται ως αντικατάσταση της προσωπικής μελέτης, αλλά ως προαιρετικό εργαλείο υποβοήθησης για την οργάνωση της επανάληψης, όπως για παράδειγμα μέσω της δημιουργίας flashcards από εκπαιδευτικό υλικό ή προσωπικές σημειώσεις του χρήστη.

3 Προτεινόμενη Λύση

Ως απάντηση στις παραπάνω ανάγκες, αναπτύχθηκε το **Costas Academy**, μια δωρεάν διαδικτυακή πλατφόρμα μάθησης διαθέσιμη στον ιστότοπο <https://costasacademy.eu>. Η βασική φιλοσοφία της πλατφόρμας είναι ότι η μάθηση πρέπει να είναι οργανωμένη, ουσιαστική και προσβάσιμη, χωρίς ο εκπαιδευόμενος να αποσπάται από διαφημίσεις, paywalls ή περιττά πολύπλοκες ροές χρήσης. Για τον λόγο αυτόν, η πλατφόρμα δεν περιορίζεται στην απλή δημοσίευση εκπαιδευτικού περιεχομένου, αλλά συνδυάζει λειτουργίες που υποστηρίζουν τη μελέτη πριν, κατά τη διάρκεια, και μετά την επαφή του χρήστη με το υλικό.

Το Costas Academy σχεδιάστηκε ως ένα ενιαίο μαθησιακό περιβάλλον, στο οποίο ο χρήστης μπορεί να μελετήσει οργανωμένα μαθήματα, να δει πρακτικές εφαρμογές μέσω projects, να δημιουργήσει

flashcards για επανάληψη, να συμμετάσχει σε συζητήσεις μέσω του forum και να αλληλεπιδράσει με άλλους χρήστες. Με αυτόν τον τρόπο, επιχειρείται η σύνδεση του εκπαιδευτικού περιεχομένου με ενεργές μορφές μάθησης, όπως είναι η ανάκληση, η πρακτική εφαρμογή και η κοινωνική αλληλεπίδραση. Η οργάνωση του ψηφιακού εκπαιδευτικού υλικού αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη μαθησιακή εμπειρία, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με καθαρή παρουσίαση και μειωμένο γνωστικό φόρτο για τον χρήστη [2].

3.1 Βασικές λειτουργίες της πλατφόρμας

Η πλατφόρμα περιλαμβάνει ένα σύνολο λειτουργιών που στοχεύουν στην υποστήριξη διαφορετικών πλευρών της μαθησιακής διαδικασίας. Η ενότητα των **courses** (μαθήματα) παρέχει δομημένο εκπαιδευτικό περιεχόμενο, με έμφαση στη σαφήνεια, στη σταδιακή ανάπτυξη των εννοιών και στη βαθιά κατανόηση. Τα **projects** λειτουργούν συμπληρωματικά προς τα μαθήματα, καθώς δείχνουν πώς η θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη μέσα από πραγματικά παραδείγματα και υλοποιήσεις.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η λειτουργία των **flashcards** (κάρτες επανάληψης ερωταπαντήσεων), η οποία επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν δικά τους σύνολα καρτελών για την επανάληψη εννοιών, ορισμών, τύπων ή ερωτήσεων. Η λειτουργία αυτή συνδέεται άμεσα με την ενεργή ανάκληση, καθώς ο χρήστης δεν διαβάζει απλώς παθητικά το υλικό, αλλά προσπαθεί να ανακαλέσει την απάντηση πριν την εμφανίσει. Με αυτόν τον τρόπο, τα flashcards μπορούν να λειτουργήσουν ως καθημερινό εργαλείο αυτοαξιολόγησης και εντοπισμού κενών.

Παράλληλα, το **forum** (χώρος συζητήσεων) παρέχει χώρο για ερωτήσεις, απαντήσεις και συζητήσεις μεταξύ των χρηστών. Η ύπαρξη κοινότητας είναι σημαντική, διότι η μάθηση δεν πραγματοποιείται πάντα ατομικά· συχνά ενισχύεται μέσα από την ανταλλαγή αποριών, εξηγήσεων και διαφορετικών τρόπων σκέψης. Η λειτουργία **Study with Others** επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται συνδέσμους για ζωντανή ομαδική μελέτη, διευκολύνοντας τη συνεργασία μεταξύ φίλων, συμφοιτητών ή ομάδων με κοινό αντικείμενο ενδιαφέροντος.

Τέλος, τα **προφίλ χρηστών** και οι δυνατότητες σύνδεσης μεταξύ χρηστών προσθέτουν ένα ελεγχόμενο κοινωνικό επίπεδο στην πλατφόρμα. Οι χρήστες μπορούν να έχουν ένα βασικό προφίλ μέσα στην κοινότητα, να συνδέονται με άλλους και να παρακολουθούν δραστηριότητες που σχετίζονται με τη μάθηση, χωρίς όμως η πλατφόρμα να μετατρέπεται σε περιβάλλον άμεσης κοινωνικής δικτύωσης. Για τον λόγο αυτόν, οι αλληλεπιδράσεις παραμένουν σκόπιμα περιορισμένες και προσανατολισμένες στη μάθηση, χωρίς λειτουργία προσωπικής συνομιλίας (*chat*), ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος απόσπασης της προσοχής των εκπαιδευόμενων.

Παράλληλα, η πλατφόρμα δίνει έμφαση στην προστασία της ιδιωτικότητας και στον περιορισμό της έκθεσης προσωπικών δεδομένων. Οι χρήστες μπορούν να ελέγχουν τον βαθμό ορατότητας της παρουσίας τους, ενώ η δυνατότητα ιδιωτικού προφίλ επιτρέπει την περαιτέρω ανωνυμοποίηση και τον περιορισμό της δημόσιας διάθεσης προσωπικών πληροφοριών. Με αυτόν τον τρόπο, το Costas Academy επιδιώκει να συνδυάσει την αξία της μαθησιακής κοινότητας με ένα ασφαλές, ήρεμο και μη αποπροσανατολιστικό περιβάλλον.

3.2 Τεχνική υλοποίηση και ασφάλεια

Η τεχνική υλοποίηση του Costas Academy βασίζεται σε σύγχρονες τεχνολογίες διαδικτύου. Το frontend έχει αναπτυχθεί σε React και Vite, με στόχο τη γρήγορη απόκριση, την καθαρή αρχιτεκτονική και την ευχάριστη εμπειρία χρήσης. Για την αυθεντικοποίηση, τη βάση δεδομένων και την αποθήκευση αρχείων χρησιμοποιείται το Supabase, ενώ η φιλοξενία της πλατφόρμας πραγματοποιείται μέσω του Cloudflare Pages. Η επιλογή αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την ανάπτυξη μιας επεκτάσιμης web εφαρμογής, η οποία μπορεί να βελτιώνεται σταδιακά χωρίς να απαιτείται πλήρης ανασχεδιασμός της αρχιτεκτονικής.

Δεδομένου ότι η πλατφόρμα διαθέτει λογαριασμούς χρηστών, προσωπικά προφίλ, περιεχόμενο που δημιουργείται από χρήστες και λειτουργίες κοινότητας, η ασφάλεια αποτελεί βασική παράμετρο του σχεδιασμού. Έχουν ληφθεί υπόψη μηχανισμοί όπως προστατευμένες διαδρομές, έλεγχος πρόσβασης σε

επίπεδο βάσης δεδομένων, πολιτικές περιορισμού δικαιωμάτων και προστασία φορμών από αυτοματοποιημένη κατάχρηση. Επιπλέον, η χρήση υπηρεσιών όπως το Cloudflare Turnstile συμβάλλει στη μείωση ανεπιθύμητης ή κακόβουλης δραστηριότητας, χωρίς να επιβαρύνει την εμπειρία του χρήστη.

Η έμφαση στην ασφάλεια δεν αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητο χαρακτηριστικό, αλλά ως προϋπόθεση για τη βιωσιμότητα μιας ανοιχτής εκπαιδευτικής πλατφόρμας. Όταν μια εφαρμογή είναι δημόσια διαθέσιμη και επιτρέπει τη συμμετοχή χρηστών, πρέπει να σχεδιάζεται με τρόπο που προστατεύει τόσο το σύστημα όσο και την κοινότητα που αναπτύσσεται γύρω από αυτό.

3.3 Προοπτική υποστήριξης AI

Μια προγραμματισμένη επέκταση της πλατφόρμας είναι η ενσωμάτωση προαιρετικού βοηθού Τεχνητής Νοημοσύνης (*Artificial Intelligence – AI*) για την υποστήριξη της δημιουργίας flashcards. Η λειτουργία αυτή βρίσκεται στο στάδιο σχεδιασμού και ανάπτυξης, και δεν αντιμετωπίζεται ως αντικατάσταση της μελέτης ή της κριτικής σκέψης του χρήστη. Αντίθετα, ο στόχος της είναι να μειώσει τον χρόνο που απαιτείται για την αρχική οργάνωση της επανάληψης, προτείνοντας ενδεικτικές ερωτήσεις και απαντήσεις από εκπαιδευτικό υλικό ή σημειώσεις.

Η χρήση του AI σε ένα τέτοιο πλαίσιο πρέπει να είναι προσεκτική. Ο χρήστης θα πρέπει να έχει τον τελικό έλεγχο του περιεχομένου που αποθηκεύεται, καθώς οι αυτόματα παραγόμενες προτάσεις ενδέχεται να χρειάζονται διόρθωση, προσαρμογή ή απόρριψη. Για τον λόγο αυτόν, η λειτουργία σχεδιάζεται ως υποστηρικτικό εργαλείο και όχι ως αυτόνομος μηχανισμός παραγωγής γνώσης. Με αυτόν τον τρόπο, η πλατφόρμα μπορεί να αξιοποιήσει δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης, διατηρώντας ταυτόχρονα τον εκπαιδευόμενο ενεργό στη διαδικασία μάθησης.

Η συγκεκριμένη επέκταση συνδέει την πλατφόρμα με τη θεματική της Μηχανικής Μάθησης και της Τεχνητής Νοημοσύνης, καθώς διερευνά πώς τέτοιες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά σε ένα μαθησιακό περιβάλλον. Η αξία της δεν βρίσκεται στην πλήρη αυτοματοποίηση της μελέτης, αλλά στη δημιουργία ενός πιο γρήγορου και οργανωμένου σημείου εκκίνησης για επανάληψη.

4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε το **Costas Academy**, μια δωρεάν διαδικτυακή πλατφόρμα μάθησης που στοχεύει να συνδυάσει οργανωμένο εκπαιδευτικό περιεχόμενο, πρακτική εφαρμογή, εργαλεία επανάληψης και δυνατότητες αλληλεπίδρασης μεταξύ των χρηστών σε ένα ενιαίο και εύχρηστο περιβάλλον. Η ανάπτυξή της προέκυψε από την ανάγκη για μια πλατφόρμα που να δίνει έμφαση στη βαθιά κατανόηση και στη χαμηλή τριβή κατά τη μελέτη, αποφεύγοντας τις διαφημίσεις, τα paywalls και την περιττή πολυπλοκότητα.

Οι βασικές λειτουργίες της πλατφόρμας, όπως τα courses, τα projects, τα flashcards, το forum, το Study with Others και τα προφίλ χρηστών, επιχειρούν να υποστηρίξουν διαφορετικές πλευρές της μαθησιακής διαδικασίας. Παράλληλα, η τεχνική υλοποίηση βασίζεται σε σύγχρονες web τεχνολογίες και λαμβάνει υπόψη ζητήματα επεκτασιμότητας, ασφάλειας και εμπειρίας του χρήστη.

Μελλοντικά, η προοπτική ενσωμάτωσης ενός AI Assistant για την υποβοήθηση της δημιουργίας flashcards μπορεί να προσφέρει έναν επιπλέον τρόπο οργάνωσης της επανάληψης, υπό την προϋπόθεση ότι ο χρήστης διατηρεί τον τελικό έλεγχο του περιεχομένου. Συνολικά, το Costas Academy φιλοδοξεί να λειτουργήσει ως ένα ανοιχτό μαθησιακό εργαλείο για φοιτητές, διδάσκοντες και αυτοδίδακτους χρήστες, συνδέοντας τη διαδικτυακή τεχνολογία με ουσιαστικές πρακτικές μάθησης.

Αναφορές

- [1] John Dunlosky, Katherine A. Rawson, Elizabeth J. Marsh, Mitchell J. Nathan, and Daniel T. Willingham. Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from cognitive and educational psychology. *Psychological Science in the Public Interest*, 14(1):4–58, 2013.

- [2] Richard E. Mayer. *Multimedia Learning*. Cambridge University Press, 2 edition, 2009.
- [3] Jakob Nielsen. *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann, 1993.
- [4] Henry L. Roediger and Jeffrey D. Karpicke. Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention. *Psychological Science*, 17(3):249–255, 2006.

Simple Power Analysis on Post-Quantum Code Based Cryptosystems

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

3 June 2026

Abstract

Post-Quantum cryptography is about to substitute current cryptographic schemes as being resilient in attacks from quantum computers. McEliece and Bit Flip Key Encapsulation (BIKE) are two notable representatives based on coding theory, where classical structural attacks against these algorithms can be successfully phased out by selecting the appropriate key size. Using low cost equipment, the method of Simple Power Analysis (SPA) is used in this paper to evaluate whether there is information leakage during the decapsulation phase, where the shared secret key is generated. Executing a related experiment, it is shown that there is a significant correlation between electromagnetic emissions and secret values. In the aftermath, with only 250 power traces collected, machine learning models can predict a low sequence of secret bits of the shared session key, produced during the decapsulation.

Key words : Post-Quantum, Side-Channel Attacks, Simple Power Analysis

1 Introduction

Simple Power analysis (SPA) [1] refers to a class of Side Channel Attacks (SCA) that exploit unintended information leakage produced during the execution of cryptographic algorithms. Rather than targeting only mathematical weaknesses in the cryptographic algorithm itself (structural attacks), SCA exploit observable characteristics such as power consumption, electromagnetic emissions, or execution timing to infer sensitive internal states. These leakages arise from the physical implementation of a system and are often influenced by hardware architecture, signal integrity, and environmental noise. As a result, implementations that are theoretically secure can still be vulnerable when deployed on real devices. Evaluating and mitigating side-channel leakage [2] is therefore essential, particularly for embedded and resource-constrained platforms, where limited countermeasures and noisy measurement conditions can significantly affect the security of cryptographic operations.

Information Set Decoding (ISD) [3] belongs to the aforementioned structural attacks and can be augmented by SCA [4] significantly reducing the practical complexity of algebraic cryptanalysis. Although classical ISD treats all candidate information sets equally, side-channel observations can introduce measurable biases that guide the selection or pruning of candidate information subsets to perform ISD attack. By correlating leakage patterns with intermediate decoding operations, an attacker can prioritize high-probability information subsets, and thereby shrink the effective search space without modifying the underlying code structure.

Experiment Setup

In the context of SPA against a McEliece cryptosystem [5], this paper attempts to correlate recovered power traces with intentionally stored secret bytes while specific hardware executes cryptographic operations in software implementations of McEliece and BIKE, two code-based cryptosystems of the Open Quantum Safe (OQS) library. In general, SPA requires specific experimental equipment to attempt more advanced side-channel techniques, as it relies on indirect observation of power consumption patterns followed by extensive statistical processing. Essential tools include a target device that performs cryptographic operations, a stable power supply, and a means of measuring instantaneous power consumption, such as a shunt resistor or current probe coupled with a high-bandwidth digital oscilloscope. A trigger mechanism is often used to align measurements with specific execution phases, while basic data acquisition software enables visualization and manual inspection of traces. Unlike differential techniques, SPA generally does not require large trace sets or complex analysis frameworks, making it accessible yet effective against implementations with clearly distinguishable power signatures.

In line with this rationale, the low cost equipment that was recruited to participate in such an experiment, aligned with the setup in [6], acting analogously with a realistic SPA one, is the following: 1) A raspberry pi 3 that acts as a device under test (DUT). The DUT executes the cryptographic operations while exposing physical characteristics, such as power consumption or electromagnetic emissions, that may unintentionally leak information. 2) A shunt resistor, which is a low-resistance component that observes the voltage drop during DUT's cryptographic operations. 3) An operational amplifier (op-amp) is used to amplify the small voltage drop across the shunt resistor. 4) A Raspberry pi Pico, which is a low-cost microcontroller platform used to translate and store op-amp voltage variations by shunt, monitoring cryptographic operations. Having this set up, schematically represented in Fig. 1, it is possible to create an artificial, yet realistic, SCA experiment. This kind of setup has a significant trade-off, such as low sampling resolution which may also include noise.

For this experiment, the Python wrapper of the OQS open source library was used, where the code based Key Encapsulation Mechanisms (KEMs), McEliece and BIKE, both belong to the National Institute of Standards and Technology (NIST) security level-3. These algorithms run inside the DUT and each captured trace corresponds to a different decapsulation phase where the shared secret (ephemeral) key, is generated.

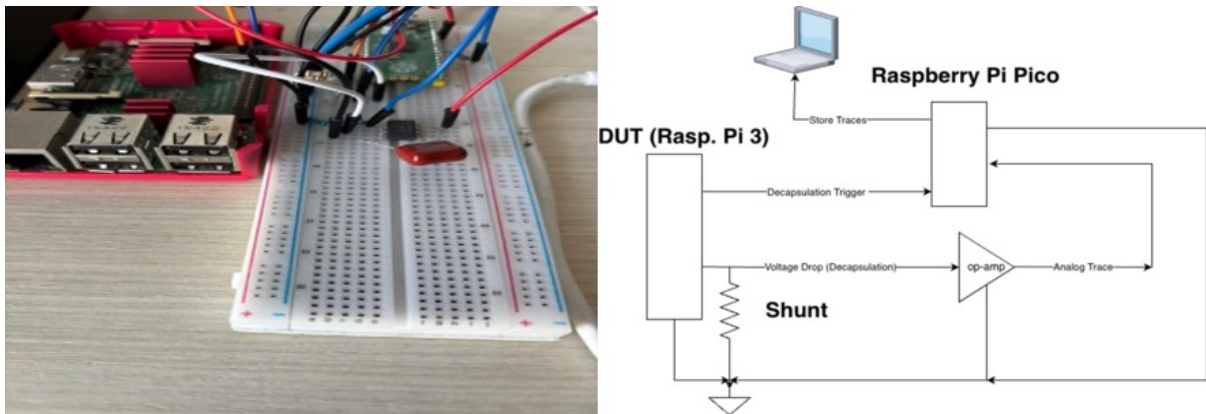


Figure 1: Experiment Equipment Setup and Connections.

3 Results Evaluation

After executing the experiment, 250 traces were collected for each cryptosystem. Each trace contains 1500 voltage samples produced during the decapsulation phase, also used to construct

the following voltage plots. To evaluate these observations of the experiment, the statistical method of null hypothesis [7] is used, in addition to the correlation between the voltage drop measurements and some bits of the shared secret key, which were produced and intentionally stored, during decapsulation. Hence, the correlation coefficient $\rho = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum\sqrt{(x-\bar{x})^2}\sqrt{(y-\bar{y})^2}}$ is computed, where x is the voltage power detected by the shunt and stored in the pi micro-controller and y is the Hamming weight of the last byte of the shared secret key. The values of ρ exist in $[-1, 1]$, where $\rho = 0$ indicates that there is no correlation, on the other hand, values such as -1 or 1 indicate absolute negative or positive correlation between quantities x and y , respectively.

Declaring the null hypothesis statement "Software implementations of code-based post-quantum cryptography do not leak information", the correlation ρ for McEliece and BIKE is calculated for analysis. Based on the literature that values of $\rho > 0.1$ indicate leakage [8], the initial hypothesis is rejected, leading to the conclusion that these algorithms leak significant information. For example, Fig. 2 represents how, during the decapsulation of the shared secret key from the McEliece KEM, the voltage spikes in the left plot correspond to high variations of ρ . The results also demonstrate that in the final phase of McEliece decapsulation there is measurable and temporally aligned power leakage that can be exploited through correlation based SPA. In addition, for the BIKE KEM, the results in Fig. 3 show a correlation exceedance beyond the threshold of $\rho = 0.1$, implying that there is more correlation between the traces and the ephemeral key. All these observations allow for further analysis, such as the prediction of secret bits using Machine Learning (ML) models.

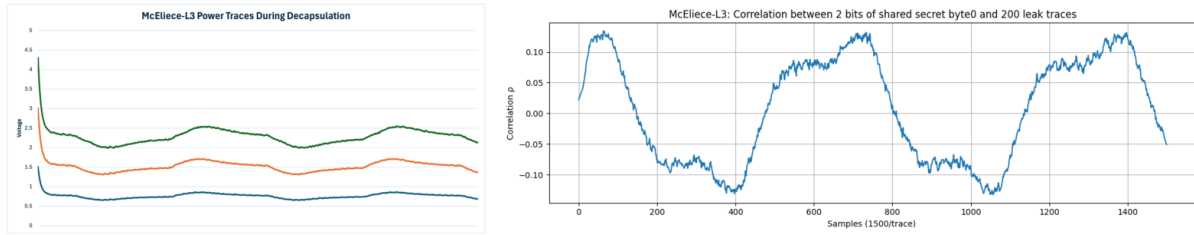


Figure 2: McEliece Power Traces and Correlation Coefficient Graphs.

