

Ελλάδα 2.0 ΕΘΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΔΡΑΣΗ «Εμβληματικές δράσεις σε διαθεματικές επιστημονικές περιοχές με ειδικό ενδιαφέρον για την σύνδεση με τον παραγωγικό ιστό»

**Δίκτυο Αριστείας για την Ανάπτυξη, Διάδοση και Εφαρμογή Τεχνολογιών Ψηφιακού Μετασχηματισμού στην Ελληνική Μεταποιητική Βιομηχανία
Network of Excellence for the Development, Dissemination and Application of Digital Transformation Technologies in the Greek Manufacturing Industry
GREECE4.0**

[ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ: TAEDR-0535864]

Παραδοτέο:

Π3.1

Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Ιούνιος 2025

Περίληψη - Ελληνικά

Το Παραδοτέο 3.1 αφορά την πιλοτική εγκατάσταση και επίδειξη των τεχνολογικών λύσεων οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του έργου Greece4.0 σε ελεγχόμενα εργαστηριακά περιβάλλοντα. Στόχος είναι η επαλήθευση της λειτουργικότητας, της τεχνολογικής ωριμότητας και της επιχειρησιακής αξίας των εφαρμογών πριν από την εφαρμογή τους σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες.

Το παραδοτέο παρουσιάζει αναλυτικά τη διαδικασία ολοκλήρωσης, εγκατάστασης και δοκιμής λύσεων καλύπτοντας κρίσιμους τομείς του ψηφιακού μετασχηματισμού του μεταποιητικού τομέα, όπως μεταξύ άλλων αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα ενδο-εφοδιαστικής, πλατφόρμες Ψηφιακών Διδύμων για συνεργατικά ρομπότ, εργαλεία βελτιστοποίησης προσθετικής κατασκευής, πλατφόρμες παραγωγής συνθετικών δεδομένων για εκπαίδευση αλγορίθμων ΤΝ, Industrial IoT υποδομές, κυβερνοασφάλεια, εφαρμογές XR εκπαίδευσης και εργαλεία υποστήριξης λήψης αποφάσεων.

Για κάθε λύση περιγράφονται τα σενάρια επίδειξης, οι συνθήκες εργαστηριακής αξιολόγησης και οι δείκτες απόδοσης (KPIs), αναδεικνύοντας τη συμβολή τους στη βελτίωση της αποδοτικότητας, της ευελιξίας, της ασφάλειας και της βιωσιμότητας των σύγχρονων παραγωγικών συστημάτων.

Περίληψη - Αγγλικά

Deliverable 3.1 focuses on the pilot installation and demonstration of the technological solutions developed within the Greece4.0 project in controlled laboratory environments. The main objective is to validate the functionality, technological maturity, and operational value of the proposed applications before their deployment in real industrial settings.

The deliverable provides a detailed description of the integration, setup, and testing procedures of multiple digital transformation solutions addressing key challenges of modern manufacturing. These include autonomous mobile robotic systems for intralogistics, Digital Twin platforms for collaborative industrial robots enhanced with AI, hybrid optimization tools for additive manufacturing processes, synthetic data generation platforms for AI model training, Industrial Internet of Things infrastructures, XR-based training and knowledge transfer applications, and advanced decision-support systems for production management.

For each solution, representative use-case scenarios, laboratory demonstration setups, and performance indicators (KPIs) are presented, highlighting measurable improvements in efficiency, flexibility, safety, and resilience of manufacturing operations. Overall, the pilot installations confirm the readiness and industrial relevance of the Greece4.0 technological framework towards Industry 4.0 and Industry 5.0 adoption.

Περιεχόμενα

Περίληψη - Ελληνικά.....	ii
Περίληψη - Αγγλικά	iii
Περιεχόμενα.....	iv
Κατάλογος Εικόνων	vii
Κατάλογος Πινάκων	ix
1. Εισαγωγή – Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου	1
2. Πιλοτική Εγκατάσταση των Εφαρμογών του έργου Greece4.0.....	2
2.1. Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής.....	2
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	2
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	3
2.2. Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης.....	5
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	5
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	6
2.3. Λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση υβριδικών μεθόδων.....	8
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	8
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	8
2.4. Λογισμικό για την δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης.....	10
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	10
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	10
2.5 ^α . Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Εξοπλισμού στην Βιομηχανία 4.0	12
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	12
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	13
2.5 ^β . Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Διαδικασιών στην Βιομηχανία 4.0.....	16
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	16
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	23
2.6. Πλατφόρμα Ανάλυσης και Διαχείρισης Δεδομένων από το Βιομηχανικό Δίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things)	25
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	25
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	28
2.7. Ολογράμματα βασισμένα σε Ψηφιακά Δίδυμα για μεταφορά γνώσης και εκπαίδευση εργαζομένων-χειριστών στο περιβάλλον της Βιομηχανίας 4.0.....	30
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	30
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	33