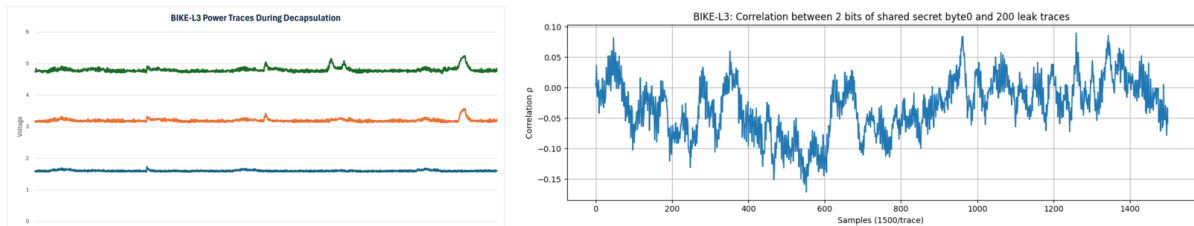


Figure 3: BIKE Power Traces and Correlation Coefficient Graphs.

To highlight the above conclusions, some well known classifiers were recruited to evaluate the accuracy in predicting valuable secret information. To train the models, the samples from each trace were used as the features X , while the secret bits from the shared session key were used as the labels Y . The models were configured to use the 80% of the traces dataset for training and the rest for testing their performance. After running the models, the produced data are represented in Tab. 3. In particular, we can see that there is a notable probability of predicting the bit 1, which is higher than a raw guess. In addition, bit 1 is more likely to be predicted than bit 0 due to higher voltage spikes that are equivalent to the logical bit 1. In general, the McEliece cryptosystem appears to leak scalable information, where the F1 score is constantly greater than 0.65. Note that considering the probability of simply guessing the value of a bit,

all the classifiers appear to perform 25% better than the simple guess. As far as predicting more than one bit, the models behave in the same manner. For example, in terms of attacking the McEliece, at the same Tab. 3 we can observe that the prediction of two bits, such as the 10, is at least 40% greater than the simple guess, namely 25%.

Classifier	Class bit 0 F1	Class bit 1 F1	Accuracy
kNN(vs McEliece)	0.57	0.67	0.63
Random Forest(vs BIKE)	0.53	0.65	0.60
Linear SVM(vs McEliece/BIKE)	0.47/0.60	0.68 /0.60	0.60/0.60
	Recall	F1	Accuracy
Linear SVM(vs McEliece bits 10)	0.43	0.35	0.33

Table 1: Single Bit Prediction Using Only 250 Traces During Decapsulation.

4 Conclusions and Future Work

The null hypothesis, along with the SPA, was used to evaluate electromagnetic emissions of code-based post-quantum cryptosystems utilizing trivial equipment with low resolution capabilities. The results indicate that there is a correlation between the captured power traces and secret bits. Variations in the observed waveforms are consistent with the predicted leakage model, suggesting the presence of secret-dependent information. To mitigate these phenomena, several countermeasures have been studied, focusing on masking the cryptographic operation during the decapsulation. Hence, performing an attack based on SPA, using the paper’s low cost setup, would be a challenging effort to evaluate the masking countermeasures. Furthermore, the Hamming Quasi-Cyclic (HQC) KEM, selected by the NIST as another quantum resistant code-based standard mechanism, was not included in the current experiment because it is not part of the OQS, and consequently, suggesting a promising study.

References

- [1] Brett Myers, Kevin R Murphy, and Allen Wolach. *Statistical power analysis: A simple and general model for traditional and modern hypothesis tests*. Routledge, 2010.
- [2] Peizhou Gan et al. “Classic McEliece hardware implementation with enhanced side-channel and fault resistance”. In: *Cryptology ePrint Archive* (2024).
- [3] Christiane Peters. “Information-set decoding for linear codes over F_q ”. In: *International Workshop on Post-Quantum Cryptography*. Springer. 2010, pp. 81–94.
- [4] Brice Colombier et al. “Profiled side-channel attack on cryptosystems based on the binary syndrome decoding problem”. In: *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 17 (2022), pp. 3407–3420.
- [5] H Gregor Molter et al. “A simple power analysis attack on a McEliece cryptoprocessor”. In: *Journal of Cryptographic Engineering* 1.1 (2011), pp. 29–36.
- [6] *Collect Data for Keyword Spotting - Raspberry Pi Pico - Edge Impulse Documentation* — docs.edgeimpulse.com. <https://docs.edgeimpulse.com/projects/expert-network/collect-data-keyword-spotting-raspberry-pi-pico>. [Accessed 27-04-2026].
- [7] Ian Hussey. “A systematic review of null hypothesis significance testing, sample sizes, and statistical power in research using the Implicit Relational Assessment Procedure”. In: *Journal of Contextual Behavioral Science* 29 (2023), pp. 86–97.
- [8] Paul Bottinelli and Joppe W Bos. “Computational aspects of correlation power analysis”. In: *Journal of Cryptographic Engineering* 7.3 (2017), pp. 167–181.

ΨΗΦΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ ΓΕΝΕΩΝ:

Πώς η τεχνολογία επηρεάζει κάθε γενιά

Νικολαΐδου Αναστασία, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο
Πελοποννήσου, Τρίπολη, anastasianikol111@gmail.com

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία θα αναλυθεί το θέμα της Διάδρασης Ανθρώπου-Μηχανής στο κομμάτι της εξέλιξης της τεχνολογίας και πώς μπορεί να επηρεάσει διαφορετικές ηλικιακές ομάδες. Η ραγδαία ανάπτυξη της έχει προκαλέσει ένα μεγάλο χάσμα μεταξύ της νέας γενιάς και της τρίτης ηλικίας. Στόχος της εργασίας είναι η επισήμανση του προβλήματος και η ανάδειξη της ανάγκης για ψηφιακή συμπερίληψη σε όλες τις ηλικιακές ομάδες, καθώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας το χάσμα αυτό θα μεγαλώνει όσο η τεχνολογία εξελίσσεται ταχύρρυθμα, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα στους νέους καθώς και στις παλαιότερες γενιές.

1 Εισαγωγή

Στη μοντέρνα εποχή έχει παρατηρηθεί ένα ιδιαίτερα μεγάλο φαινόμενο το οποίο είναι η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, καθώς και η γρήγορη ένταξή στη ζωή μας έχει αλλάξει ριζικά τον πολιτισμό μας, την ανθρώπινη επικοινωνία και οικονομία. Λόγω της ανόδου των υπολογιστών καθώς και τον κινητών συσκευών την τελευταία 20ετία, η καθημερινότητα μας έχει γίνει απλούστερη προσφέροντας ταχύτερη επικοινωνία. Παράλληλα, η εξάπλωση του διαδικτύου και της τεχνητής νοημοσύνης, παρέχει πρόσβαση στην ενημέρωση, στην εκπαίδευση και στην ψυχαγωγία σε όλες τις κοινωνικές ομάδες. Σύμφωνα με μελέτες από την πηγή [1], από το 2004 μέχρι σήμερα η χρήση του Internet στα νοικοκυριά έχει εκτοξευθεί στο 94% στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ενώ στην Ελλάδα μόνο το 89% των νοικοκυριών να είναι συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο. Επιπλέον σύμφωνα με την [2], το 87% των νέων ηλικίας από 16 έως 29 ετών χρησιμοποίησε εργαλεία παραγωγικής τεχνητής νοημοσύνης σημειώνοντας υψηλότερο ποσοστό από τον μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ωστόσο, αυτή η πρόοδος έχει σταθεί εμπόδιο στην επικοινωνία μεταξύ των νέων και των μεγαλύτερων ηλικιακών ομάδων, δημιουργώντας το φαινόμενο του Ψηφιακού Χάσματος Γενεών. Το χάσμα αυτό δεν αφορά μόνο την πρόσβαση, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικές ηλικιακές ομάδες αντιλαμβάνονται και επικοινωνούν με τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα, θέτοντας νέες προκλήσεις στον σχεδιασμό της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής. Στην αναφορά αυτή αναλύονται τα αίτια για την δημιουργία του χάσματος αυτού, οι επιπτώσεις που προκαλούνται για όλες τις ηλικιακές ομάδες καθώς και προτεινόμενες λύσεις μέσω σχεδιασμού Επικοινωνίας Ανθρώπου-Μηχανής (HCI) και κοινωνικών παραγόντων ώστε να περιορίσουμε το φαινόμενο αυτό.

2 Γιατί θεωρείται πρόβλημα το Ψηφιακό Χάσμα γενεών?

Το ψηφιακό χάσμα γενεών ορίζεται ως το κενό που δημιουργείται ανάμεσα σε δύο κοινωνικές ομάδες, τους ψηφιακούς μετανάστες δηλαδή τις γενιές χωρίς επαφές με την νέα τεχνολογία και ψηφιακούς αυτόχθονες, τις μεταγενέστερες γενιές που μεγάλωσαν στην αρχή της ψηφιακής εποχής.

Σύμφωνα με την πηγή [3] το 2023, το 44% του πληθυσμού στην Ευρωπαϊκή Ένωση, δηλώνει ότι υστερεί από βασικές γνώσεις πάνω στον ψηφιακό τομέα. Το νούμερο αυτό όχι μόνο είναι εκπληκτικό αλλά δημιουργεί και την απορία, πώς ένα μεγάλο κομμάτι του πληθυσμού αντιμετωπίζει δυσκολίες με την χρήση και την κατανόηση των νέων αυτών τρόπων ζωής;

2.1 Αίτια χάσματος γενεών

Συνήθως τα αίτια για το χάσμα αυτό είναι πολύπλευρα, καθώς και οι δύο κοινωνικές ομάδες έχουν διαφορετική προσέγγιση και προσαρμογή σε γρήγορες αλλαγές. Σε συνδυασμό με την πηγή [4], εστιάζοντας αρχικά στις μεγαλύτερες ηλικιακές γενιές, οι κυριότεροι παράγοντες δυσκολίας είναι οι εξής:

- **Ανασφάλεια και φόβος του λάθους:** Οι μεγαλύτεροι δεν καταλαβαίνουν πώς πρέπει να κινηθούν σε ένα τέτοιο περιβάλλον, έτσι προκαλείται ο φόβος για πρόκληση βλάβης στην συσκευή τους, δημιουργώντας μία προσεκτική και συνήθως αρνητική σχέση με την χρήση ψηφιακών συσκευών.
- **Αντίσταση στην καινοτομία:** Λόγω των παλαιότερων στερεοτυπικών αντιλήψεων, οι μεγαλύτεροι συνήθως δυσκολεύονται να συμβαδίσουν με τις κοινωνικές και τεχνολογικές μεταβολές στην κοινωνία. Αυτό τους κάνει καχύποπτους και διστακτικούς στην αποδοχή μιας καινούργιας εποχής από εκείνη που γνώριζαν. Αντιθέτως, η νέα γενιά είναι πιο δεκτική στις νέες προσαρμογές, καθώς από την φύση του επιδιώκουν την αλλαγή ελπίζοντας για μια καλύτερη και πιο ισορροπημένη κοινωνία.
- **Φθορά μνήμης και αισθήσεων (ακοή, όραση, κλπ) λόγω της γήρανσης:** Όσο μεγαλώνουμε αρχίζουν να εμφανίζονται οι πρώτες αλλοιώσεις στις αισθήσεις μας και την μνήμη. Οι αλλαγές αυτές όχι μόνο κάνουν την καθημερινότητα δυσκολότερη, αλλά επηρεάζουν άμεσα τον ρυθμό με τον οποίο ο εγκέφαλος επεξεργάζεται νέες, σύνθετες πληροφορίες, καθιστώντας την προσαρμογή στις σύγχρονες διεπαφές (interfaces) ιδιαίτερα απαιτητική.
- **Υπερβολική Εξάρτηση από Αυτοματοποιημένες Διεπαφές:** Λόγω της καθημερινής χρήσης του διαδικτύου και της τεχνητής νοημοσύνης, οι μεταγενέστερες γενιές προτιμούν την γρήγορη απάντηση σε ένα πρόβλημα, αντί να ψάξουν την επίλυση. Έτσι ο τρόπος σκέψης και αντίληψης πληροφοριών μεταξύ των δύο γενεών διαφέρει σημαντικά, συντελώντας στον διχασμό μεταξύ τους.

2.2 Συνέπειες χάσματος γενεών

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα αίτια αυτά όχι μόνο μεγαλώνουν την απόσταση μεταξύ των δυο κοινωνικών ομάδων, δημιουργούν σημαντικές συνέπειες που επηρεάζουν και αυτές καθώς και την κοινωνία μας σε μεγάλο βαθμό. Για παράδειγμα:

- **Περιορισμός των μεγαλύτερων γενεών στην καριέρα τους:** Η τεχνολογία έχει ενταχθεί σε κάθε πτυχή της ζωής μας. Ορισμένα επαγγέλματα αρχίζουν να ψηφιοποιούνται κάνοντας την πιο εύκολη και αποδοτική. Όμως χωρίς την σωστή εκπαίδευση, οι μεγαλύτερες γενιές δυσκολεύονται να αποδώσουν σε αυτήν, κάνοντας την επαγγελματική τους ζωή απαιτητική.
- **Αποκλεισμός ηλικιωμένων από κρατική μέριμνα:** Με την ψηφιοποίηση της γραφειοκρατίας, στην περίπτωση των ηλικιωμένων θεωρείται ακόμα μεγαλύτερη

ταλαιπωρία από την φυσική εξυπηρέτηση. Συνεπώς οι ηλικιακά μεγαλύτερες κοινωνικές ομάδες αποκλείονται από κρατικές επιδοτήσεις και άλλα προνόμια που πιθανόν να δικαιούνται.

- **Κοινωνική Απομόνωση:** Η μετατόπιση της κοινωνικής ζωής και της ενημέρωσης σε ψηφιακές πλατφόρμες αποκόπτει τους μη εξοικειωμένους χρήστες από το κοινωνικό γίγνεσθαι, ενισχύοντας το αίσθημα της μοναξιάς και της περιθωριοποίησης και του φόβου της τεχνολογίας.
- **Έλλειψη βασικών κοινωνικών και πνευματικών δεξιοτήτων:** Οι νεότερες ηλικίες χρησιμοποιούν τις κινητές τους συσκευές σε καθημερινή βάση στο σημείο που συχνά αναπτύσσουν εξάρτηση με συνέπεια την έλλειψη βασικών δεξιοτήτων, δημιουργικότητας, κοινωνικής ευαισθητοποίησης, εμφανίζοντας αρνητικές σχέσεις με τον φυσικό κόσμο. Επίσης τις κάνει ευάλωτες στους κινδύνους του διαδικτύου.
- **Εμφάνιση μαθητικών δυσκολιών και προκλήσεων:** Με την ανάπτυξη και την διαρκώς χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, οι μαθητές εκδηλώνουν σε βασικά μαθήματα τους, μαθησιακές δυσκολίες καθώς και μπορεί να τις επιδεινώσουν. Την ίδια στιγμή, η άνοδος των social media περιορίζει τη διάρκεια της προσοχής τους και μειώνει τη διάθεση τους για δημιουργικότητα και δραστηριότητες στην πραγματική ζωή.

3 Προτεινόμενη Λύση

Όμως τα προβλήματα που αναφέρθηκαν μπορούν να αντιμετωπιστούν, ώστε κενό μεταξύ των γενεών να καταπολεμηθεί. Στην παρούσα ενότητα, σύμφωνα με την πηγή [5], προτείνονται λύσεις που εστιάζουν σε δύο κεντρικούς άξονες: την επιστήμη της Επικοινωνίας Ανθρώπου-Μηχανής (HCI) και τον κοινωνικό/κρατικό ρόλο.

3.1 Λύσεις με επίκεντρο την Επικοινωνία Ανθρώπου-Μηχανής

- **Ένταξη μενού προσβασιμότητας:** Για να κάνουμε την τεχνολογία πιο προσβάσιμη στο μεγαλύτερο κοινό, πρέπει ο σχεδιασμός των εφαρμογών να στοχεύει προς την κάλυψη των ιδιαίτερων αναγκών των ατόμων αυτών, που άλλωστε αποτελούν και ένα πολύ μεγάλο μέρος του κοινού που απευθύνονται, όπως αναφέρεται και στην πηγή [5].
- **Προώθηση της χρήσης των Voice user Interfaces (VUI) και των βοηθών Τεχνητής Νοημοσύνης:** Με την χρήση των Voice User Interfaces (VUI) και των των βοηθών Τεχνητής Νοημοσύνης, οι μεγαλύτεροι ηλικιακά χρήστες θα μπορούν να εκτελούν ευκολότερα βασικές, όπως η πραγματοποίηση μιας κλήσης, η αναζήτηση για πληροφόρηση και πολλά. Έτσι οι χρήστες αυτοί θα έχουν μία πιο θετική σχέση με την τεχνολογία.
- **Ανάπτυξη εφαρμογών για την εκπαίδευση πλοήγησης συσκευών:** Όπως προαναφέρθηκε, οι ηλικιωμένοι φοβούνται να προσπαθήσουν ώστε να μην κάνουν λάθος. Με την δημιουργία εφαρμογών σε δοκιμαστικό περιβάλλον προσομοίωσης (sandbox approach) οι ηλικιωμένοι θα έχουν ομαλότερη και γρηγορότερη εξοικείωση, με την τεχνολογία αφής χωρίς τον φόβο του λάθους. Επιπλέον τα λογισμικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από άτομα νεαρής ηλικίας ως πρώτη επαφή στον ψηφιακό τομέα.

3.2 Λύσεις με επίκεντρο τον ρόλο της κοινωνίας και του κράτους

- **Ένταξη νέων τεχνολογιών στην διδασκαλία:** Με την χρήση διαδραστικών και εκπαιδευτικών εφαρμογών, η μάθηση στα σχολεία θα μπορέσει να γίνει ευκολότερη, διαδραστική και επιμορφωτική, τραβώντας την προσοχή των μαθητών.
- **Ενίσχυση στο μάθημα της Πληροφορικής στα σχολεία:** Επέκταση των προγραμμάτων εκπαίδευσης και τακτική ανανέωση του εκπαιδευτικού υλικού, με βάση τις τελευταίες αλλαγές της τεχνολογίας. Είναι απαραίτητο να επισημαίνονται και οι κίνδυνοι, χωρίς να δημιουργείται αδικαιολόγητη ανησυχία αλλά ευαισθητοποίηση.
- **Θέσπιση εναλλακτικών, μη ψηφιακών επιλογών εξυπηρέτησης (Υβριδικό Μοντέλο):** Για τη διασφάλιση της ισότητας και την προστασία των μεγαλύτερων γενεών, είναι απαραίτητο το κράτος να διατηρεί εναλλακτικές, μη ψηφιακές επιλογές για την πρόσβαση σε κοινωνικά επιδόματα και κρατικές παροχές.

4 Συμπεράσματα

Η τεχνολογία έχει εξελιχθεί ραγδαία δίνοντας καινούργιες δυνατότητες και ευκολίες στην καθημερινή μας ζωή. Παράλληλα δημιούργησε το κοινωνικό φαινόμενο του ψηφιακού χάσματος γενεών μεταξύ των νέων κοινωνικών ομάδων, των νέων και των μεγαλύτερων. Οι μεγαλύτερες ηλικίες είναι τα άτομα που δυσκολεύονται στην προσαρμογή και την πλοήγηση τους στην τεχνολογική εποχή λόγω του φόβου, της ανασφάλειας και την αντίσταση τους στην αλλαγή καθώς και στις σωματικές αλλοιώσεις που εμφανίζονται στην τρίτη ηλικία. Αντιθέτως, οι νέες γενιές δεν εμφανίζεται δυσκολία στην πλοήγηση και χρήση των νέων τεχνολογιών όμως η υπερβολική χρήση από αυτή καθώς τους καθιστά εξαρτημένους σε αυτή. Με αποτέλεσμα, η κοινωνία μας να θέτει άτομα σε αβεβαιότητα και φόβο στερώντας τους το αίσθημα της σταθερότητας σε έναν κόσμο που αλλάζει ραγδαία και δεν προλαβαίνουν να προσαρμοστούν καθώς και νέους με σοβαρές μαθησιακές και κοινωνικές ελλείψεις.

Το Ψηφιακό χάσμα γενεών δεν είναι εύκολο να εξαλειφθεί αλλά μπορεί να περιοριστεί. Ο σχεδιασμός εφαρμογών μπορεί να δώσει περισσότερη έμφαση στην συμπερίληψη όλων των κοινωνικών ομάδων, αξιοποιώντας λειτουργίες προσβασιμότητας σε εφαρμογές και προγράμματα, την χρήση και βοηθών τεχνητής νοημοσύνης και στην ανάπτυξη εκπαιδευτικών εφαρμογών και λογισμικών για την χρήση κινητών και μοντέρνων τεχνολογιών. Επίσης η κοινωνία και το κράτος μπορεί να βοηθήσει προωθώντας την εκπαίδευση και την ένταξη της τεχνολογίας στην σχολεία μας καθώς και προσφέροντας εναλλακτικές για τις ομάδες που δεν παρέχουν ψηφιακές δεξιότητες ή υποδομές, ώστε να μην αποκλείονται από δικαιώματα και οικονομικές ενισχύσεις και παροχές από το κράτος.

5 Αναφορές

- [1] <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/33472.pdf>
- [2] <https://www.greeceinfofigures.com/data-insights/ellada-87-ton-neon-khresimopoiei-ergaleia-tekhnetes-noemosunes/>
- [3] <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/108644.pdf?v=7047174854482269>
- [4] <https://filol.gr/files/sxediagrammata/65-xasma-genewn-sxediagramma.pdf>
- [5] <https://homodigitalis.gr/posts/131004/>

Σχεδιασμός και υλοποίηση ενσωματωμένου συστήματος για την παρακολούθηση διαδρομών αστικών λεωφορειογραμμών

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

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Η εργασία παρουσιάζει το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ενσωματωμένου συστήματος πληροφόρησης επιβατών για αστικές συγκοινωνίες, συμβατό με το δίκτυο τηλεματικής του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (ΟΑΣΑ). Η συνεισφορά δεν είναι η εφεύρεση νέου τύπου συστήματος, αλλά η παροχή λειτουργικότητας ισάξιας με εμπορική πινακίδα τηλεματικής με κλάσμα του κόστους, στοχεύοντας στις ~6.500 στάσεις που παραμένουν χωρίς κάλυψη στην Αθήνα. Ο πυρήνας του συστήματος αποτελείται από έναν μικροελεγκτή ESP32-S3 και δύο οθόνες LED matrix τύπου HUB75 που σχηματίζουν επιφάνεια απεικόνισης 192×48 pixel. Το λογισμικό αναπτύχθηκε στο ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) και περιλαμβάνει ενσωμάτωση με το δημόσιο API (Application Programming Interface) τηλεματικής του ΟΑΣΑ, web διεπαφή παραμετροποίησης μέσω browser, προσαρμοσμένη γραμματοσειρά pixel-by-pixel βάσει των φυσικών πινακίδων ΟΑΣΑ, και σύστημα αυτόματης ανανέωσης δεδομένων. Η αρχιτεκτονική επιτρέπει επέκταση σε άλλους φορείς συγκοινωνιών που διαθέτουν δημόσιο API τηλεματικής, όπως ο ΟΑΣΘ στη Θεσσαλονίκη.

Λέξεις κλειδιά: αστικές συγκοινωνίες, πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο, ενσωματωμένα συστήματα, ESP32, LED matrix, τηλεματική ΟΑΣΑ

1 Εισαγωγή

Οι αστικές συγκοινωνίες αποτελούν τη βασική ραχοκοκαλιά της καθημερινής μετακίνησης σε κάθε σύγχρονη μητρόπολη. Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος των αστικών λεωφορείων, καθώς αποτελούν έναν από τους πιο εύκολους και οικονομικούς τρόπους διασύνδεσης σημείων εντός του αστικού ιστού. Ωστόσο, η κίνησή τους στον αστικό ιστό τα αφήνει ευάλωτα στις ίδιες συνθήκες με κάθε άλλο όχημα: κυκλοφοριακή συμφόρηση, οδικά έργα και καιρικά φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν αποκλίσεις από το θεωρητικό χρονοδιάγραμμα. Αντίθετα με τα μέσα σταθερής τροχιάς που κινούνται σε ελεγχόμενο περιβάλλον, ο επιβάτης λεωφορείου χωρίς πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο δεν είναι σε θέση να γνωρίζει αν το επόμενο όχημα θα φτάσει σε λίγα λεπτά ή μισή ώρα αργότερα, με αποτέλεσμα άγχος, σπατάλη χρόνου ή ακύρωση της μετακίνησης.

Η σημασία της πληροφόρησης έχει τεκμηριωθεί στη βιβλιογραφία: οι επιβάτες αντιλαμβάνονται τον χρόνο αναμονής ως 1,2 έως 4,4 φορές μεγαλύτερο του πραγματικού [1], ενώ η εγκατάσταση δυναμικών πινακίδων μειώνει την αντιληπτή διάρκεια αναμονής κατά περισσότερο από 20% [2]. Παρά τη διαθεσιμότητα της τεχνολογίας, η πλήρης κάλυψη δικτύου παραμένει σπάνια: η TfL (Transport for London) γνωρίζει ότι οι πινακίδες Countdown καλύπτουν μόλις το 13% των στάσεων της [3]. Στην Αθήνα, το σύστημα τηλεματικής ΟΑΣΑ λειτουργεί από το 2016 [4] και παρέχει δεδομένα για το σύνολο των στάσεων [5], αλλά μόλις ~1.000 από τις 7.500 στάσεις διαθέτουν φυσική πινακίδα [6].

Η παρούσα εργασία δεν παρουσιάζει νέο τύπο συστήματος πληροφόρησης — τέτοια συστήματα υπάρχουν ήδη. Η πρωτότυπη συνεισφορά είναι η παροχή εξαιρετικά χαμηλού κόστους εναλλακτικής για τις ~6.500 στάσεις που παραμένουν χωρίς κάλυψη, αξιοποιώντας το δημόσιο API τηλεματικής [7] και εμπορικά εξαρτήματα. Επιπλέον, η λογική ανάκτησης δεδομένων είναι απομονωμένη στο επίπεδο API, ώστε το σύστημα να μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιονδήποτε φορέα συγκοινωνίας που διαθέτει αντίστοιχο δημόσιο API, όπως ο ΟΑΣΘ στη Θεσσαλονίκη. Η δομή της εργασίας: η Ενότητα 2 περιγράφει το πρόβλημα, η Ενότητα 3 το υλικό, η Ενότητα 4 το λογισμικό, η Ενότητα 5 την αξιολόγηση, και η Ενότητα 6 τα συμπεράσματα.

2 Περιγραφή Προβλήματος

2.1 Εμπειρία επιβάτη και κενό κάλυψης

Η επίδραση της αναμονής σε στάση χωρίς ζωντανή πληροφόρηση στη ψυχολογία των επιβατών έχει μελετηθεί εκτενώς. Η μελέτη των Mis/al. [8] ποσοτικοποίησε την υπερεκτίμηση χρόνου αναμονής σε στάσεις χωρίς πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, ενώ οι Wat/al. [9] διαπίστωσαν ότι ο μέσος επιβάτης που χρησιμοποιεί στατικές πηγές

αντιλαμβάνεται την αναμονή ως 15% μεγαλύτερη της πραγματικής. Οι D/an & K/off [2] έδειξαν ότι δυναμικές πινακίδες αποδίδουν ισοδύναμη ικανοποίηση με μείωση αναμονής από 10 σε 8 λεπτά, που ωστόσο αποτελεί πολύ πιο κοστοβόρα προσέγγιση. Η σημασία αυτή πολλαπλασιάζεται για ηλικιωμένους, άτομα με κινητικές δυσκολίες και τουρίστες χωρίς τοπική σύνδεση δεδομένων, οι οποίοι δεν μπορούν να αξιοποιήσουν εφαρμογές κινητού ως εναλλακτική.

Παρά τη διαθεσιμότητα δεδομένων πραγματικού χρόνου από το 2016, μόλις ~1.000 από τις 7.500 στάσεις του δικτύου ΟΑΣΑ διαθέτουν φυσική πινακίδα πληροφόρησης. Οι εναλλακτικές λύσεις που προωθεί ο ΟΑΣΑ (QR codes και εφαρμογή κινητού) προϋποθέτουν smartphone και ενεργή σύνδεση δεδομένων, αποκλείοντας σημαντικές κατηγορίες επιβατών. Η εφαρμογή στο τηλέφωνο δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τη φυσική πινακίδα, ειδικά όταν η ορατή πληροφορία είναι ζητούμενο.

3 Υλικό (Hardware)

3.1 Επισκόπηση συστήματος

Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη των ενσωματωμένων συστημάτων (embedded systems) και η μείωση κόστους εξαρτημάτων όπως τα LED matrix panels και οι μικροελεγκτές με ενσωματωμένο WiFi καθιστούν πλέον τεχνικά εφικτή την κατασκευή λειτουργικής πινακίδας ενημέρωσης επιβατών με χαμηλό κόστος. Το σύστημα που υλοποιήθηκε αποτελείται από τέσσερις βασικές μονάδες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Ως κεντρική μονάδα ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής **ESP32-S3-DEV-KIT-N16R8-M** [10] με διπύρηνo επεξεργαστή Xtensa LX7 στα 240 MHz, ενσωματωμένο WiFi 2.4 GHz, 16 MB Flash και 8 MB PSRAM (Pseudo-Static RAM) [11]. Η μεγάλη PSRAM είναι κρίσιμη για την ταυτόχρονη λειτουργία double buffering οθόνης και TLS (Transport Layer Security) επικοινωνίας, όπως αναλύεται στην Ενότητα 4. Ο μικροελεγκτής διαθέτει επαρκή αριθμό GPIO (General Purpose Input/Output) pins για τη σύνδεση HUB75 (τυποποιημένη διεπαφή 16 pins για RGB LED matrix οθόνες), η οποία απαιτεί 14 ξεχωριστά σήματα.

Για την εμφάνιση των δεδομένων αξιοποιήθηκαν δύο πανομοιότυπες οθόνες **Waveshare RGB-Matrix-P2.5-96×48-F** [12] συνδεδεμένες σε daisy-chain μέσω HUB75, σχηματίζοντας συνολική επιφάνεια 192×48 pixel που επιτρέπει την ταυτόχρονη παρουσίαση δύο δρομολογίων με πληροφορίες στάσης και ώρας. Η τροφοδοσία παρέχεται από τροφοδοτικό 5V/10A [13] με επαρκές περιθώριο ισχύος.

Εξάρτημα	Ποσότητα	Κόστος (€)
ESP32-S3-DEV-KIT-N16R8-M	1	10,97
Waveshare RGB-Matrix-P2.5-96×48-F	2	90,83
Τροφοδοτικό 5V 10A	1	20,00
Breadboards & καλώδια	—	7,42
Σύνολο		129,22

Πίνακας 1: Ανάλυση κόστους εξαρτημάτων

4 Λογισμικό (Software)

4.1 Περιβάλλον ανάπτυξης και αρχιτεκτονική μνήμης

Η ανάπτυξη έγινε στο **ESP-IDF v5.5.4** [14] με `arduino-esp32` [15] ως component, επιτρέποντας τη διατήρηση υπάρχοντος κώδικα Arduino (γραμματοσειρά, renderer, λογική οθόνης) ενώ παράλληλα αξιοποιούνται χαμηλού επιπέδου δυνατότητες που δεν είναι διαθέσιμες στο Arduino IDE. Η κεντρική αρχιτεκτονική πρόκληση ήταν η ταυτόχρονη λειτουργία της οθόνης HUB75 και της κρυπτογραφημένης επικοινωνίας με το API του ΟΑΣΑ εντός των περιορισμένων πόρων του μικροελεγκτή.

Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το framebuffer DMA (Direct Memory Access) της οθόνης (147 KB για double buffering) πρέπει υποχρεωτικά να βρίσκεται στην εσωτερική DRAM (Dynamic RAM), καθώς ο DMA controller δεν έχει πρόσβαση στην εξωτερική PSRAM. Ταυτόχρονα, η βιβλιοθήκη κρυπτογράφησης mbedTLS για τις κλήσεις HTTPS απαιτεί και αυτή εκατοντάδες KB. Η λύση που υιοθετήθηκε ήταν η κατεύθυνση των TLS session buffers στην PSRAM μέσω ρύθμισης του ESP-IDF, αφήνοντας τη DRAM αποκλειστικά διαθέσιμη για το framebuffer. Αυτή η διαχείριση μνήμης δεν ήταν εφικτή μέσω του Arduino IDE, που αποτέλεσε και τον βασικό λόγο μετάβασης στο ESP-IDF. Επιπλέον, το ESP-IDF παρέχει NVS (Non-Volatile Storage) για μόνιμη αποθήκευση διαπιστευτηρίων WiFi, WPA2-Enterprise authentication, και πλήρη έλεγχο του FreeRTOS scheduler.

Οι γλώσσες που χρησιμοποιήθηκαν είναι C++ για τη λειτουργικότητα και HTML5/CSS3/JavaScript για το Web UI. Χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες **ESP32-HUB75-MatrixPanel-I2S-DMA** [16] για τη διαχείριση HUB75 μέσω DMA, **Adafruit GFX** για γεωμετρικές πράξεις, **ArduinoJson** [17] για αποσειριοποίηση JSON (JavaScript Object Notation), και **arduino-esp32** που παρέχει WiFi, WebServer, HTTPClient και WiFiClientSecure.

4.2 Οθόνη και προσαρμοσμένη γραμματοσειρά

Η οθόνη (192×48 px) χωρίζεται σε τρεις οριζόντιες ζώνες: κεφαλίδα (ΓΡΑΜΜΗ / ΔΙΑΔΡΟΜΗ / ΑΦΙΞΗ), δύο γραμμές δρομολογίων και κατώτατη γραμμή που περιέχει το όνομα της στάσης αριστερά και ρολόι NTP (Network Time Protocol) δεξιά. Τέσσερις παράμετροι της βιβλιοθήκης HUB75 βαθμονομήθηκαν για το συγκεκριμένο hardware:

η φάση ρολογιού I2S για σωστό timing, ο αριθμός κύκλων blanking για αποφυγή οπτικών artifacts κατά τη μεταβολή γραμμών, η ταχύτητα I2S στα 15 MHz για σταθερό refresh rate, και το double buffering για εξάλειψη του φαινομένου tearing.

Στόχος ήταν μια γραμματοσειρά με τη μεγαλύτερη δυνατή ομοιότητα με αυτή των πραγματικών οθονών τηλεματικής ΟΑΣΑ. Καθώς δεν βρέθηκε έτοιμη γραμματοσειρά που να συνδυάζει ελληνικούς χαρακτήρες με την επιθυμητή αισθητική, αναπτύχθηκε πλήρως προσαρμοσμένη γραμματοσειρά 347 χαρακτήρων (ψηφία, ελληνικά και λατινικά κεφαλαία, σύμβολα), σχεδιασμένη pixel-by-pixel. Κάθε χαρακτήρας σχεδιάστηκε σε ψηφιακό πλέγμα, αποθηκεύτηκε ως PNG και ψηφιοποιήθηκε αυτόματα μέσω Python script.

Το σύστημα σελιδοποίησης εμφανίζει 2 δρομολόγια ανά σελίδα. Ονόματα διαδρομών που δεν χωράνε κυλούν με βήμα 1 px/frame ανά 20 ms. Η μετάβαση στην επόμενη σελίδα γίνεται μετά από ≥ 2 κύκλους κύλισης ή 8.000 ms. Η ανανέωση δεδομένων από το API γίνεται αποκλειστικά μετά την ολοκλήρωση ολόκληρου κύκλου σελίδων, ώστε να μην διακόπτεται η ροή παρουσίασης.

4.3 Δικτύωση και API ΟΑΣΑ

Το σύστημα λειτουργεί ταυτόχρονα σε δύο WiFi modes. Ως AP (Access Point) εκπέμπει μόνιμα ενεργό δίκτυο (OASA-Matrix, oasa1234, 192.168.4.1), το οποίο παραμένει ενεργό ανεξάρτητα από την κατάσταση σύνδεσης, επιτρέποντας πρόσβαση στη σελίδα ρύθμισης /setup ακόμα και σε δίκτυα που δεν επιτρέπουν επικοινωνία μεταξύ συσκευών. Ταυτόχρονα, ως STA (Station) συνδέεται ως client στο δίκτυο WiFi του χρήστη για πρόσβαση στο ΟΑΣΑ API. Η σειρά εκκίνησης (AP πρώτα, web server έπειτα, STA τελευταίο) εξασφαλίζει ότι η σελίδα /setup είναι προσπελάσιμη αμέσως από το boot. Υποστηρίζεται WPA2-Enterprise (eduroam) μέσω PEAP/MSCHAPv2, με διαπιστευτήρια αποθηκευμένα στο NVS flash για επιβίωση επανεκκίνησης.

Η επικοινωνία με το telematics.oasa.gr γίνεται μέσω HTTPS, καθώς ο ΟΑΣΑ απορρίπτει μη κρυπτογραφημένα αιτήματα. Στο παρόν πρωτότυπο χρησιμοποιείται παράκαμψη επαλήθευσης πιστοποιητικού TLS. Αυτό είναι γνωστός περιορισμός που προβλέπεται να αντιμετωπιστεί σε μελλοντική έκδοση με ενσωμάτωση του πιστοποιητικού CA του ΟΑΣΑ. Αξιοποιούνται πέντε endpoints [7]: webGetLines, webGetRoutes, webGetStops, webRoutesForStop και getStopArrivals. Επειδή το getStopArrivals επιστρέφει μόνο εσωτερικούς κωδικούς διαδρομών, γίνεται αντιστοίχιση με τον πίνακα routeCache[] που φορτώνεται μία φορά ανά επιλεγμένη στάση. Ο browser αναλαμβάνει το JSON parsing και αποστέλλει τα επεξεργασμένα δεδομένα στον ESP32, εκφορτώνοντας την επεξεργαστική επιβάρυνση από τον μικροελεγκτή.

4.4 Web Server και Web UI

Ο web server (Arduino WebServer, port 80) εξυπηρετεί 18 endpoints σε τέσσερις κατηγορίες: στατικά assets από PROGMEM, control endpoints για τη διαχείριση κατάστασης οθόνης, OASA proxy endpoints που προωθούν streaming τις απαντήσεις της τηλεματικής στον browser, και WiFi endpoints για τη ρύθμιση δικτύου. Ο browser polling του /api/state κάθε 5 δευτερόλεπτα ανιχνεύει αλλαγές και συγχρονίζει browser και οθόνη αμφίδρομα. Η σελίδα /setup είναι αποθηκευμένη στο firmware, χωρίς εξάρτηση από CDN (Content Delivery Network), καθώς κατά τη ρύθμιση ο χρήστης είναι συνδεδεμένος στο AP του ESP32 χωρίς πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Το κύριο Web UI υλοποιείται ως single-page application με **Preact** (11 KB, συμβατό React API) αντί του πλήρους React (140 KB), για σημαντική μείωση αποτυπώματος flash και χρόνου φόρτωσης. Παρέχει αναζήτηση γραμμής/κατεύθυνσης/στάσης, προβολή αφίξεων με deduplication (μία άφιξη ανά γραμμή, η πρωιμότερη) και ζωντανή ανανέωση, expanded view με κωδικό οχήματος, δίγλωσση λειτουργία (ΕΛ/ΕΝ) με άμεση ανανέωση οθόνης, λειτουργία επίδειξης με προκαθορισμένα δεδομένα, και dark/light mode μέσω Bootstrap 5. Κατά τη διάρκεια fetch αιτημάτων εφαρμόζεται διαδοχική απενεργοποίηση στοιχείων διεπαφής για αποφυγή παράλληλων εντολών.

5 Αξιολόγηση

Η απόκριση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα του API τηλεματικής ΟΑΣΑ, το οποίο δεν παρέχει εγγυήσεις εξυπηρέτησης. Υπό ευνοϊκές συνθήκες δικτύου, ο χρόνος από την εκκίνηση έως την πρώτη εμφάνιση αφίξεων είναι περίπου 15 δευτερόλεπτα. Σε ώρες αιχμής, όπου το API εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό παράλληλων αιτημάτων, ο χρόνος αυτός μπορεί να φτάσει τα 5 λεπτά, που αποτελεί αδυναμία στην υποδομή του ΟΑΣΑ και όχι στο σύστημα. Οι βασικές μετρήσεις απόδοσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Μέτρηση	Τιμή
Χρόνος εκκίνησης έως πρώτη εμφάνιση (ευνοϊκές συνθήκες)	~15 s
Χρόνος εκκίνησης έως πρώτη εμφάνιση (ώρες αιχμής API)	έως 5 min
Ελάχιστο διάστημα αυτόματης ανανέωσης δεδομένων	10 s
Κύκλος σχεδίασης οθόνης	20 ms
Polling browser-ESP32	5 s

Πίνακας 2: Μετρήσεις απόδοσης συστήματος

6 Συμπεράσματα

Ο βασικός στόχος της εργασίας ήταν η κατασκευή αυτόνομης και οικονομικής πινακίδας αφίξεων αστικής συγκοινωνίας, συμβατής με τα δεδομένα πραγματικού χρόνου του ΟΑΣΑ, που να αναπαράγει αισθητικά και λειτουργικά τις φυσικές πινακίδες τηλεματικής. Το σύστημα ανταποκρίνεται στο σύνολο αυτών των απαιτήσεων με χαμηλό κόστος, αντιμετωπίζοντας το κενό κάλυψης των ~6.500 στάσεων χωρίς φυσική πινακίδα. Η αρχιτεκτονική είναι επεκτάσιμη: αντικαθιστώντας το επίπεδο API, το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιονδήποτε φορέα συγκοινωνίας που διαθέτει αντίστοιχο δημόσιο API τηλεματικής, όπως ο ΟΑΣΘ [18] στη Θεσσαλονίκη. Μελλοντικές επεκτάσεις περιλαμβάνουν πλήρη επαλήθευση πιστοποιητικού TLS, ηλιακή τροφοδοσία για αυτόνομη εγκατάσταση σε στάσεις, σχεδίαση PCB για εξωτερική χρήση, και ενσωμάτωση Text-to-Speech για βελτίωση προσβασιμότητας.