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

2.8. Εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής και διαχείρισης προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής.....	35
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	35
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	37
2.9. Κυκλικές αλυσίδες αξίας μέσω διαχείρισης και παρακολούθησης δευτερογενών υλικών με χρήση ψηφιακών διδύμων και διαβατηρίων προϊόντων.....	44
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	44
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	47
2.10 ^α . Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων.....	49
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	49
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	50
2.10 ^β . Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικού ελέγχου.....	53
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	53
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	60
2.11. Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής.....	61
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	61
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	62
2.12. Βιομηχανικό μετασύμπαν με την χρήση επεξηγηματικής τεχνητής νοημοσύνης για εφαρμογές επιχειρηματικής νοημοσύνης.....	67
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	67
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	69
2.13. Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες.....	72
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	72
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	73
2.14. Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής.....	75
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	75
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	77
2.15. Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα.....	84
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	84
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	85
2.16. Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ.....	88
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	88
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	90
2.17. Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία.....	92
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	92
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	96

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

2.18. Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων.....	98
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος.....	98
Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	102

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής και Ψηφιακού διδύμου	16
Εικόνα 2 Εργαστηριακή διάταξη βιομηχανικής γραμμής παραγωγής	17
Εικόνα 3 Περιγραφή ελεγκτή ρομποτικού βραχίονα σε AutomationML.....	18
Εικόνα 4 Ορισμός προγραμματισμένων λειτουργιών ελέγχου σε AutomationML.....	18
Εικόνα 5 Περιγραφή εννοιών της γραμμής παραγωγής στο AutomationML Editor	19
Εικόνα 6 Τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο της γραμμής παραγωγής.....	20
Εικόνα 7 Τα Devices του ThingsBoard για την λήψη δεδομένων από τους ελεγκτές της γραμμής παραγωγής.....	21
Εικόνα 8 Συγκέντρωση και παρουσίαση δεδομένων από τη βιομηχανική γραμμή παραγωγής.....	21
Εικόνα 9 Process Orchestrator: Σελίδα διαχείρισης βιομηχανικών μηχανών της γραμμής παραγωγής... ..	22
Εικόνα 10 Process Orchestrator: Σελίδα διαχείρισης ρουτινών της γραμμής παραγωγής.....	22
Εικόνα 11 Process Orchestrator: Σελίδα διαχείρισης διαδικασιών παραγωγής.....	23
Εικόνα 12 Siemens S7 1200 CPU 1214C AC/DC/RLY	25
Εικόνα 13 Είσοδος Χρήστη στην πλατφόρμα.....	26
Εικόνα 14 Ροή Δεδομένων	28
Εικόνα 15 Αρχεία φορτωμένα στην εφαρμογή XR-Creator	31
Εικόνα 16 Περιγραφή σεναρίου με χρήση Nodes στην εφαρμογή XR-Creator.....	31
Εικόνα 17 JSON δοκιμαστικού σεναρίου όπως παράχθηκε από την εφαρμογή XR-Creator	32
Εικόνα 18 Λίστα σεναρίων στην εφαρμογή XR-Viewer	33
Εικόνα 19 Τρισδιάστατα μοντέλα στην εφαρμογή XR-Viewer	33
Εικόνα 20 Σχεδίαση ενός βασικού δικτύου παραγωγής για επαλήθευση λειτουργικότητας τεχνολογικής λύσης 8 (2 σταθμοί εργασίας – μηχανές, ένας ελεγκτής ασαφούς λογικής)	38
Εικόνα 21 Ενδεικτική απεικόνιση αποτελεσμάτων κατά την εκτέλεση του πιλοτικού σεναρίου 0.....	40
Εικόνα 22 Σχεδίαση δικτύου παραγωγής (3 μηχανές σε σειρά) σε περιβάλλον Simulink για τα σενάρια δοκιμών 1 (πάνω – έλεγχος με ευρετική μέθοδο) και 2 (κάτω – έλεγχος με καταναμημένο ελεγκτή ασαφούς λογικής)	41
Εικόνα 23 Συγκριτική αναπαράσταση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης και προσομοίωσης δικτύου παραγωγής με χρήση του λογισμικού αναφοράς (εμπορικό λογισμικό Simulink, αριστερή στήλη) και της εργαλειοθήκης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της τεχνολογικής λύσης 8 (δεξιά στήλη).....	41
Εικόνα 24 Το περιβάλλον προσομοίωσης του εργαλείου PSM φιλοξενεί και το εργαλείο SBSC	45
Εικόνα 25 Απεικόνιση υπολογισμού KPIs από το εργαλείο SBSC και εισαγωγή εξισώσεων στο script editor	46
Εικόνα 26 Η πλατφόρμα Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος συνοψίζει τα αποτελέσματα της λύσης (αριστερά η απεικόνιση της πλατφόρμας σε οθόνη υπολογιστή, δεξιά η απεικόνιση σε κινητή συσκευή)	47
Εικόνα 27 Το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος συνοψίζει και απεικονίζει τα αποτελέσματα της λύσης .47	47
Εικόνα 28 Επισκόπηση της λύσης προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων	49
Εικόνα 29 Διεπαφή συστήματος αναλυτικής δεδομένων με Tensorboard.....	50
Εικόνα 30 Η ταχυκίνητη CNC φρέζα με τους εγκατεστημένους αισθητήρες της	51
Εικόνα 31 Η μονάδα ψυχρής έλασης, η εμπρόσθια όψη των κυλίνδρων, και η οπίσθια όψη των κυλίνδρων	52
Εικόνα 32 Απεικόνιση της διαδικασίας ψυχρής έλασης στη μονάδα έλασης και της διαδικασίας παραμόρφωσης και μείωσης του μεγέθους των κόκκων.....	52
Εικόνα 33 Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής νανοσωματιδίων	53
Εικόνα 34 Προεπισκόπηση αρχείου .xlsx με την κατάλληλη αναπαράσταση των δεδομένων πεδίου	54
Εικόνα 35 Δεδομένα πεδίου για την εκπαίδευση του δικτύου RBFNN του MPC.....	55
Εικόνα 36 Πεδία κώδικα για διενέργεια προσομοιώσεων κλειστού βρόχου.....	56
Εικόνα 37 Κεντρική οθόνη εφαρμογής εποπτικού ελέγχου HMI	56