7 Αναφορές

- [1] Yingling Fan, Andrew Guthrie, and David Levinson. “Perception of Waiting Time at Transit Stops and Stations”. In: *Center for Transportation Studies, University of Minnesota* (2016). URL: https://nacto.org/wp-content/uploads/1_Fan-et-al-Perception-of-Waiting-Time-at-Transit-Stops-and-Stations_2015.pdf.
- [2] Katrin Dziekan and Karl Kottenhoff. “Dynamic At-Stop Real-Time Information Displays for Public Transport: Effects on Customers”. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41.6 (2007), pp. 489–501.
- [3] Transport for London. *Live Bus Arrivals*. <https://tfl.gov.uk/modes/buses/live-bus-arrivals>.
- [4] Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων. *Εφαρμογή της τηλεματικής και των «έξυπνων» στάσεων στα αστικά λεωφορεία και τρόλεϊ της Αττικής*. <https://www.government.gr/εφαρμογή-της-τηλεματικής-και-των-έξυ/>. Ανακοίνωση, 21 Μαρτίου 2016. 2016.
- [5] Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών. *Εργαλεία Τηλεματικής*. <https://telematics.oasa.gr/>.
- [6] ΟΑΣΑ. *Τηλεματική νέας γενιάς: Αναβαθμίζονται σε «έξυπνες» 7.500 στάσεις λεωφορείων και τρόλεϊ*. Δηλώσεις διευθύνοντος συμβούλου ΟΑΣΑ Γ. Σπηλιόπουλου στο ΑΠΕ-ΜΠΕ, αναδημοσίευση mononews.gr. 2023. URL: <https://www.mononews.gr/business/oasa-tilematiki-neas-genias-gia-tachiteri-metafora-dedomenon-anavathmizonte-se-exipnes-7-500-stasis>.
- [7] ΟΑΣΑ. *OASA Telematics API*. URL: <https://oasa-telematics-api.readthedocs.io/en/latest/>.
- [8] Rabi G. Mishalani, Mark R. McCord, and John Wirtz. “Passenger Wait Time Perceptions at Bus Stops: Empirical Results and Impact on Evaluating Real-Time Bus Arrival Information”. In: *Journal of Public Transportation* 9.2 (2006), pp. 89–106.
- [9] Kari Edison Watkins et al. “Where Is My Bus? Impact of Mobile Real-Time Information on the Perceived and Actual Wait Time of Transit Riders”. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45.8 (2011), pp. 839–848.
- [10] Waveshare. *ESP32-S3-DEV-KIT-N16R8-M: ESP32-S3 Development Board, 16MB Flash, 8MB PSRAM, with Pre-soldered Headers*. Διαθέσιμο μέσω Grobotronics. URL: <https://grobotronics.com/waveshare-esp32-s3-16mb.html>.
- [11] Espressif Systems. *ESP32-S3 Series Datasheet*. 2023. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf.
- [12] Waveshare. *RGB-Matrix-P2.5-96x48-F: Indoor RGB Full-Color LED Matrix Panel, 2.5mm Pitch, 96×48 Pixels*. Διαθέσιμο μέσω eBay. URL: <https://www.ebay.com/itm/255896872425>.
- [13] A-Store. *Τροφοδοτικό 5V 10A 50W*. a-store.gr. URL: https://www.a-store.gr/index.php?route=product/product&product_id=2872.
- [14] Espressif Systems. *ESP-IDF Programming Guide*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32s3/>.
- [15] Espressif Systems. *arduino-esp32: Arduino Core for the ESP32 Family of SoCs*. <https://github.com/espressif/arduino-esp32>.
- [16] mrcodetastic. *ESP32-HUB75-MatrixPanel-DMA: An Adafruit GFX Compatible Library for the ESP32, ESP32-S2, ESP32-S3 to Drive HUB75 LED Matrix Panels Using DMA*. <https://github.com/mrcodetastic/ESP32-HUB75-MatrixPanel-DMA>.
- [17] Benoît Blanchon. *ArduinoJson: A JSON Library for Arduino and Embedded C++*. <https://github.com/bblanchon/ArduinoJson>.
- [18] Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών Θεσσαλονίκης. *OASTH — Organization of Urban Transportation of Thessaloniki*. <https://www.oasth.gr/en/>.

Σύγχρονη κατασκευή μετωπιαίου άκρου ενός MINIC μεταγλωττιστή με παραγωγή ενδιάμεσης αναπαράστασης LLVM

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

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να παρουσιάσει πώς η κατασκευή ενός μετωπιαίου άκρου μεταγλωττιστή μπορεί να λειτουργήσει ως ολοκληρωμένο εκπαιδευτικό παράδειγμα σύνδεσης θεωρίας μεταγλωττιστών, εργαλείων λογισμικού και αρχών αντικειμενοστρεφούς σχεδίασης. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύσσεται ένα front end για τη γλώσσα MINIC, αξιοποιώντας τα εργαλεία flex και bison, το οικοσύστημα της C++ και το LLVM. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα μοτίβα σχεδίασης Composite, Singleton και Visitor. Παράλληλα, εξετάζεται η πρόκληση της αρχικοποίησης του περιβάλλοντος εκτέλεσης. Η ικανότητα παραγωγής ενδιάμεσης αναπαράστασης επιδεικνύεται μέσα από τον αναδρομικό υπολογισμό του αριθμού Fibonacci, αναδεικνύοντας τον μετασχηματισμό της θεωρίας σε λειτουργικό λογισμικό.

Λέξεις κλειδιά: Compiler Design, MINIC, LLVM IR, Design Patterns, Software Engineering, Object-Oriented Programming

1 Εισαγωγή

Η κατασκευή μεταγλωττιστών είναι από τα πιο απαιτητικά λογισμικά κατά την υλοποίησή τους, διότι συνδυάζουν θεωρητικές έννοιες με πρακτικές αποφάσεις υλοποίησης [3]. Υπάρχουν πολλά εργαλεία και γλώσσες προγραμματισμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά η επιλογή τους παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα, την αρχιτεκτονική και την επεκτασιμότητα του συστήματος.

Παρακάτω θα δοθεί έμφαση στα εργαλεία που αξιοποιήθηκαν για ένα μετωπιαίο άκρο της γλώσσας MINIC, στα αντικειμενοστρεφή μοτίβα σχεδίασης που οργάνωσαν τη δομή του μεταγλωττιστή, καθώς και στις τεχνικές προκλήσεις αρχικοποίησης του περιβάλλοντος εκτέλεσης στην ενδιάμεση αναπαράσταση LLVM IR. Τέλος, θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα που επιδεικνύει την ικανότητα του συστήματος να μετασχηματίζει πολύπλοκες δομές σε κώδικα χαμηλού επιπέδου.

2 Αρχιτεκτονική και Υλοποίηση

Τα χαρακτηριστικά που υλοποιήθηκαν επιτρέπουν την ανάπτυξη προγραμμάτων με βάση τις αρχές του διαδικαστικού προγραμματισμού. Υποστηρίζονται μεταβλητές απλών προσημασμένων ακεραίων και πραγματικών αριθμών, πλήθος τελεστών (αριθμητικοί, λογικοί, bitwise), δομές ελέγχου (*if*) και βρόχοι επανάληψης.

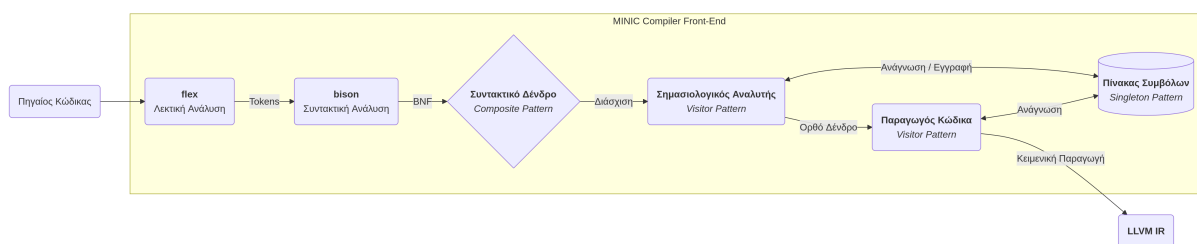
Για την ανάπτυξη χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία *flex* και *bison* [5], τα οποία συνεργάζονται άψογα για τη λεκτική και συντακτική ανάλυση (LALR(1)). Η σημασιολογική ανάλυση και η διαχείριση των δομών πραγματοποιήθηκαν με σύγχρονη C++ [7], η οποία προσφέρει έξυπνους δείκτες και αντικειμενοστρεφή χαρακτηριστικά. Τέλος, η παραγωγή κώδικα βασίζεται στο LLVM IR [2] μέσω κειμενικής παραγωγής, το οποίο προσφέρει μορφή στατικής απλής ανάθεσης (SSA) ευνοώντας μελλοντικές βελτιστοποιήσεις.

Κατά την ανάπτυξη, ενσωματώθηκαν συγκεκριμένα μοτίβα σχεδίασης [4] για να καταστήσουν τον κώδικα συντηρήσιμο και επεκτάσιμο:

- **Singleton:** Χρησιμοποιήθηκε για τον πίνακα συμβόλων, εξασφαλίζοντας ένα καθολικό σημείο πρόσβασης σε όλες τις φάσεις της μεταγλώττισης.
- **Composite:** Εφαρμόστηκε για το χτίσιμο του συντακτικού δένδρου. Κάθε συντακτικός κανόνας αποτελεί μια κλάση που κληρονομεί κοινά χαρακτηριστικά, επιτρέποντας την ομοιόμορφη διαχείριση απλών και σύνθετων κόμβων.
- **Visitor:** Υιοθετήθηκε για τον διαχωρισμό των λειτουργιών (π.χ. *Semantic Analyzer*, *IR Emitter*) από τη δομή του δένδρου. Έτσι, νέες αναλύσεις μπορούν να προστεθούν χωρίς να αλλοιωθούν οι κλάσεις των κόμβων.

Η εφαρμογή των σημασιολογικών κανόνων υλοποιείται μέσω του *TypeCheckerVisitor*, ο οποίος διασχίζει το συντακτικό δένδρο για να επιβάλει την ορθότητα των τύπων δεδομένων (type checking) [3, 1]. Κατά την ανάλυση των εκφράσεων, το σύστημα ελέγχει τη συμβατότητα των τελεστών: στους αριθμητικούς τελεστές εφαρμόζεται σιωπηρή μετατροπή τύπου (implicit promotion), όπου το αποτέλεσμα προάγεται σε *float* εάν έστω και ένας τελεστής είναι πραγματικός. Αντίθετα, οι τελεστές επιπέδου bit (bitwise) απαιτούν αυστηρά ακέραιους τελεστέους, ενώ οι λογικές πράξεις απορρίπτουν τύπους *void* και επιστρέφουν πάντα ακέραιο, λειτουργώντας ως boolean τιμές. Στις πράξεις ανάθεσης και στο πέρασμα παραμέτρων, ο αναλυτής είναι σχεδιασμένος να υποστηρίζει τόσο την προαγωγή (από *int* σε *float*) όσο και την αποκοπή (από *float* σε *int*), ακολουθώντας πιστά την καθιερωμένη συμπεριφορά της γλώσσας C. Σε κάθε περίπτωση σημασιολογικής ασυμφωνίας, το σύστημα αποτρέπει την παραγωγή κώδικα αναφέροντας διαγνωστικά μηνύματα.

Η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος και η ροή των δεδομένων ανάμεσα στις επιμέρους φάσεις του μετωπιαίου άκρου αποτυπώνονται σχηματικά στο Σχήμα 1. Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα, η διαδικασία οργανώνεται σε μια γραμμική αλυσίδα μετασχηματισμού, όπου τα εργαλεία *flex* και *bison* αναλαμβάνουν την αρχική ανάλυση, ενώ η εσωτερική δομή και οι visitors (*Semantic Analyzer*, *IR Emitter*) αλληλεπιδρούν με τον κεντρικό Πίνακα Συμβόλων για την τελική παραγωγή του LLVM IR.



Σχήμα 1: Αρχιτεκτονική και ροή φάσεων του μετωπιαίου άκρου του μεταγλωττιστή MINIC.

3 Προκλήσεις Υλοποίησης: Περιβάλλον Εκτέλεσης

Μία από τις κύριες προκλήσεις κατά τη μετάβαση από το συντακτικό δένδρο στην ενδιάμεση αναπαράσταση ήταν η διαχείριση και αρχικοποίηση του περιβάλλοντος εκτέλεσης, και ειδικότερα ο τρόπος που το LLVM IR αντιμετωπίζει τις καθολικές μεταβλητές.

Στη γλώσσα MINIC, επιτρέπεται η δήλωση και αρχικοποίηση καθολικών μεταβλητών. Ωστόσο, το LLVM IR [2] απαιτεί οι αρχικές τιμές των καθολικών μεταβλητών να είναι σταθερές (constants) στο επίπεδο της δήλωσης και δεν υποστηρίζει δυναμικές εκφράσεις (statements), δηλαδή πράξεις, προσθέσεις ή κλήσεις συναρτήσεων, ως τιμές αρχικοποίησης στο καθολικό scope.

Για να γεφυρωθεί αυτός ο περιορισμός της ενδιάμεσης γλώσσας με τη σημασιολογία της MINIC, υλοποιήθηκε ένας μηχανισμός αρχικοποίησης του περιβάλλοντος εκτέλεσης. Κατά την παραγωγή του IR, ο μεταγλωττιστής συλλέγει όλες τις δυναμικές αρχικοποιήσεις και κατασκευάζει αυτόματα μία κρυφή συνάρτηση με όνομα `@_init_globals()`. Η συνάρτηση αυτή εγγέται και καλείται πρώτη στην αρχή της `@main()`, μεταφέροντας τις αρχικοποιήσεις στο επίπεδο εκτέλεσης (runtime). Αυτό επιτεύχθηκε πρακτικά στη C++ χρησιμοποιώντας την κλάση `StringStream` [6], η οποία επιτρέπει την προσωρινή αλλαγή της ροής παραγωγής κώδικα μέχρι να ολοκληρωθεί η συγκέντρωση των αρχικοποιήσεων.

4 Παράδειγμα Παραγωγής Κώδικα LLVM IR

Για να επιδειχθεί η ικανότητα του μεταγλωττιστή να παράγει έγκυρο κώδικα LLVM IR από σύνθετες δομές, επιλέχθηκε ως παράδειγμα εισόδου ο αναδρομικός αλγόριθμος εύρεσης του ν-οστού αριθμού Fibonacci. Το παράδειγμα αυτό είναι διδακτικό διότι συνδυάζει κλήσεις συναρτήσεων, συνθήκες `if`, επιστροφή τιμών και αναδρομή.

Listing 1: Πηγαίος Κώδικας MINIC

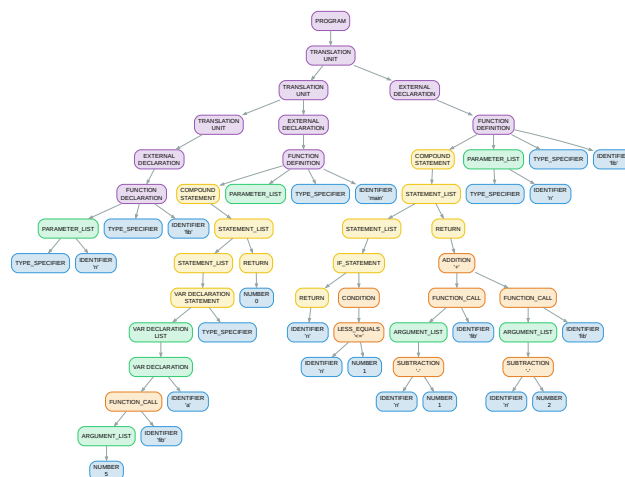
```
1 int fib(int n);
2
3 int main(void) {
4     int a = fib(5);
5     return 0;
6 }
7
8 int fib(int n) {
9     if (n <= 1) { return n; }
10    return fib(n - 1) + fib(n - 2);
11 }
```

Listing 2: Παραγόμενο LLVM IR

```
1 define i32 @fib(i32 %n) {
2     entry:
3         %n.addr = alloca i32, align 4
4         store i32 %n, i32* %n.addr
5         %0 = load i32, i32* %n.addr
6         %1 = icmp sle i32 %0, 1
7         %2 = zext i1 %1 to i32
8         %3 = icmp ne i32 %2, 0
9         br i1 %3, label %if_then_0, label %if_end_0
10    if_then_0:
11        %4 = load i32, i32* %n.addr
12        ret i32 %4
13    if_end_0:
14        %5 = load i32, i32* %n.addr
15        %6 = sub i32 %5, 1
16        %7 = call i32 @fib(i32 %6)
17        %8 = load i32, i32* %n.addr
18        %9 = sub i32 %8, 2
19        %10 = call i32 @fib(i32 %9)
20        %11 = add i32 %7, %10
21        ret i32 %11
22    }
23
24    define void @_init_globals() {
25        entry:
26            ret void
27    }
```

Παρατηρείται ότι η δομή ελέγχου μεταφράζεται ορθά μέσω εντολών `icmp` και διακλαδώσεων `br` στα αντίστοιχα labels (`if_then_0`, `if_end_0`), ενώ η αναδρομή αποτυπώνεται καθαρά με τις κλήσεις `call i32 @fib`. Φαίνεται επίσης και η συνάρτηση `@_init_globals()`, η οποία παράγεται αυτόματα για τη διαχείριση του περιβάλλοντος εκτέλεσης, έστω και κενή σε αυτή την περίπτωση.

Η εσωτερική ιεραρχική αναπαράσταση του προγράμματος, όπως αυτή χτίζεται από τη C++ μέσω του μοτίβου Composite, αποτυπώνεται στο Συντακτικό Δένδρο του Σχήματος 2. Παρατηρείται ότι η αναδρομή αναπαρίσταται σωστά μέσω των κλήσεων `@fib()` εντός της ίδιας συνάρτησης, ενώ η δομή ελέγχου `if` αντιστοιχεί στα labels `if_then_0` και `if_end_0`. Το παράδειγμα επαληθεύει την ορθή λειτουργία του μεταγλωττιστή από την είσοδο πηγαίου κώδικα έως την παραγωγή έγκυρης Ενδιάμεσης Αναπαράστασης.



Σχήμα 2: Δομή του παραγόμενου Συντακτικού Δένδρου (Syntax Tree) για τον αναδρομικό αλγόριθμο Fibonacci.

5 Συμπεράσματα

Η εργασία ανέδειξε πώς οι θεωρητικές έννοιες κατασκευής μεταγλωττιστών μπορούν να μετασχηματιστούν σε δομημένο λογισμικό. Η αξιοποίηση σύγχρονων εργαλείων (flex, bison) και μοτίβων σχεδίασης (Composite, Visitor, Singleton) δημιούργησε ένα επεκτάσιμο μετωπιαίο άκρο. Παράλληλα, η διαχείριση της αρχικοποίησης του περιβάλλοντος εκτέλεσης αναδεικνύει το LLVM IR ως μια ιδιαίτερα ικανή και ευέλικτη ενδιάμεση αναπαράσταση, κατάλληλη για την πιστή αποτύπωση της σημασιολογίας του πηγαίου κώδικα.

Ως μελλοντική εργασία, η επέκταση του μεταγλωττιστή προσανατολίζεται σε τέσσερις τεχνικούς άξονες. Πρώτον, η υποστήριξη πινάκων και δεικτών θα βασιστεί στην εντολή `getelementptr` του LLVM για τον δυναμικό υπολογισμό διευθύνσεων μνήμης. Δεύτερον, σχεδιάζεται η μετάβαση από την κειμενική παραγωγή στο εγγενές LLVM C++ API για αυστηρότερη δομική επαλήθευση. Τρίτον, το middle-end θα εμπλουτιστεί με αυτόνομα passes βελτιστοποίησης, εστιάζοντας αρχικά στην απαλοιφή νεκρού κώδικα (*Dead Code Elimination*), στην εκτύλιξη βρόχων (*Loop Unrolling*) και στη σύμπτυξη σταθερών (*Constant Folding*). Τέλος, θα αναβαθμιστεί η ανάδραση προς τον προγραμματιστή μέσω διαγνωστικών μηνυμάτων σφάλματος με χρωματισμό και ακριβή εντοπισμό γραμμών και στηλών.

Αναφορές

- [1] Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, and Jeffrey D. Ullman. *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*. Addison-Wesley, 2nd edition, 2006.
- [2] Ayman Alheraki. LLVM IR Quick Reference. https://simplifcpp.org/books/LLVM_IR_Quick_Reference.pdf, March 2025. simplifcpp.org.
- [3] Keith D. Cooper and Linda Torczon. *Engineering a Compiler*. Morgan Kaufmann, 2nd edition, 2011.
- [4] Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, and John Vlissides. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley Professional, 1994.
- [5] John Levine. *flex & bison*. O'Reilly Media, 2009.
- [6] Bjarne Stroustrup. *The C++ Programming Language*. Addison-Wesley Professional, 4th edition, 2013.
- [7] Γ. Σ. Τσελίκης. *C++: από τη Θεωρία στην Εφαρμογή*. Αυτοέκδοση (Γ. Σ. Τσελίκης), 2023.

AgroSphere: An Integrated IoT System for Smart Sheep Monitoring and Management

Dimitrios Iliopoulos, dit24056@go.uop.gr

Stamatios Kanakis, dit23121@go.uop.gr

Konstantinos Kourdis, dit24087@go.uop.gr

Efstathios Kouroupakis, dit24088@go.uop.gr

Department of Informatics and Telecommunications, University of Peloponnese

3 June 2026

Abstract

This paper presents AgroSphere, a comprehensive Internet of Things (IoT) solution aimed at modernizing livestock farming through the transition from empirical observation to data-driven management. The system is based on a smart collar, specifically designed for sheep, which combines highly durable hardware with a cloud-based monitoring application [4]. Beyond simple location tracking, AgroSphere focuses on proactive health monitoring. By applying the "Sentinel Methodology" equipping a strategic 10% of the flock the system achieves optimal performance without any loss in data quality. The collars collect continuous biometric data (temperature, mobility), which are transmitted via low-power wide-area networks (LPWAN) for real-time analysis. This telemetry enables predictive health modeling, identifying anomalous febrile states 24 to 48 hours before the onset of overt clinical symptoms. Rather than attempting to save an already infected flock, this early detection serves as a rapid-response mechanism for regional quarantine protocols, preventing localized outbreaks from escalating into wider epidemics.

Keywords: Precision Livestock Farming, Internet of Things (IoT), Smart Collar, LoRaWAN, Predictive Health Models.

1. Introduction

The transition of traditional livestock farming into the digital era is one of the most significant challenges of the modern primary sector. The paradigm of Precision Livestock Farming (PLF) focuses on the use of IoT technologies for the continuous, non-intrusive, and automated monitoring of animals [1]. The AgroSphere system is a comprehensive solution that bridges the gap between embedded intelligence systems and practical livestock farming, automating the transition from traditional registries to distributed cloud platforms. To maximize cost-efficiency and farm scalability, the proposed architecture integrates the "Sentinel Methodology". Rather than equipping every animal—which presents prohibitive hardware costs for the average farmer—a strategic 10% of the flock is equipped with smart collars. This approach leverages the highly gregarious and cohesive flocking behavior of sheep; in the context of contagious epizootic diseases, monitoring a representative subset provides a statistically viable early-warning sample for the entire herd. While this 10% sampling threshold currently serves as an initial heuristic based on epidemiological sampling principles, formal empirical validation in real-world environments remains a primary objective for planned clinical field trials. Ultimately, the goal is to optimize animal welfare and enhance health transparency through these scalable sensor networks

The proposed framework should currently be considered a proof-of-concept intelligent livestock-monitoring system rather than a clinically validated diagnostic platform. Although the preliminary results demonstrate encouraging early-detection performance under synthetic large-scale monitoring conditions, further validation using real-world livestock biosensor data and veterinary-confirmed health events will be necessary before practical deployment.

2. Problem Description

Recent crises, such as Peste des Petits Ruminants (PPR) and Sheep Pox, led to the culling of over 470,000 animals in Greece [6]. Under the strict implementation of the EU's "Stamping-Out Policy", the diagnosis of even a single case mandates the preventive slaughter of the entire epidemiological unit, meaning the whole flock. Consequently, the primary value of continuous monitoring does not lie in saving the initially infected herd, but in acting as a "fast-forward button" for regional quarantine protocols. While viral shedding begins during the initial febrile stage, delayed visual detection allows the pathogen to spread silently to neighboring farms, leading to catastrophic regional losses of livestock capital. By identifying anomalous febrile states up to 48 hours before overt clinical symptoms appear, AgroSphere accelerates the activation of regional biosecurity measures and the establishment of protection zones, acting as a crucial tool to prevent localized outbreaks from escalating into national epidemics.

3. Proposed Solution

To address these challenges, the AgroSphere architecture is proposed, combining specialized hardware, LPWAN protocols [5], and predictive data analysis.

3.1. Mechanical Architecture and Enclosure Design

While standard precision livestock farming (PLF) collars are often deployed across various species, the 3D-printed AgroSphere enclosure is tailored specifically to the physiological challenges presented by sheep. Unlike cows or goats, a sheep's dense wool acts as a severe thermal and physical barrier. To overcome this, the enclosure's geometry allows the thermal sensor to integrate smoothly and protrude slightly, parting the wool to ensure proper contact with the skin.

A critical challenge in continuous livestock monitoring is sensor misplacement. Existing commercial collars frequently mount sensors on the side of the neck; this placement makes them highly susceptible to slipping and rotating as the animal moves, inevitably leading to degraded temperature and heart rate readings.

The AgroSphere design counters this by targeting the bottom of the neck using a functional pendulum effect. By accurately positioning the heaviest components (such as the 18650 batteries) at the absolute lowest point of the main casing, gravity actively prevents rotation. As the animal moves, the device naturally oscillates and returns to its resting position, ensuring the sensors maintain consistent and firm contact against the jugular vein. While this mechanical principle is theoretically engineered to resolve the slipping issues inherent in side-mounted models, empirical validation of its dynamic stability remains a key objective for future physical prototyping.

3.2. Electronic Hardware, Gateways, and Connectivity

Each node (collar) integrates a series of specialized subsystems that ensure measurement accuracy [4]:

- RAK3172 (LoRaWAN): Acts as the main communication module, based on the STM32WLE5CC processor, offering a range of several kilometers with ultra-low power consumption.
- SIM7080G (NB-IoT/LTE-M): Used as a backup communication module for areas without LoRa coverage, ensuring uninterrupted data flow.
- MAX-M10S (GNSS): A high-precision global positioning module for monitoring geographical grazing boundaries (Geofencing) [2].
- ICM-42670-P (IMU): A 6-axis inertial measurement unit (accelerometer and gyroscope) that records the animal's activity (rumination, walking, resting).
- Temperature Sensor (Thermistor): Embedded in a medical-grade metal tip for measuring skin temperature.
- Heart Rate Sensor: A photoplethysmogram (PPG) sensor that detects blood volume changes to calculate the heart rate.
- Gateways: The AgroSphere gateway acts as a bridge between the LoRa protocol and the internet (IP layer). It consists of a low-power processor (SoC) combined with a LoRa Concentrator (e.g., based on the SX1262 chip). Its function includes receiving data packets from multiple collars simultaneously, demodulating the signal, and forwarding them via MQTT or HTTPS protocols to the cloud. The gateway's construction includes a high-gain external antenna (dBi) for covering hard-to-reach areas, while its power supply can be supported by an autonomous photovoltaic system.

Because the AgroSphere system is currently presented as a theoretical architecture and simulation framework, physical field validation of the hardware has not yet been conducted. For the purposes of our data models, the accuracy of the activity, temperature, and heart rate values is based strictly on the manufacturer-certified tolerances of the selected industrial-grade modules (e.g., the ICM-42670-P and MAX-M10S). Confirming these tolerances under real-world environmental stressors remains a key objective for future prototype piloting.

3.3. Binary Classification AI Model and Data Analysis

Cloud-based data processing architecture moves beyond traditional fixed-threshold monitoring approaches by adopting a two-stage hybrid machine-learning framework. In the first stage, an unsupervised anomaly-detection algorithm based on Isolation Forest evaluates deviations from each animal's normal physiological and behavioral patterns and produces an anomaly score. In the second stage, this anomaly score is combined with engineered biometric and behavioral features and provided as input to an XGBoost binary classification model, which predicts whether a sensor-data window corresponds to a healthy state (0) or a sickness-risk state (1) [3].

Due to the absence of publicly available large-scale livestock biosensor datasets containing synchronized physiological, behavioral, and illness-event annotations, a synthetic dataset generation framework was developed for this study. The generated dataset simulated continuous multi-animal livestock monitoring under realistic farm-like conditions over extended time periods. Simulated sensor streams included body-temperature variation, IMU-derived acceleration and activity patterns, and heart-rate measurements. Synthetic illness-event intervals were introduced to model gradual physiological and behavioral deviations associated with disease progression.

The resulting dataset is naturally highly imbalanced because healthy behavioral states occur significantly more frequently than illness events in realistic livestock-monitoring environments. To address this imbalance, the training process incorporated class weighting within the XGBoost classifier, while model evaluation emphasized imbalance-aware metrics such as recall, precision-recall AUC (PR-AUC), and F2-score rather than relying solely on classification accuracy.

Input features included body-temperature statistics and temporal trends, acceleration and movement-pattern features extracted from the IMU sensor, heart-rate statistics were available, and personalized historical baseline deviation features computed individually for each animal. The proposed framework was designed to identify subtle deviations in behavior and physiology, including abnormal inactivity, reduced movement, unusual temperature variation, and deviations from an animal's personalized behavioral baseline.

To evaluate the model's ability to generalize unseen data, the generated dataset was separated into distinct training and test subsets using a chronological split. The test dataset consisted of future simulated time periods that were completely excluded from model training and hyperparameter optimization. All performance metrics reported in Figure 3 were therefore obtained using this held-out test dataset to reduce temporal information leakage and better simulate continuous real-world deployment conditions.

Experimental results demonstrated promising early-warning capabilities for livestock health monitoring while maintaining acceptable performance for a prototype intelligent monitoring framework. The system intentionally prioritizes minimizing false negatives over minimizing false positives, since failing to detect a potential illness event may delay intervention and increase animal welfare and economic risks. Consequently, the model was optimized toward higher sensitivity and earlier detection performance, even at the cost of generating additional precautionary alerts.

```

=====
precision recall f1-score support
healthy 0.994 0.981 0.988 367165
sick 0.600 0.827 0.696 12411

accuracy 0.976 379576
macro avg 0.797 0.904 0.842 379576
weighted avg 0.981 0.976 0.978 379576

ROC-AUC: 0.957 | PR-AUC: 0.647 | F2: 0.769
TN=360334 FP=6831
FN=2148 TP=10263
-----
Event recall: 1.000 | Event precision: 0.154 | False alerts / animal-week: 0.157
Median hours before event end: 156.0
=====

```

Binary AI Model results

4. Conclusions

AgroSphere marks the transition from passive management practices to smart prevention strategies. Continuous data acquisition allows for the full mapping of the flock's condition in real time. The predictive capability of the system acts as a health shield, preventing mass cullings. Future directions include the clinical validation of the algorithms in collaboration with veterinary centers.

5. References

- [1] N. Q. Bui, C. H. Nguyen, and T. M. Tran, "Precision Livestock Farming for Dairy Sheep: A Literature Review of IoT and Decision-Support Systems for Enhanced Management and Welfare," *MDPI Animals*, vol. 8, no. 2, 2026.
- [2] A. K. M. Rahman, T. E. Mathonsi, M. V. Sandlana, and C. Du, "A Wireless Livestock Tracking System Based on Real-time Internet of Things for Theft Prevention," in *2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, IEEE, 2022, pp. 1-6.
- [3] S. K. Rao, A. J. Chandra, and M. K. Sharma, "Empowering Rural Livestock Health: AI-Powered Early Detection of Cattle Diseases," *MDPI Smart Cities*, vol. 7, no. 4, 2026.
- [4] P. R. Patel, D. Kaur, and A. Virk, "Smart neck collar: IoT-based disease detection and health monitoring for dairy cows," *IEEE Internet of Things Journal*, 2025.
- [5] H. Mohapatra, "A LoRa-IoT Framework with Machine Learning for Remote Livestock Monitoring in Smart Agriculture," *arXiv preprint, arXiv:2510.07322*, 2025.
- [6] Ministry of Rural Development and Food of the Hellenic Republic (YPAAT), "Data on the Eradication of Epizootic Diseases in Small Ruminants," Athens, Greece, 2026.

Μελέτη της Επίδρασης της Πυκνότητας των Επιβατών στην Απόδοση και την Εμπειρία του Χρήστη σε Δίκτυα 5G κατά τη Μετακίνηση με Λεωφορείο

**Κατρίνης Μάρκος, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο
Πελοποννήσου, Τρίπολη, dit19079@go.uop.gr
3 Ιουνίου 2026**

Περίληψη:

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μετρήσεις των παραμέτρων RSRP, SINR και PUSCH Tx Power σε ένα δίκτυο 5G. Σκοπός των μετρήσεων ήταν η αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου 5G και της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών σε συνθήκες συνωστισμού, και ειδικότερα εντός των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (MMM) του δήμου Αθηναίων. Η μελέτη εξάγει συμπεράσματα αναλύοντας δεδομένα από δύο διαφορετικές περιόδους: τις ημέρες 19/1 – 21/1 οι οποίες χαρακτηρίστηκαν από χαμηλή πυκνότητα επιβατών, και τις ημέρες 26/1 – 28/1, που παρουσίασαν υψηλή πυκνότητα επιβατών. Στόχος είναι να αναδειχθεί ο βαθμός στον οποίο ο συνωστισμός στα MMM επηρεάζει την ποιότητα του δικτύου 5G και την τελική εμπειρία του χρήστη.

1. Εισαγωγή:

Τα δίκτυα 5G προσφέρουν σημαντικές νέες δυνατότητες και πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Ωστόσο, ένα από τα πιο απαιτητικά σενάρια χρήσης για κάθε σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών σε περιορισμένο χώρο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς [1] και ειδικότερα τα αστικά λεωφορεία, όπου η δυναμική αξιολόγηση του δικτύου σε συνθήκες κίνησης κρίνεται απαραίτητη [2]. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ποιότητα του σήματος και η ραδιοκάλυψη δεν εξαρτώνται μόνο από την απόσταση του χρήστη από την κεραία του σταθμού βάσης [3], αλλά επηρεάζονται σημαντικά από παράγοντες όπως τα υλικά κατασκευής του οχήματος, η ταχύτητα κίνησής του, καθώς και η πυκνότητα των επιβατών στο εσωτερικό του.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η καταγραφή και ανάλυση πραγματικών μετρήσεων [4] κατά τη διάρκεια μιας προκαθορισμένης διαδρομής με τα αστικά μέσα του Δήμου Αθηνών, συγκρίνοντας δύο διαφορετικές συνθήκες: χαμηλή και υψηλή πληρότητα επιβατών. Την πρώτη εβδομάδα (19/1 - 21/1) παρατηρήθηκε μειωμένη κίνηση, καθώς επρόκειτο για την κενή εβδομάδα πριν από την εξεταστική περίοδο του χειμερινού εξαμήνου. Αντίθετα, τη δεύτερη εβδομάδα (26/1 - 28/1), η οποία συνέπεσε με την έναρξη της εξεταστικής περιόδου του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ), τα λεωφορεία παρουσίασαν πολύ υψηλή πληρότητα σε σύγκριση με την προηγούμενη. Μέσα από τη μελέτη παραμέτρων του δικτύου (RSRP, SINR) και δεδομένων από την πλευρά της κινητής συσκευής (PUSCH Tx Power, Συνολική Κατανάλωση Μπαταρίας), επιχειρείται η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

2. Μεθοδολογία:

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην περίοδο δύο εβδομάδων όπου η πρώτη εβδομάδα κατηγοριοποιείται έως την εβδομάδα (19/1 – 21/1) με χαμηλό πληθυσμιακό φορτίο, λόγω της κενής εβδομάδας πριν την έναρξη της εξεταστικής περιόδου. Η δεύτερη εβδομάδα (26/1 – 28/1), γίνεται παρουσίαση λόγω της έναρξης της εξεταστικής περιόδου. Οι μετρήσεις έγιναν τις μέρες Δευτέρα, Τρίτη, Τετάρτη ανά εβδομάδα και για τις δυο εβδομάδες, με τις ώρες εκκίνησης των μετρήσεων 8:30 π.μ. - 8:40 π.μ και στην ίδια θέση εντός του οχήματος, με τη χρήση του δρομολογίου “250” των αστικών λεωφορείων της Αθήνας.

Σκοπός της μεθοδολογίας ήταν η μείωση όσο είναι εφικτό των εξωτερικών μεταβλητών, όπως η γνώση του ακριβούς αριθμού των ενεργών χρηστών στο ίδιο δίκτυο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων για να αποτυπωθεί η επίδραση της πυκνότητας των επιβατών στις μετρήσεις. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το μεθοδολογικό πρωτόκολλο στο [5], το οποίο καθορίζει τη βασική διαδικασία καταγραφής και το προφίλ χρήσης. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός του Εργαστηρίου Ασυρμάτων και Κινητών Επικοινωνιών [6] και συγκεκριμένα: μία κινητή συσκευή OnePlus Nord N10 5G, χρήση της εφαρμογής Echo One [7], και με μια κάρτα Sim της Cosmote.



Εικόνα 1: Διαδρομή του λεωφορείου για τις μετρήσεις

2.1 Μετρούμενες Παράμετροι:

Κατά τις ημέρες διεξαγωγής των μετρήσεων, καταγράφηκαν τέσσερις από τις βασικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου 5G και την εμπειρία του χρήστη στη διαδρομή του:

RSRP (Reference Signal Received Power): Αποτελεί τη μέτρηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από την κεραία εξυπηρέτησης προς τη συσκευή του χρήστη.

SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio): Έκφραση της ποιότητας του σήματος, αναπαριστώντας το πόσο πιο ισχυρό είναι το κύριο σήμα της εξυπηρετούσας κεραίας σε σχέση με τις παρεμβολές των γειτονικών κεραιών.

PUSCH Tx Power (Physical Uplink Shared Channel Transmit Power): Αναφέρεται στην ισχύ όπου χρειάζεται να εκπέμψει το κινητό του χρήστη προς την κεραία εξυπηρέτησης.

Κατανάλωση Μπαταρίας (Battery Consumption): Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στο ποσοστό της μπαταρίας που καταναλώθηκε από την κινητή συσκευή κατά τη διάρκεια της διαδρομής.

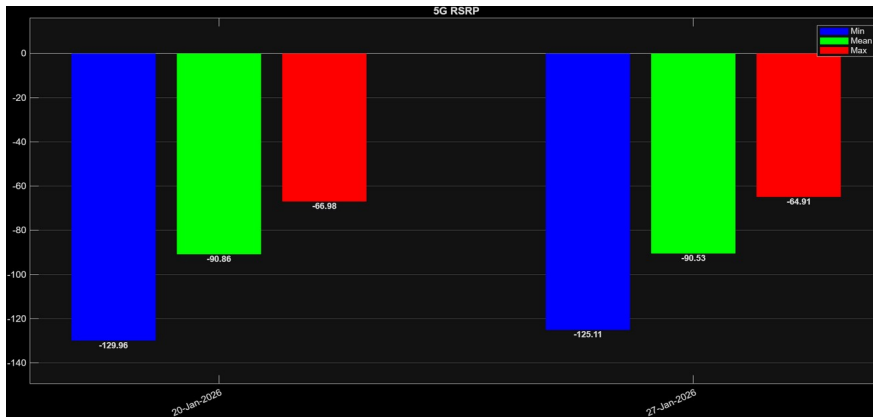
Επιπλέον, έγινε χρήση ενός Custom Script (Social Scroll Profile), [5] που φόρτωνε τη σελίδα του NatGeo στο TikTok με καταγραφή χρόνου φόρτωσης της σελίδας και Throughput, σε μια προσπάθεια να γίνει προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός ενεργού επιβάτη στη χρήση των Social Media. Επιπλέον η ανάλυση της πυκνότητας των επιβατών, ορίστηκαν δυο κατηγορίες: α) Low (χαμηλή πυκνότητα), που στο λεωφορείο υπάρχουν μόνο καθήμενοι, High (υψηλή πυκνότητα), με το λεωφορείο συμπεριλαμβάνει και όρθιους.

3 Αποτελέσματα:

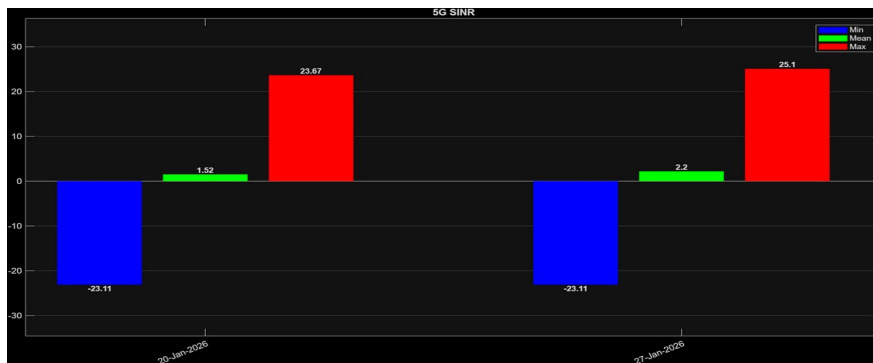
Από την ανάλυση των μετρήσεων εξάγονται συμπεράσματα για τις εξεταζόμενες παραμέτρους. Εστιάζεται ενδεικτικά στα αποτελέσματα των ημερών Τρίτη 20/1 και Τρίτη 27/1. Στις 20 Ιανουαρίου κατηγοριοποιείται εως ημέρα με χαμηλό πληθυσμό στο λεωφορείο, λόγω της κενής εβδομάδας πριν από την έναρξη της εξεταστικής περιόδου. Αντιθέτως, στις 27 Ιανουαρίου ανήκει στην κατηγορία με υψηλό πληθυσμιακό φορτίο εντός του οχήματος, εξαιτίας της έναρξης των πανεπιστημιακών εξετάσεων.

Αρχικά με τις παραμέτρους δικτύου στην Εικόνα 2, φαίνεται ότι παρόλο που το εύρος των τιμών διευρύνθηκε, με τη μέγιστη τιμή να αυξάνεται κατά 2.07 dB και την ελάχιστη κατά 4.85 dB, η μέση τιμή του RSRP παραμένει πρακτικά σταθερή με μια μικρή αύξηση 0.33 dB. Επιπλέον φαίνεται η αύξηση του μεγίστου από -66.98 dBm στα -64.91 dBm αλλά και η αύξηση του ελαχίστου από τα -129.96 dBm στα -125.11 dBm.

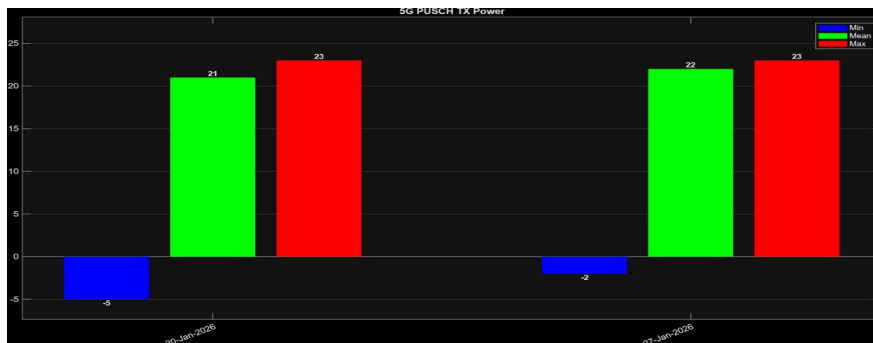
Η Εικόνα 3 παρουσιάζει την ελάχιστη, τη μέση και τη μέγιστη τιμή του SINR για τις δύο υπό εξέταση ημερομηνίες. Η ελάχιστη τιμή του μένει αμετάβλητη στα -23.11 dB, ενώ η μέγιστη τιμή του ανέβηκε στα 25.1 dB παρουσιάζοντας αύξηση κατά 1.43 dB σε σχέση με τη μέγιστη τιμή του στα 23.67 dB στις 20/01. Παράλληλα, και η μέση τιμή του SINR αυξήθηκε ελάχιστα, κατά 0.68 dB. Ωστόσο, προκύπτει από τον Πίνακα 1, η τάση αυτή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλες τις ημέρες, καθώς τη Δευτέρα καταγράφεται μείωση του SINR, ενώ την Τετάρτη σημειώνεται η εντονότερη αύξηση. Η αστάθεια αυτή δείχνει ότι σε πραγματικές συνθήκες κίνησης εντός αστικού περιβάλλοντος, η ποιότητα του σήματος δεν εξαρτάται μόνο από την πυκνότητα των επιβατών.



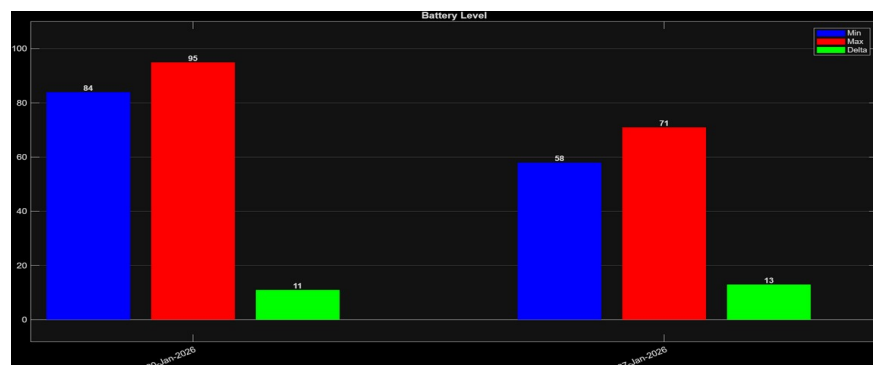
Εικόνα 2: Τιμές RSRP του 5G σήματος 20/01 και 27/01



Εικόνα 3: Τιμές SINR του 5G σήματος 20/1 & 27/1



Εικόνα 4: Τιμές εκπεμπόμενης ισχύος (5G PUSCH) στις 20/01 και 27/01.



Εικόνα 5: Κατανάλωση Μπαταρίας 20/1 & 27/1

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η εκπεμπόμενη ισχύς του κινητού στο κανάλι 5G PUSCH. Η μέγιστη τιμή που εκπέμπεται από το κινητό και τις δύο μέρες είναι στα 23 dBm, η οποία είναι και η μέγιστη τιμή που μπορεί να εκπέμψει η συσκευή. Η ελάχιστη εκπεμπόμενη ισχύς αυξάνεται κατά 3 dB, από τα -5 dBm στα -2 dBm, ενώ αύξηση κατά 1 dB παρατηρείται και στη μέση τιμή. Η αύξηση αυτή πιθανώς προκύπτει από τη δυσκολία της συσκευής να επικοινωνήσει με την κεραία εξυπηρέτησης λόγω της υψηλής πυκνότητας των

φοιτητών στο λεωφορείο, οπότε χρειάστηκε να αυξήσει την ισχύ εκπομπής της προκειμένου να αντισταθμίσει την εξασθένηση του σήματος που προκαλείται από τα σώματα των επιβατών.

Τέλος παρουσιάζεται ότι με την υψηλή πυκνότητα του λεωφορείου, παρατηρήθηκε αύξηση της κατανάλωσης μπαταρίας κατά 2%, η οποία είναι συμβατή με την αυξημένη Tx ισχύ, με απαιτήσεις του Script.

Ο Πίνακας 1 συγκεντρώνει τις μέσες τιμές των υπό εξέταση παραμέτρων για τις μετρήσεις των δυο εβδομάδων συνολικά.

	Low Population			High Population		
Ημερομηνία	19/1	20/1	21/1	26/1	27/1	28/1
Μέρες	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη
RSRP	-90	-90.86	-89.51	-89.1	-90.53	-92.27
SINR	2.47	1.52	0.82	1.68	2.2	4.05
PUSCH Tx	21	21	21	22	22	21
Μπαταρία %	13	11	10	15	13	14

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός Πίνακας Στοιχείων των 2 Εβδομάδων Καταμέτρησης

4 Συμπεράσματα:

Στη συνέχεια παρατίθενται πρώτα συμπεράσματα λαμβάνοντας υπόψη εβδομαδιαίους μέσους όρους.

Αναφορικά με το RSRP, η μέση εβδομαδιαία τιμή του παρουσίασε σταθερότητα, με τη μεταβολή στον εβδομαδιαίο μέσο όρο, από τα -90.12 dBm της εβδομάδας του χαμηλού πληθυσμού, σε σύγκριση με -90.63 dBm του υψηλού πληθυσμού. Η διαφορά των 0.51 dB είναι αμελητέα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η φυσική παρουσία των επιβατών δεν προκάλεσε σημαντική εξασθένηση στο RSRP σε όλη τη διαδρομή.

Παρότι το μέσο εβδομαδιαίο του SINR αυξάνεται από 1.60 dB σε 2.64 dB, η μεταβολή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλες τις ημέρες, καθώς τη Δευτέρα παρατηρείται μείωση, ενώ την Τρίτη και κυρίως την Τετάρτη αύξηση. Επομένως, το αποτέλεσμα δείχνει τάση βελτίωσης του εβδομαδιαίου μέσου SINR, αλλά δεν τεκμηριώνει σταθερή συμπεριφορά με την επίδραση της πυκνότητας των επιβατών.

Παράλληλα παρατηρήθηκε μια αύξηση στη μέση ισχύ εκπομπής της συσκευής, από τα 21 dBm στα 22 dBm. Η τάση αυτή δείχνει ότι το κινητό τηλέφωνο κατανάλωσε ενέργεια για την αποστολή δεδομένων σε συνθήκες υψηλής πυκνότητας επιβατών.

Η πιο ξεκάθαρη επίδραση εντοπίζεται στην κατανάλωση της μπαταρίας. Η μέση εβδομαδιαία κατανάλωση μπαταρίας κατά τη διαδρομή αυξήθηκε από το 11.33% στο 14%. Η αύξηση αυτή κατά περίπου 2,7% σχετίζεται τόσο με την ανάγκη για υψηλότερη ισχύ εκπομπής (Tx Power) όσο και με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις κατά την εκτέλεση του σεναρίου χρήσης (Script).

5 Αναφορές:

- [1] H. Elsherbiny *et al.*, "4G LTE Network Data Collection and Analysis along Public Transportation Routes," *IEEE Global Communications Conference*, Taipei, Taiwan, 2020, pp. 1-6,
- [2] K. Puangnak, K. Phanrattanachai, P. Horkaew, P. Pornpongtechavanich, E. Wijitphan and T. Daengsi, "Recent Evaluation of 5G Performance in Thailand Through Stationary and Drive Testing," *2025 IEEE 16th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, Shah Alam, Malaysia, 2025, pp. 138-142.
- [3] B. Manzano, R. Rodríguez, D. Moreno, and J. . Ribadeneira, "Radio Coverage Analysis of a 4G Network in Ambato's Center", *IEEE LAT AM T*, vol. 23, no. 11, pp. 1099–1108, Oct. 2025.
- [4] S. Samaniego, D. Faubla, A. Bravo and P. Romero, "Virtual Mapping of the LTE Signal at the Open Areas the Department of Sciences of the ESPOCH," *2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, ZHENGZHOU, China, 2023, pp. 1-5.
- [5] Δ. Ζαρμπούτη, *Μεθοδολογικό Πρωτόκολλο Μετρήσεων Κυψελωτών Δικτύων σε Αστικό Περιβάλλον Μέσων Μαζικής Μεταφοράς*, εσωτερικό έγγραφο, έκδ/ 1.0, Εργαστήριο Ασύρματων και Κινητών Επικοινωνιών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Ιαν. 2026.
- [6] Εργαστήριο Ασύρματων και Κινητών Επικοινωνιών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου. [Online]. Available: <https://wmclab.uop.gr>
- [7] <https://enhancell.com/enhancell/product/echo-one/>



What is the Internet of Things (IoT) and What Are Its Applications Today?

Dimitrios Christos Dafnomilis, Department of Informatics and Telecommunications,
University of the Peloponnese, Tripoli, dit23245@go.uop.gr

June 3, 2026

Abstract

IoT connects physical devices to the Internet, allowing them to collect, share and process data. This makes devices and systems smarter, because they can monitor many situations, react automatically to data changes and help people or organizations make better decisions. IoT is used in many modern fields, such as smart homes, smart cities, agriculture, healthcare, transportation, also marketing and industry. When we choose to combine IoT with AI, these systems become even more powerful and increase their output massively because they can analyze data, predict problems and improve efficiency by a lot.

The paper explains what IoT is and how it works and where it is used today. It focuses on important examples such as smart agriculture, smart cities, industrial automation, business and intelligent IoT applications. While it also mentions the benefits of IoT, including automation, efficiency and remote monitoring, but also the challenges it poses today, such as security, privacy and the difficulty of managing large amounts of data.

Keywords: Internet of Things, Smart Cities, Smart Agriculture, Industry 4.0, Artificial Intelligence, Privacy

1 Introduction

IoT has been influencing technological concepts of the modern digital era for a while now. It refers to the connection of physical devices, machines, systems, sensors and other objects to the Internet, allowing them to collect and exchange data that they can process for multiple purposes. These connections exist all around us, for example simple household devices such as, smart ovens, smart thermostats, smart door locks and so on. The main idea behind IoT is making devices become part of a large digital "ecosystem" where data can be collected and exchanged between devices, utilizing connection between those devices to achieve monitoring, automation and decision-making.

IoT has become important because it makes our lives easier, it provides solutions to problems that we face everyday in our world. Through sensors and communication networks, IoT devices can observe real world conditions, such as movements, pressures, temperature, energy consumption and more. The collected data then can be transmitted to cloud platforms, where it can be analyzed and used to support useful operations. For example, a wearable device can monitor health indicators and a smart traffic system can collect data from roads in order to reduce congestion/traffic.

In recent years, IoT has been combined with Artificial Intelligence and Machine Learning. This combination of the two has led to the achievement of developing more intelligent IoT systems which are able to collect data and to analyze it, detect patterns and make predictions based on that analysis. Aouedi et al. describes this evolution as intelligent internet of things, where AI techniques are used in IoT networks in order to support applications such as smart healthcare, smart cities, transportation and industries [1].

The purpose of this paper is to explain what IoT is and to represent some of its most important applications today. The paper will first describe the basic concept of architecture of IoT. Then, it will examine major application areas such as agriculture, cities, industry 4.0, and business and marketing. Finally, it discusses the role of AI in modern IoT systems, as well as the benefits and challenges of IoT related to security, data management and privacy.

2 Definition and Basic Architecture of IoT

Internet of Things (IoT) can be defined as a network of multiple physical devices that are equipped with things like, sensors and software, processing capabilities and communication technologies/layers. These devices can interact with the environment or each other, collect data and communicate using the Internet to exchange data. In this way, one could say that: IoT creates a communication bridge between the physical and digital world.

A more technical way to put it is through layers. A typical IoT system follows these four main layers: the Network layer, the Perception layer, the Processing layer and the Application layer. Each layer has a specific role in the collection, transmission, processing and use of data from the environment.

The Network layer is responsible for transferring the collected data from the devices to other systems, such as gateways, cloud platforms or edge servers. This layer uses communication technologies and protocols such as Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN, MQTT and CoAP. Wi-Fi and Bluetooth are commonly found in smart homes and wearable devices, while Zigbee and LoRaWAN are used more in low power IoT networks. MQTT and CoAP are lightweight communication protocols that are suitable for IoT systems because many IoT devices have very limited processing power, memory and battery capacity.

The Perception Layer is responsible for sensing the physical environment. It includes sensors and actuators. Sensors collect information from the real world, while actuators perform actions based on commands from the system. Examples of sensors used in IoT systems include temperature sensors, humidity sensors, soil moisture sensors, motion sensors, GPS modules, vibration sensors and ultrasonic sensors. For example, in smart agriculture, a soil moisture sensor can measure how much water exists in the soil, while an actuator can open or close an irrigation valve.

The Processing Layer is responsible for storing, filtering and analyzing the collected data. This processing can take place in cloud servers, local gateways or edge devices. Cloud computing provides high storage and processing capacity, while edge computing processes data closer to the device. Edge processing is useful when fast response time is needed, for example in industrial safety systems, healthcare monitoring or autonomous vehicles.

The Application Layer is the layer that provides the final service to the user. It uses the processed information in order to support useful applications, such as smart irrigation, smart parking, remote patient monitoring, traffic control or predictive maintenance in industry. This layer is the part of the IoT system that users, businesses and public organizations usually interact with.

The value of IoT does not only come from the devices themselves, but mainly from the generated data and the services that are built on top of this data that they provide. For example, in a smart home, sensors can collect data about temperature, movement and lighting. In an industrial environment, sensors can monitor the condition of machines in a factory. In a city, IoT devices can be used to collect information about the traffic, parking, air quality and energy consumption for all purposes. In all these cases, IoT helps systems respond faster, be more automated and efficient.

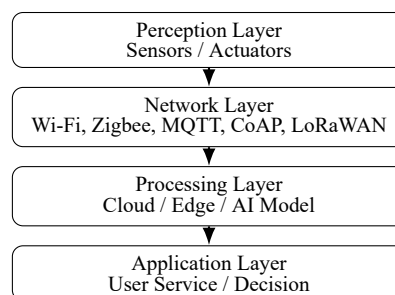


Figure 1: Basic IoT architecture and data flow.

3 Modern Applications of IoT

IoT is used in many areas of modern life. Its applications can be found in agriculture, cities, healthcare, transportation, industry, business and everyday home environments. The following subsections present some of the most important application areas that we've achieved so far.

3.1 Smart Agriculture

One important application of IoT is smart agriculture. In this field, IoT services and devices such as sensors, drones, weather monitoring systems and machines are used to collect real-time data from the agricultural environment. This data can include moisture of the soil, humidity, temperature, crop health, irrigation needs and livestock conditions for farmers. According to Alzubi and Galyna, IoT and AI can support sustainable farming by improving monitoring, resource management and decision making in agricultural production [2].

3.2 Smart Cities

Another major application of IoT in the modern world is the development of smart cities. A smart city uses IoT, such as: sensors, communication networks, connected devices and data analytics in order to improve urban services and quality of life for its citizens. IoT systems collect data from different parts of the city, such as: traffic lights, parking areas, waste bins, public transport systems, buildings and healthcare services in the city. This data is then processed with machine learning methods to improve decision making and provide more efficient management of urban resources [3].

Smart city applications include smart street lighting, smart parking, waste management, traffic control, smart roads, public safety systems and energy management. For example, smart street lights can utilize IoT devices/systems to adjust their brightness depending on traffic, pedestrians or time of day, reducing energy consumption, giving a more eco-friendly approach to modern technologies. Smart parking systems can inform drivers about available parking spaces, reducing the time spent searching for available parking and decreasing traffic congestion on the streets. Smart waste bins can notify collection services when they are full, making waste collection more efficient.

Ullah et al. explain that smart cities depend on large-scale data collection, analysis and service provision [3]. This means that IoT is not only used to connect devices, but also to support a complete data-driven urban environment. However, smart cities also raise important concerns, especially regarding the privacy of its citizens, asking a question on security and ethical use of the collected information. Since urban IoT systems may collect data about people, vehicles and public spaces, these systems must be designed carefully in order to protect the city's citizens' rights and personal information.

3.3 Industry 4.0 and Industrial Automation

IoT is also an important technology in Industry 4.0, since it can help production systems become more automated, connected and data driven. In addition, in industrial work environments, IoT devices and wireless sensor networks are utilized for data collection purposes from machines and physical environments. This data can be then transmitted to remote systems for monitoring, control and decision making. Majid et al. explain that Industry 4.0 relies heavily on IoT and wireless sensor networks, as these technologies support automation, environmental monitoring and industrial control systems [4].

Wireless sensor networks are especially important for Industry 4.0, since they allow distribution of sensing important conditions along multiple industrial areas. Sensors can be used to monitor temperature, pressure, vibrations, humidity, energy consumption and other operational parameters necessary for Industry 4.0. This makes it possible to detect and prevent problems, reduce human intervention in many cases and improve productivity for industries. For example, if a machine shows abnormal indicators such as, vibration and/or temperature, an IoT system can detect this change in those variables and notify technicians before a serious accident/failure occurs. This brings value to industries by reducing downtime, lowering costs of maintenance and providing a safer work environment for all employees. However, the use of IoT and wireless sensors in Industry 4.0 can also create challenges, especially in relation to network security, cyberattacks and the protection of industrial data.

3.4 Business and Marketing

Internet of things is also affecting business and marketing. With the right use of IoT devices, companies are allowed to collect data about usage of their products in the market, customer behavioral patterns and service needs. As a result, businesses can use this collected data to design more personalized services to their customers, in order to improve their experience. Nguyen and Simkin describe IoT as a technological shift that brings Internet Intelligence to physical products, making them more connected and smart [5].

In marketing, IoT is used to support customer engagement and personalized communications, meanwhile also supporting new business models for businesses. For example, wearable devices like smart watches, smart home products like smart thermostats and more can provide companies with real-time information feedback about how consumers interact with their products. This feedback can then help businesses understand the needs of their customers better and to help improve their services, in order to assist in building a smarter and better business model for companies.

However, this application must be approached carefully, since IoT marketing often depends majorly on customer data, creating multiple concerns for privacy. Although Nguyen and Simkin's article was published in 2017, it is useful to us as a different perspective of an earlier stage of the implementation of IoT in the digital world, to see how IoT was expected to reshape businesses and marketing practices in the future. Today, these issues are even more important issues to the world, because IoT systems are way more advanced and are often combined with Artificial Intelligence and data analytics. It is still a question that we ask ourselves.

4 Intelligent IoT: The Role of Artificial Intelligence

IoT has been strongly influenced by AI and Machine Learning. Older IoT systems mainly just focused on how devices connect and collecting data from sensors. Nowadays in modern IoT systems it is more frequently seen to include AI and Machine learning in order to analyze data, recognize patterns and to make decisions automatically for us. This has introduced a totally new concept to technology, that of Intelligent IoT, where devices and networks become smarter, more autonomous.

Aouedi et al. explain that Intelligent IoT has important applications in healthcare, smart cities, smart transportation and smart industries [1]. In healthcare, devices are used to collect medical data from patients and to support remote monitoring for many things, even diseases in some cases. In transportation, IoT and AI are used to support traffic prediction, autonomous driver-less cars and energy consumption for electric cars. In industry, we see support of automation and human-machine collaboration.

The main advantage of AI in IoT is that it can easily transform raw data from sensors into useful knowledge that can then be used to better the AI models through Machine learning. For example, with just 1 sensor we can collect anything we want, temperature values, motion, humidity, and many other variables, however, with the implementation of AI in those IoT systems we can identify whether those values indicate a normal behavior or in worst case scenario, a dangerous outcome. In a similar way we can use traffic sensors to collect data about vehicles, however without machine learning models we cannot predict congestion in real-time, that's where Machine Learning comes into play by using that information to predict congestion and suggest better traffic management strategies.

Another important value of Intelligent IoT is that some IoT systems use local gateways or edge devices to process data closer to where that data is generated in order to reduce delay, improve response times and to limit the amount of sensitive data that needs to be transmitted, providing a comfort zone. This is especially useful in applications that require fast decision making in dangerous environments, such as autonomous driving cars, industrial safety mechanisms and healthcare patient monitoring.

5 Benefits and Challenges of IoT

As we've seen before, IoT can offer many benefits. First and foremost, it offers support in automation systems by allowing devices and systems to operate with less human interaction, saving time and reducing errors while improving efficiency. Secondly, IoT enables remote monitoring in multiple fields such as healthcare and industry, allowing users to observe systems from a distance, providing their users with comfort in fields such as, healthcare, industry, agriculture and even smart homes. Finally, IoT can improve resource management for people by reducing machine failures and unnecessary resource consumption, meanwhile supporting predictions and early warnings. That can be achieved through better decision making that is provided through IoT, since IoT systems generate humongous amounts of data that can be used to understand situations more accurately combining AI and Machine Learning to offer optimized actions. We see this in smart cities all around the world, in improved parking/traffic areas. But it is not limited to that, IoT has many things to offer in other fields too, like agriculture and industry by reducing machine failure, improving productivity and improving crop productions.

However it has also been mentioned that IoT creates serious challenges even for our technologically advanced era. One of the most important challenges is security and privacy. The general idea of IoT devices is that they are often connected to networks, collecting personal data, such as health information of patients, location information and consumer behavior and may become targets for unwanted cyber attacks, which poses a threat to security and privacy, if attackers gain access to IoT systems then they may steal data, disrupt services or even control those devices. Majid et al. emphasize that IoT and wireless sensor network frameworks in Industry 4.0 face important security risks, including network intruders and attacks [4]. Meanwhile Aouedi et al. highlight privacy risks in Intelligent IoT, including privacy data leakage and model privacy leakage [1]. Therefore, IoT systems must include extremely strong impenetrable defense mechanisms and clear rules about how data is collected, stored and used.

On another note, Interoperability is also a significant challenge posed by the integration of IoT in the modern world. IoT devices have become a major part in our lives and companies from all over the world are involved in the creation of IoT devices, without necessarily using the same communication protocols, data formats and platforms. This can make it difficult for different systems to work together if you are uncertain on the communication protocols they are using. In addition, IoT generate large and vast amounts of data which creates challenges related to storage availability, processing, analysis and network bandwidth. As Iot continues to advance, these challenges must first be addressed in order to make IoT systems secure, reliable, useful and more sustainable in the foreseeable future.

6 Conclusion

Internet of Things is a major technological advancement in our society that connects the physical world to the digital one. That is achieved through sensors and communication networks and data processing platforms, allowing devices to collect and exchange and analyze data. This makes the creation of smart environments, automation and decision making easier for us.

Today, IoT is used in many important areas of our world, in agriculture, in smart cities, in Industry 4.0, in business and marketing and many other fields, providing better resource management, sustainable production, better traffic management, waste collection, parking, public safety, monitoring, maintenance and personalized services.

The combination of IoT with the increasingly fast improving AI has made IoT systems even more powerful than before, with noticeable effects in data analysis, event prediction and support of real-time decision making. However that expansion of AI in IoT also creates worries to people. Security, privacy, interoperability and data management are crucial issues that must be addressed carefully. Overall, IoT is not only a technological innovation, but also a tool that has changed the way that people, organizations and machines interact with each other.

7 References

- [1] Ons Aouedi et al. "A Survey on Intelligent Internet of Things: Applications, Security, Privacy, and Future Directions". In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 27.2 (2025), pp. 1238–1290. DOI: [10.1109/COMST.2024.3430368](https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3430368).
- [2] Ahmad Ali Alzubi and Kalda Galyna. "Artificial Intelligence and Internet of Things for Sustainable Farming and Smart Agriculture". In: *IEEE Access* 11 (2023), pp. 78686–78692. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3298215](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3298215).
- [3] Amin Ullah et al. "Smart cities: the role of Internet of Things and machine learning in realizing a data-centric smart environment". In: *Complex & Intelligent Systems* 10 (2024), pp. 1607–1637. DOI: [10.1007/s40747-023-01175-4](https://doi.org/10.1007/s40747-023-01175-4).
- [4] Mamoon Majid et al. "Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review". In: *Sensors* 22.6 (2022), p. 2087. DOI: [10.3390/s22062087](https://doi.org/10.3390/s22062087).
- [5] Bang Nguyen and Lyndon Simkin. "The Internet of Things (IoT) and marketing: the state of play, future trends and the implications for marketing". In: *Journal of Marketing Management* 33.1–2 (2017), pp. 1–6. DOI: [10.1080/0267257X.2016.1257542](https://doi.org/10.1080/0267257X.2016.1257542).

Polybot: Αλγοριθμικό Σύστημα Συναλλαγών σε Δυναμικές Αγορές

Πρόβλεψης με Χρήση Μηχανικής Μάθησης

Χριστόπουλος Παναγιώτης

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
dit22230@go.uop.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει το **Polybot**, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα αλγοριθμικών συναλλαγών για δυναμικές αγορές πρόβλεψης τύπου “Bitcoin Up or Down” στην πλατφόρμα Polymarket. Το σύστημα αξιοποιεί ένα μοντέλο XGBoost binary classification εκπαιδευμένο σε 17 τεχνικούς δείκτες από δεδομένα OHLCV 5 λεπτών του BTC/USDT (Bybit), με πολυεπίπεδη στοίβα φίλτρων για αποφυγή δυσμενών καθεστώτων αγοράς. Αξιολόγηση μέσω Monte Carlo (10.000 επαναλήψεις) σε παγωμένα OOS δεδομένα δείχνει θετικό Expected Value σε 100% των εκτελέσεων με μέσο EV +7,4% ανά συναλλαγή υπό μηδενική χρέωση maker.

Λέξεις-κλειδιά: Prediction Markets, XGBoost, Binary Classification, Algorithmic Trading, Monte Carlo Simulation, Python.

1 Εισαγωγή

Οι αγορές πρόβλεψης, όπως το Polymarket, επιτρέπουν συναλλαγές σε συμβόλαια μελλοντικών γεγονότων, με τις τιμές τους να αντικατοπτρίζουν την πιθανότητα έκβασης. Η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη συστηματική προσέγγιση μηχανικής μάθησης στις πεντάλεπτες αγορές “Bitcoin Up or Down” του Polymarket, διερευνώντας πιθανές αναποτελεσματικότητες λόγω της περιορισμένης παρουσίας αλγοριθμικών traders.

2 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Το Polybot αποτελείται από τέσσερις αλληλένδετες συνιστώσες ασύγχρονης εκτέλεσης σε Ubuntu server: **DataFeed.py** (WebSocket σύνδεση με Bybit για λήψη κεριών 5 λεπτών), **BinaryModel.py** (υπολογισμός 17 τεχνικών χαρακτηριστικών και εκπαίδευση XGBoost classifier), **FilterStack** (πολυεπίπεδη στοίβα φίλτρων αξιολόγησης σήματος), και **Orchestrator.py** (κεντρικός συντονιστής). **FillMonitor** (Ανεξάρτητη διεργασία παρακολούθησης του order book κατά τη διάρκεια κάθε ανοιχτής θέσης)

Το pipeline εκτέλεσης ανά κερύ ακολουθεί τη ροή: (1) κλείσιμο κεριού, (2) υπολογισμός features, (3) πρόβλεψη μοντέλου, (4) στοίβα φίλτρων, (5) αναζήτηση αγοράς στο Polymarket CLOB, (6) τοποθέτηση limit εντολής στα \$0,40, (7) παράλληλη εκτέλεση FillMonitor.

3 Μοντέλο Μηχανικής Μάθησης

3.1 Μηχανική Χαρακτηριστικών και Εκπαίδευση

Υπολογίζονται 17 χαρακτηριστικά από ένα παράθυρο 300 κεριών, καλύπτοντας δείκτες τάσης, δυναμικής, μεταβλητότητας, όγκου και εποχικότητας:

- **Τάσης & Δυναμικής:** log_ret (απόδοση), sma_20 (κιν. μέσος), dist_sma (απόσταση SMA), rsi (ορμή), macd_delta (σύγκλιση), adx_feat (ισχύς τάσης), ema1h_slope (κλίση ωριαίας τάσης).
- **Μεταβλητότητας & Όγκου:** vol_intensity (ένταση όγκου), candle_range (εύρος κεριού), bb_width (εύρος Bollinger), atr_norm (κανον/vo ATR), atr_pct (percentile μεταβλητότητας).
- **Εποχικότητας & Στατιστικών:** hour_sin/cos (κυκλική ώρα), dow_sin/cos (κυκλική ημέρα), autocorr_5 (αυτοσυσχέτιση 5-bar lag).

Χρησιμοποιείται ο ταξινομητής XGBoost με χρονική διαίρεση δεδομένων (50/30/20: train/validate/OOS) και περιοδική επανεκπαίδευση για την αποφυγή διολίσθησης και data leakage.

3.2 Στοιβα Φίλτρων (Filter Stack)

Για την αντιμετώπιση περιόδων χαμηλής απόδοσης, εφαρμόζεται μια πολυεπίπεδη στοιβα φίλτρων που απαιτεί την ταυτόχρονη ικανοποίηση κριτηρίων μεταβλητότητας, τάσης και εμπιστοσύνης. Αυτή η προσέγγιση περιορίζει τα σήματα στο 3,6% των συνολικών κερών, εξασφαλίζοντας ποιοτικότερες εκτελέσεις κατά την περίοδο ελέγχου.

ATR Spike : Αποφυγή μακροσκοπικής αστάθειας - ADX : Εξασφάλιση επαρκούς τάσης - EMA /1H EMA : συμβατή Αποφυγή αντίθετης τοποθέτησης - RSI: Αποφυγή ακραίων συνθηκών - Volume Intensity: Εξασφάλιση ρευστότητας - Confidence : Φιλτράρισμα αδύναμων/ακραίων σημάτων

4 Πειράματα και Αποτελέσματα

4.1 Ρύθμιση Πειράματος

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε ιστορικά δεδομένα 365 ημερών , με το παγωμένο OOS να καλύπτει το τελευταίο 20% (≈ 73 ημέρες). Τα limit orders τοποθετούνται στα \$0,40 (maker) με μηδενική χρέωση. Νικητήριες θέσεις: $+1,50\times$, χαμένες: $-1,00\times$.

4.2 Προσομοίωση Monte Carlo (10.000 επαναλήψεις)

Λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της εκπλήρωσης εντολών, εκτελέστηκαν 10.000 επαναλήψεις Monte Carlo επί των παγωμένων OOS δεδομένων. Η προσομοίωση υιοθέτησε συντηρητικές παραδοχές, όπως fill rate μόλις 60% στις κερδοφόρες θέσεις έναντι 100% στις χαμένες.

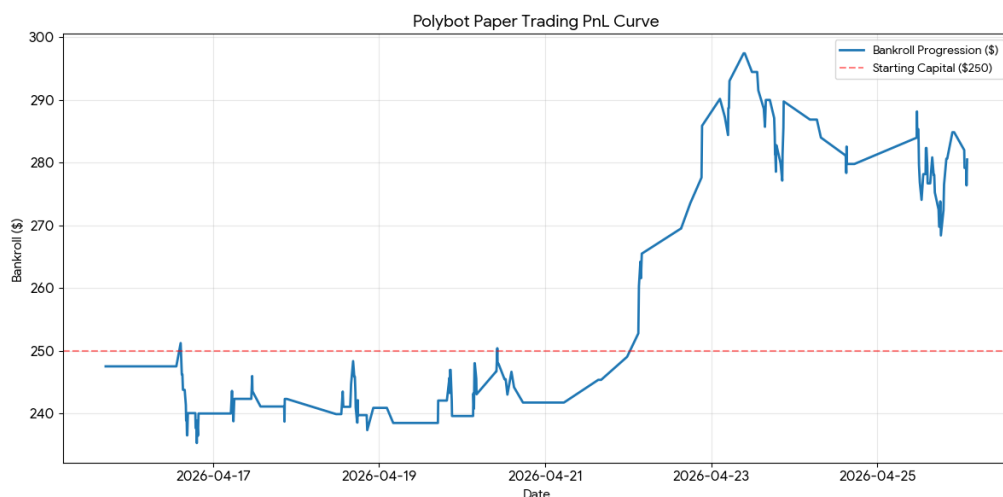
Μετρική	Τιμή / Αποτέλεσμα
Μέσο EV ανά σήμα	+7,35%
Win Rate (Fill-adjusted)	$\approx 44\%$
Ποσοστό κερδοφόρων runs (EV > 0)	100%
Μέση Τελική Απόδοση	+69,27%

Πίνακας 1: Συνοπτικά αποτελέσματα στοχαστικής προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη στατιστική ευρώστια του συστήματος, καθώς το 100% των προσομοιώσεων κατέγραψε θετική προσδοκώμενη αξία, παρά τις δυσμενείς συνθήκες εκτέλεσης

4.3 Paper Trading

Το σύστημα εκτελέστηκε σε paper trading mode σε VPS για ≈ 10 ημέρες (224 συναλλαγές). Η καμπύλη PnL εμφανίζεται στο Σχήμα 1.

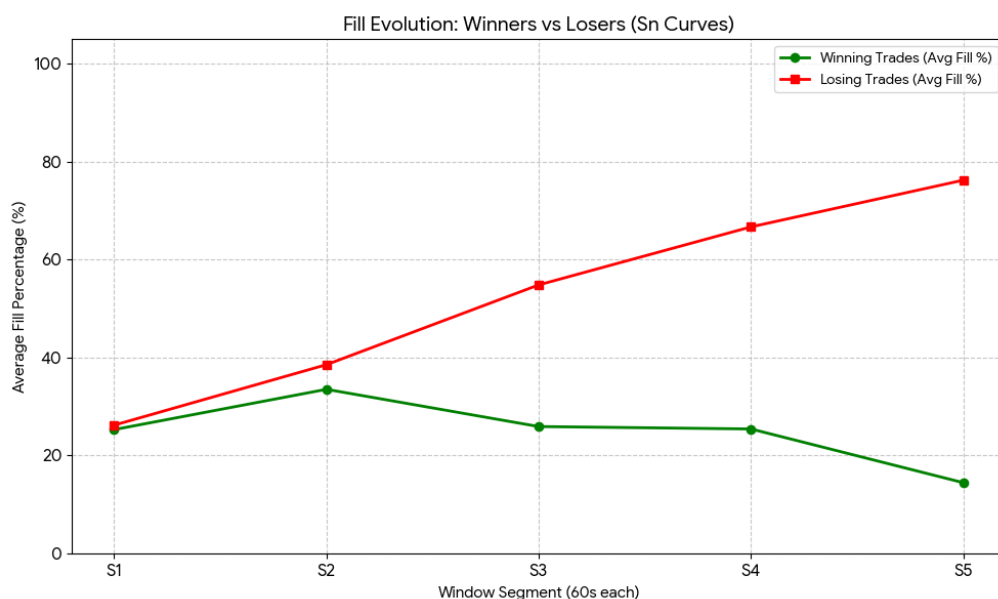


Σχήμα 1: Εξέλιξη PnL κατά τη διάρκεια του paper trading

4.4 Ανάλυση FillMonitor

Το FillMonitor κατέγραψε per-second snapshots του order book, διαιρώντας το 5λεπτο παράθυρο σε 5 τμήματα S_1-S_5 (Σχήμα 2).

Κρίσιμο εύρημα: το `fill_pct` αποτέλεσε τον ισχυρότερο predictor αποτελέσματος. Υψηλό `fill_pct` στο S_2 συσχετίζεται ισχυρά με αρνητικό αποτέλεσμα, ενώ $S_3 = 100\%$ αποτέλεσε απόλυτο δείκτη απώλειας στα παρατηρηθέντα δεδομένα ($fill_pct$ = ποσοστό χρόνου όπου taker price $\leq$ \$0,40).



Σχήμα 2: Καμπύλη εξέλιξης S_n segments στο FillMonitor

Η στρατηγική εκμεταλλεύεται market inefficiencies αγοράζοντας προσωρινά dips που δεν αντι-κατοπτρίζουν την τελική κατεύθυνση. Ενώ οι χαμένες θέσεις γεμίζουν στο 100% λόγω adverse selection, το σύστημα παράγει θετικό EV εστιάζοντας σε περιπτώσεις όπου η τιμή αγγίζει στιγμιαία το limit των \$0,40 και στη συνέχεια ανακάμπτει.

Η χρήση limit orders ως maker με μηδενική προμήθεια είναι **απαραίτητη** για τη βιωσιμότητα.

5 Συζήτηση και Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αρχική υπόθεση: τεχνικά σήματα από υψηλής συχνότητας OHLCV δεδομένα ενέχουν αξιοποιήσιμη προβλεπτική δύναμη για τις δυαδικές αγορές BTC.

Το θετικό EV (+7,35% ανά συναλλαγή) είναι στατιστικά ισχυρό σε 100% των Monte Carlo επαναλήψεων. Σε αντίθεση με τυχερά παιχνίδια όπου $EV \leq 0$, το σύστημα αποδεικνύεται συστηματική στρατηγική με θετική προσδοκώμενη αξία.

Ο κύριος περιορισμός είναι η περιορισμένη χρονική διάρκεια paper trading. Το σύστημα δοκιμάστηκε αποκλειστικά σε BTC, η γενίκευση σε ETH, SOL και άλλα ζεύγη αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, μαζί με adaptive limit strategy βάσει των S_n monitors και αξιοποίηση FillMonitor σήματος για πρόωρη έξοδο από χαμένες θέσεις.

Η προσθήκη του order book flow (S_1, S_2) στο training στοχεύει στη βέλτιστη αναγνώριση ιδανικών συνθηκών εισόδου στο στάδιο S_3 . Η ιδέα δοκιμάστηκε ήδη στην πράξη, αλλά λόγω έλλειψης δεδομένων δεν προσέφερε βελτίωση, αν και είναι κάτι που τελικά θα ενσωματωθεί στο σύστημα.

Κρίσιμης σημασίας για τη βιωσιμότητα του συστήματος είναι η μηδενική χρέωση *maker*. Ενώ ο *taker* πληρώνει προμήθεια αφαιρώντας ρευστότητα, το Polybot λειτουργεί ως *maker* τοποθετώντας limit orders στο CLOB, γεγονός που καθιστά τη στρατηγική κερδοφόρο.

Αναφορές

- [1] T. Fischer and C. Krauss, “Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions,” *European Journal of Operational Research*, vol. 270, no. 2, pp. 654–669, 2018.
- [2] J. Patel, S. Shah, P. Thakkar, and K. Kotecha, “Predicting stock and stock price index movement using trend deterministic data preparation and machine learning techniques,” *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 1, pp. 259–268, 2015.
- [3] T. Chen and C. Guestrin, “XGBoost: A scalable tree boosting system,” in *Proc. ACM SIGKDD*, 2016, pp. 785–794.
- [4] J. Wolfers and E. Zitzewitz, “Prediction markets,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 18, no. 2, pp. 107–126, 2004.
- [5] H. Yang, X. Y. Liu, and C. D. Wang, “FinGPT: Open-Source Financial Large Language Models,” *arXiv preprint arXiv:2306.06031*, 2023.
- [6] Z. Shen et al., “Agentic Trading: When LLM Agents Meet Financial Markets,” *arXiv preprint arXiv:2605.19337*, 2026.

Σύστημα Ελέγχου και Παρακολούθησης Ηλιακού Θερμοσίφωνα μέσω IoT

Ηλίας Δράκος, Διονύσιος Πυρομάλης

Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Σχολή Οικονομίας και Τεχνολογίας

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Τρίπολη

AM: 2022202200042, 2022202300038

Διδάσκων: Σπυρίδων Μπλιώνας, Καθηγητής

3 Ιουνίου 2026

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός καινοτόμου συστήματος ελέγχου και παρακολούθησης ηλιακού θερμοσίφωνα (IoT), το οποίο ενσωματώνει δυνατότητες καταγραφής περιβαλλοντικών συνθηκών. Λόγω των δομικών εμποδίων σε πολυώροφα κτίρια, η επικοινωνία μεταξύ της ταράτσας και του ηλεκτρικού πίνακα υλοποιείται μέσω τεχνολογίας Powerline Communication (PLC) [2], διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη μετάδοση δεδομένων θερμοκρασίας νερού, εξωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας. Το σύστημα ενσωματώνεται στο Home Assistant [5] μέσω πρωτοκόλλου MQTT (Auto-Discovery) [3] και προσφέρει μηχανισμούς ασφαλείας (Local Fallback), εξασφαλίζοντας αυτονομία και τοπικό έλεγχο σε περίπτωση απώλειας δικτύου.

1 Εισαγωγή

Σε πολυώροφα κτίρια, οι ένοικοι δεν έχουν άμεση εικόνα της θερμοκρασίας του νερού στον ηλιακό τους θερμοσίφωνα, οδηγώντας σε άσκοπη ενεργοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης και σπατάλη ενέργειας. Το προτεινόμενο σύστημα IoT γεφυρώνει αυτό το χάσμα προσφέροντας:

- Συνεχή παρακολούθηση θερμοκρασίας και τοπική απεικόνιση (OLED οθόνη στον πίνακα).
- Ενσύρματη μετάδοση δεδομένων (PLC) αξιοποιώντας την υπάρχουσα καλωδίωση 230V.
- Τοπικό και απομακρυσμένο έλεγχο (ON/OFF) μέσω κεντρικού συστήματος (Home Assistant).

Επιλογή Τεχνολογίας Επικοινωνίας

Το κύριο εμπόδιο στην ασύρματη επικοινωνία είναι η διέλευση του σήματος RF μέσα από πολλαπλές πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος.

Πίνακας 1: Σύγκριση Τεχνολογιών IoT (Ταράτσα προς Ισόγειο)

Τεχνολογία	LoRa	Z-Wave	Wi-Fi HaLow	PLC (Powerline)
Εμβέλεια με εμπόδια (Μπετόν)	1-3 km (ενδέχεται να δημιουργηθούν νεκρές ζώνες κάθετα)	20-30 m (Απαιτεί repeaters)	100-150 m	Εγγυημένη στην ίδια φάση ρεύματος
Αξιοπιστία	Μέτρια (Κλωβός Φαραντέι από τον πίνακα)	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή (Ενσύρματη)

Λόγω των περιορισμών σε αρχιτεκτονικές Mesh (Z-Wave) και των προβλημάτων εξασθένησης σήματος, επιλέχθηκε το πρωτόκολλο **PLC (μέσω του module KQ-130F)**. Η επιλογή αυτή αξιοποιεί την υπάρχουσα καλωδίωση 230V, αποφεύγοντας την ανάγκη για νέα δομημένη καλωδίωση, ενώ ταυτόχρονα παρακάμπτει πλήρως την ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση των δομικών υλικών.

3 Αρχιτεκτονική και Σχεδίαση Υλικού (Hardware)

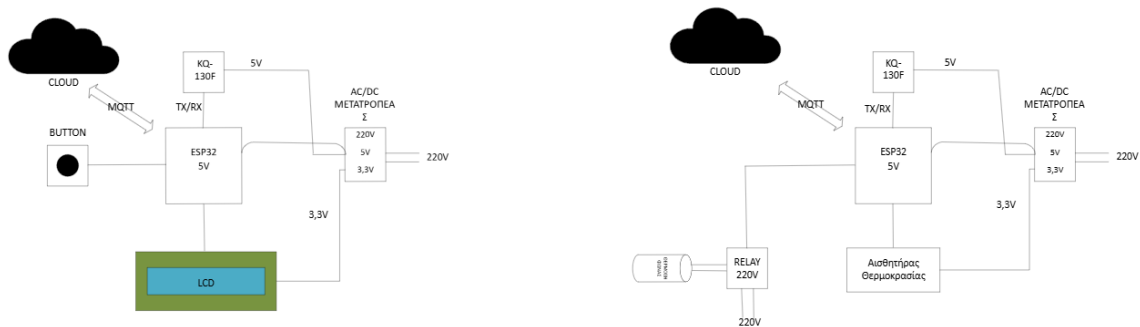
Το σύστημα αποτελείται από δύο διακριτούς κόμβους (Nodes), οι οποίοι ελέγχονται από μικροελεγκτές ESP32 [1]:

1. **Κόμβος Ταράτσας (Edge Controller):** Φιλοξενεί τον αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 [4] (επιλεγμένος για την ανθεκτικότητά του στο νερό και την ακρίβεια 1-Wire) και ένα ρελέ ισχύος 30A με οπτοαπομόνωση, το οποίο οδηγεί τον κεντρικό κοντάκτορα του θερμοσίφωνα.
2. **Κόμβος Πίνακα (Gateway & UI):** Διαθέτει οθόνη OLED SSD1306 για τοπική απεικόνιση και φυσικό μπουτόν ελέγχου.

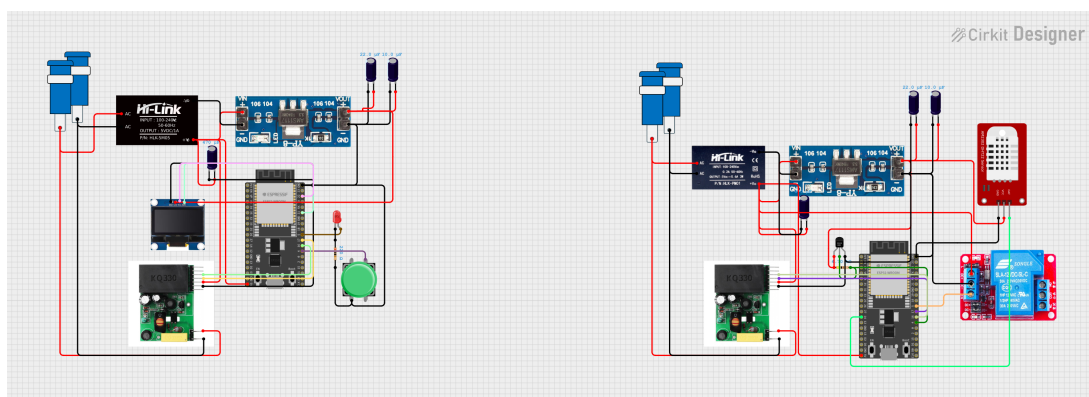
Για την προστασία των μικροελεγκτών, χρησιμοποιούνται βιομηχανικά τροφοδοτικά HLK-PM01 - HLK-5M05 (230V σε 5V) και σταθεροποιητές AMS1117 (5V σε 3.3V), εξασφαλίζοντας απουσία ηλεκτρικού θορύβου.

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός πίνακας εξαρτημάτων και κόστους για PLC

Εξάρτημα	Ποσότητα	Ενδεικτικό Κόστος
ESP32 Dev Board (για τάρατσα και πίνακα)	2	18 €
Μονάδα PLC KQ-130F (πομπός & δέκτης)	2	40 €
Οθόνη OLED 0.96" I2C (για τον πίνακα)	1	5 €
DS18B20 Waterproof	1	4 €
Μονάδα Ρελέ 20A / 5V (για την τάρατσα)	1	4 €
Μετασχηματιστές 230V/5V/3.3V (για τάρατσα και πίνακα)	4	15 €
Διάφορα (αντιστάσεις, καλώδια)	-	7 €
Σύνολο		~93 €



Σχήμα 1: Μπλοκ διάγραμμα επικοινωνίας των κόμβων συστήματος.



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση των δύο κόμβων.

Σχεδίαση Λογισμικού και Διαδίκτυο των Πραγμάτων

4.1 MQTT Auto-Discovery & Source of Truth

Αντί της στατικής δημιουργίας εικονικών διακοπών (Helpers) που πάσχουν από προβλήματα συγχρονισμού, υλοποιήθηκε η μέθοδος **MQTT Auto-Discovery**. Κατά την εκκίνηση, το ESP32 δημοσιεύει ένα JSON Configuration Payload στο Home Assistant, δημιουργώντας δυναμικά τις οντότητες (Sensors, Switches).

Η αρχιτεκτονική ακολουθεί το πρότυπο **Source of Truth**: Η κατάσταση (state) στο UI ενημερώνεται *αποκλειστικά* όταν το υλικό (hardware) δημοσιεύσει την επιβεβαίωση της ενέργειας, διασφαλίζοντας απόλυτη συνέπεια δεδομένων.

4.2 Ασύγχρονη Επανασύνδεση & Τοπική Εφεδρεία (Local Fallback)

Σε περιπτώσεις παρατεταμένης απώλειας δικτύου Wi-Fi, η κλασική πρακτική εξαναγκασμένης επανεκκίνησης (Watchdog Reset) απορρίφθηκε. Στη θέση της αναπτύχθηκε μη-μπλοκάρουσα (non-blocking) λογική επανασύνδεσης. Αυτό διασφαλίζει το **Local Fallback**: Εάν αποτύχει η σύνδεση στο Internet, το σύστημα δεν αδρανοποιείται. Ο κόμβος του πίνακα επικοινωνεί αδιάλειπτα με την τάρατσα μέσω του πρωτοκόλλου PLC, επιτρέποντας στον χρήστη τον πλήρη τοπικό χειρισμό.

5 Δοκιμές και Αξιολόγηση

Για την πιστοποίηση της αξιοπιστίας, διενεργήθηκαν δοκιμές (Test Cases) σε πραγματικές συνθήκες (5 όροφοι απόστασης):

Πίνακας 3: Αποτελέσματα Δοκιμών (Test Cases)

Κωδικός	Περιγραφή Δοκιμής	Αποτέλεσμα / Κριτήριο Επιτυχίας
TC-01	Έλεγχος ξεύξης PLC: Τοποθέτηση πομπού στην τάρατσα, μέτρηση σήματος και λήψης πακέτων μέσω του καλωδίου 230V στο ισόγειο.	Σταθερή λήψη με απώλεια πακέτων <5% σε διάρκεια 24 ωρών.
TC-02	Βαθμονόμηση DS18B20: Βύθιση σε νερό 0°C (πάγος) και 100°C (βραστό νερό).	Απόκλιση $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ και στις δύο μετρήσεις.
TC-03	Τοπικός έλεγχος: Πάτημα push button στον ηλεκτρικό πίνακα.	Άμεση εναλλαγή κατάστασης ρελέ και ενημέρωση OLED εντός 0.5 sec.
TC-04	Απομακρυσμένος έλεγχος: Εντολή ON/OFF μέσω MQTT.	Ενεργοποίηση ρελέ και εμφάνιση θερμοκρασίας στην εφαρμογή εντός 3 sec.
TC-05	Συγχρονισμός κατάστασης: Αλλαγή κατάστασης από push button.	Το Home Assistant ενημερώνει την κατάσταση (state) εντός 3 δευτερολέπτων.
TC-06	Έλεγχος Fail-Safe: Απενεργοποίηση router και ενεργοποίηση θερμοσίφωνα τοπικά.	Αυτόματη απενεργοποίηση μετά από 2 ώρες (ή τον προκαθορισμένο χρόνο).
TC-07	Έλεγχος Android app: Εγκατάσταση Home Assistant σε Android, σύνδεση και έλεγχος.	Πλήρης λειτουργικότητα (ON/OFF, θερμοκρασία) από Android.
TC-08	Έλεγχος αισθητήρα DHT22: Μέτρηση εξωτερικής θερμοκρασίας/υγρασίας και σύγκριση με εμπορικό ψηφιακό υγρόμετρο.	Απόκλιση $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ στη θερμοκρασία και $\leq \pm 5\%$ στην υγρασία.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία αποδεικνύει ότι η ενσωμάτωση τεχνολογίας PLC (KQ-130F) σε κόμβους ESP32 αποτελεί την πιο αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική λύση για τηλεμετρία εντός πολυώροφων κτιρίων, με το συνολικό κόστος του υλικού (BOM) να ανέρχεται σε μόλις ~90€. Ο συνδυασμός με το Home Assistant μέσω πρωτοκόλλου MQTT, επικουρούμενος από μηχανισμούς Local Fallback, καθιστά το σύστημα ανθεκτικό σε σφάλματα δικτύου (fault-tolerant).

Περιορισμοί Συστήματος: Η κύρια πρόκληση της τεχνολογίας PLC είναι η απαίτηση οι δύο κόμβοι να βρίσκονται στην ίδια ηλεκτρική φάση του κτιρίου. Σε τριφασικές εγκαταστάσεις όπου η ταράτσα και ο πίνακας του ισογείου διαφέρουν χρωματικά ως προς τη φάση τροφοδοσίας, απαιτείται η χρήση γεφυρωτή φάσεων (Phase Coupler) στον κεντρικό πίνακα για τη διασφάλιση της ορθής μετάδοσης του σήματος.

Μελλοντικές Επεκτάσεις: Βασικό στόχο για τα επόμενα στάδια ανάπτυξης αποτελεί η εμπορική αξιοποίηση (commercialization) του συστήματος και η μετάβασή του από λειτουργικό πρωτότυπο σε εμπορικό προϊόν (market-ready product). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον σχεδιασμό ειδικών τυπωμένων κυκλωμάτων (Custom PCBs) βιομηχανικών προδιαγραφών και την απόκτηση πιστοποιήσεων (π.χ. CE) για ασφαλή τοποθέτηση σε πίνακες ράγας (DIN rail). Παράλληλα, σε επίπεδο λογισμικού, σχεδιάζεται η ενσωμάτωση προγνωστικών μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης (Machine Learning). Αντλώντας ανοιχτά μετεωρολογικά δεδομένα (APIs), το σύστημα θα προβλέπει την ηλιοφάνεια των επόμενων ωρών, αποτρέποντας προληπτικά την άσκοπη ενεργοποίηση της αντίστασης. Έτσι, το προϊόν θα αποτελεί μια ολοκληρωμένη και εξόχως ανταγωνιστική λύση εξοικονόμησης ενέργειας για συστήματα Έξυπνου Σπιτιού.

Αναφορές

- [1] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, Version 4.3, 2023. Διαθέσιμο: <https://www.espressif.com/>
- [2] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, and T. G. Swart, *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] OASIS Standard, *MQTT Version 5.0*. 2019. Διαθέσιμο: <https://mqtt.org/>
- [4] Maxim Integrated, *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet*. Διαθέσιμο: <https://www.maximintegrated.com/>
- [5] Home Assistant, *Open source home automation that puts local control and privacy first*. Διαθέσιμο: <https://www.home-assistant.io/>

UAVs as Autonomous Network Edge Nodes: Field Trials and Validation

Ioanna Taxiarchia Michou, Anastasios Kalomiris, Toni Ion Mazilu

Department of Informatics and Telecommunications, University of the Peloponnese, Tripolis
dit22133@go.uop.gr, dit22067@go.uop.gr, a.mazilu@uop.gr

June 3, 2026

Abstract

This paper presents the concept and trial of a service-centric UAV system that transforms a conventional unmanned aerial vehicle into an autonomous edge computing node. A prototype quadcopter equipped with a companion computer and multiple communication modems ascended to 20 meters altitude and autonomously executed an AI inference model onboard. The inference results and flight telemetry were transmitted to a ground-side database through the terrestrial NB-IoT network, while the user was able to select services and receive the results through a web application.

Keywords: UAV, Edge Computing, Service-Centric System, K3s, NB-IoT, Field Trials

1 Introduction

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are increasingly deployed in precision agriculture, environmental monitoring and infrastructure inspection [1]. However, most operational systems follow a flight-centric paradigm, where onboard computation serves only navigation and stabilization, while application-level processing is offloaded to ground servers [2]. This creates tight coupling between flight control and service execution, requiring continuous high-bandwidth links and limiting flexibility in coverage-limited environments.

Recent advances in lightweight container orchestration, cellular connectivity (4G/5G) and satellite networks (NTN) enable a shift toward service-centric UAV operation [3]. In this model, the UAV functions as an autonomous edge computing node within a cloud-fog-edge continuum, hosting containerized microservices deployed dynamically via platforms such as K3s [4]. Container orchestration platforms have matured to the point where they run on ARM-based single-board computers, yet UAV applications are typically evaluated assuming off-board computation [5]. Meanwhile, NTN connectivity, evolving from 5G NTN (Release 17) toward 6G integration [6, 7], offers NB-IoT-based telemetry delivery in areas lacking terrestrial coverage.

While the conceptual architecture has been established [3], practical field validation remains limited. This paper addresses this gap with a complete field trial: a prototype UAV with a Raspberry Pi 5, multiple communication modems (broadband and NB-IoT) and a K3s orchestration stack executed an AI inference model at 20 m altitude. A web-based portal enables non-expert users to request and receive services transparently. Section 2 describes the architecture, Section 3 the prototype, Section 4 the field trial, Section 5 the service portal and Section 6 concludes.

System Architecture

The architecture, illustrated in Figure 1, organizes the system into three tiers: Edge Infrastructure (UAV node), Cloud Infrastructure (orchestrator, application repository, data storage) and Access Infrastructure (user portal). The UAV hosts a lightweight container runtime managed by K3s, a certified Kubernetes distribution for resource-constrained environments. The cloud-side K3s server maintains the control plane, while the UAV operates as an agent node.

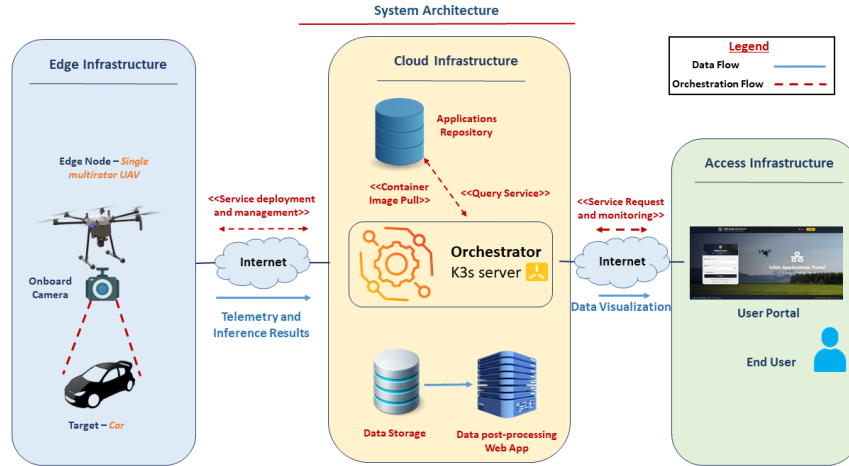


Figure 1: System architecture showing the edge, cloud and access infrastructure tiers.

A key principle is separation between flight-critical and application-level workloads. The FCU retains exclusive responsibility for stabilization and navigation, while the companion computer independently hosts the service runtime, ensuring application failures do not compromise flight safety [3]. The network layer supports broadband cellular (4G/5G) for high-throughput data and service orchestration and narrowband NB-IoT (terrestrial and satellite) for lightweight telemetry and result transmission [5]. On the ground side, the service backend aggregates results, performs persistent storage and exposes interfaces through a web application. Users interact via HTTPS/Web API to request services and access results without UAV-specific expertise.

3 Prototype Implementation

The prototype was built on a custom quadcopter with take-off mass below 2 kg. A Raspberry Pi 5 (4 GB RAM, quad-core ARM Cortex-A76 at 2.4 GHz) was integrated as the companion computer, electrically isolated from the FCU and powered through a dedicated module connected to the UAV battery. The Pi runs Raspberry Pi OS with the K3s agent installed, joining the cloud-hosted cluster over the network.

For connectivity, the prototype incorporates: (i) a 4G/5G cellular modem for broadband service orchestration and container image transfer, and (ii) an NB-IoT modem for terrestrial narrowband telemetry and inference result transmission. The system also supports satellite NB-IoT (NTN NB-IoT) as a fallback for areas without terrestrial coverage [6]. A VPN tunnel connects the companion computer to the cloud infrastructure, allowing the UAV to appear as a node within the ground-side environment. Figure 2 shows the prototype.

4 Field Trial and Results

The field trial was conducted in a rural agricultural area in Greece with variable cellular coverage. The UAV ascended to 20 meters, establishing stable hover while the companion computer maintained its K3s

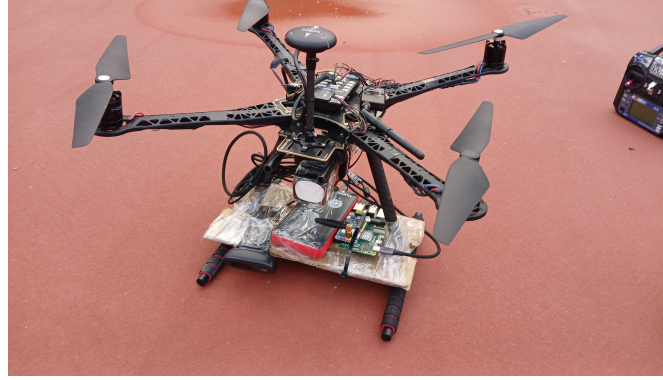


Figure 2: The prototype UAV with onboard Raspberry Pi 5, cellular modem and NB-IoT modules.

agent connection. An agriculture-oriented AI inference model, pre-deployed as a container image, was activated on the UAV through the K3s orchestration mechanism. Container deployment from cloud to UAV completed in approximately 8 seconds. The model performed local inference onboard rather than streaming raw data to ground servers.

The inference results, together with flight telemetry (GPS coordinates, altitude, battery status), were transmitted to a ground-side database through the terrestrial NB-IoT network. The mean latency from inference completion to database insertion was approximately 3 seconds, acceptable for non-time-critical agricultural monitoring. The broadband 4G link measured 8–15 Mbps, confirming suitability for container image transfer. Table 1 summarizes the key measurements.

Table 1: Summary of field trial measurements.

Parameter	Value / Observation
Flight altitude	20 m (stable hover)
K3s RAM consumption	< 450 MB
Container deployment time	~8 s (cloud to UAV)
NB-IoT result latency	~3 s (inference to DB)
Broadband link (4G)	8–15 Mbps
Onboard AI execution	Successful, no flight degradation
End-to-end user workflow	Fully functional, zero technical interaction

The trial confirmed that: (i) K3s operated reliably on the Raspberry Pi 5 during flight, consuming less than 450 MB RAM; (ii) the AI model executed without degrading flight performance; (iii) NB-IoT provided a viable low-power result transmission channel; and (iv) the entire workflow functioned without requiring end-user interaction with flight-control or infrastructure components.

5 User-Facing Service Portal

A web-based UAV Applications Portal was developed to abstract all technical complexity from end users. Through this portal, users can browse, select and deploy services onto the UAV edge node without expertise in UAV piloting, container orchestration or networking. Figure 3 presents the available service catalog.

When a user selects a service, the portal issues a deployment request to the K3s server, which schedules the corresponding container on the UAV agent node. The user receives inference results and telemetry through the portal dashboard without needing to understand the deployment pipeline or network topology. This interaction model aligns with the service-centric vision where the UAV is consumed as a service endpoint rather than operated as a piloted vehicle.

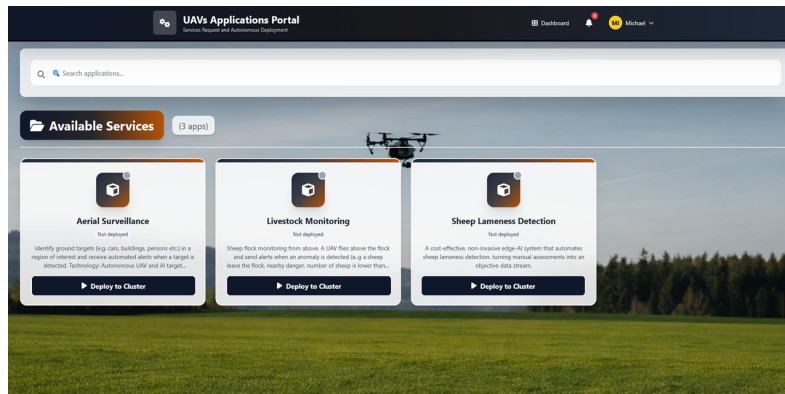


Figure 3: Service catalog showing deployable applications (Aerial Surveillance, Livestock Monitoring, Sheep Lameness Detection).

6 Conclusions

This paper presented the field trial validation of a service-centric UAV edge node, demonstrating that a lightweight UAV with a Raspberry Pi 5 companion computer can function as an autonomous edge computing platform within a cloud-fog-edge continuum. The trial confirmed reliable operation of onboard AI inference, K3s-based orchestration and multi-connectivity (4G and NB-IoT) at 20 m altitude. Performance metrics, sub-10-second container deployment, sub-3-second NB-IoT result delivery and K3s footprint below 450 MB, validate feasibility on resource-constrained hardware. The service portal successfully abstracted all complexity, enabling non-expert users to request and receive UAV-based services transparently. Future work will address multi-UAV orchestration, satellite NTN NB-IoT integration for remote coverage [7] and energy-aware container scheduling.

References

- [1] Samira Hayat, Evsen Yanmaz, and Raheeb Muzaffar. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4):2624–2661, 2016.
- [2] Candal-Ventureira David, Castaño Francisco, Gil-Castiñeira Felipe, and Fondo-Ferreiro Pablo. Is the edge really necessary for drone computing offloading? an experimental assessment in carrier-grade 5g operator networks. *Software: Practice and Experience*, 53:579–599, 10 2022.
- [3] Michael Batistatos, Antonio Mazilu, Diogo Oliveira, Sergio Aguilar, Michail-Alexandros Kourtis, George Xilouris, and Nikolaos Sagias. From flight-centric UAV systems to service-centric edge nodes. In *Proceedings of the Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET 2026)*, Greece, 2026.
- [4] K3s – lightweight Kubernetes. <https://k3s.io>. Accessed: 2026.
- [5] Yong Zeng, Qingqing Wu, and Rui Zhang. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond. *Proceedings of the IEEE*, 107(12):2327–2375, 2019.
- [6] Jeroen Wigard, Erika Juan, Jens Stanczak, Mads Lauridsen, Andrea Marcone, Sebastian Hoppe, Amir Ahmadzadeh, Ali Masri, and Duc-Hien Tran. Ubiquitous 6G service through non-terrestrial networks. *IEEE Wireless Communications*, 30(6):12–18, 2023.
- [7] Muhammad Mahtab Saad, Muhammad Asghar Tariq, Muhammad Toaha Raza Khan, and Dongkyun Kim. Non-terrestrial networks: An overview of 3GPP release 17 & 18. *IEEE Internet of Things Magazine*, 7(1):20–26, 2024.