Εικόνα 38 Αναδυόμενα παράθυρα για χειροκίνητο έλεγχο μεταβλητών εκ χειρισμού και προσδιορισμό παραμέτρων προβλήματος βελτιστοποίησης	58
Εικόνα 39 Οθόνη ιστορικών δεδομένων των μεταβλητών ελέγχου	59
Εικόνα 40 Οθόνη ιστορικών δεδομένων σε μορφή γραφήματος (Trend View Display)	59
Εικόνα 41 Αυτοματισμός Αποθήκευσης Κιβωτίων	61
Εικόνα 42 Αυτοματισμός Αποθήκευσης Παλετών	61
Εικόνα 43 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης σφαλμάτων αυτοματισμού αποθήκευσης παλετών	63
Εικόνα 44 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης σφαλμάτων αυτοματισμού αποθήκευσης κιβωτίων.....	63
Εικόνα 45 Σελίδα Ψηφιακού Δίδυμου μέρος 1.....	64
Εικόνα 46 Σελίδα Ψηφιακού Δίδυμου μέρος 2.....	65
Εικόνα 47 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων από το WMS.....	66
Εικόνα 48 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων συλλογής παραγγελιών	66
Εικόνα 49 Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής της Τελικής Έκδοσης του Core	68
Εικόνα 50 Απόσπασμα από αρχείο txt που έχει παραχθεί από τη Unity μετά από εκτέλεση του σεναρίου εκπαίδευσης. Φαίνονται οι κινήσεις που εκτέλεσε ο εκπαιδευόμενος στο εικονικό περιβάλλον.....	68
Εικόνα 51 Οι τρεις μέθοδοι δοκιμής της λύσης.....	69
Εικόνα 52 Εικόνες από τα στάδια εφαρμογής του σεναρίου δοκιμής	70
Εικόνα 53 Εικόνες από την ολοκλήρωση του σεναρίου στο VR	71
Εικόνα 54 Εικόνες από το πόστο στη βιομηχανία.....	71
Εικόνα 55 Το DJI Mini 2 χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των καταμετρήσεων	72
Εικόνα 56 Dashboard παρακολούθησης θερμοκρασίας και υγρασίας σε ασφαλή υποδομή edge computing.....	75
Εικόνα 57 Αρχιτεκτονικό Διάγραμμα ασφαλούς αποκεντρωμένης διαχείρισης ταυτότητας σε IIoT.....	76
Εικόνα 58 Το ψηφιακό προφίλ ταχύτητας του MLDSA security-level 5 μέσω του Vitis-profiler.....	79
Εικόνα 59 Η αρχιτεκτονική του NTT πολλαπλασιαστή πολυωνύμων σε υλικό.....	80
Εικόνα 60 Διάγραμμα Σεναρίου χρήσης που απεικονίζει τις βασικές ροές onboarding, έκδοση, παρουσίασης, επαλήθευσης και ανάκλησης διαπιστευτηρίων μεταξύ Issuer, Holder και Verifier στο πιλοτικό σύστημα.....	82
Εικόνα 61 Διασύνδεση όλων των βασικών τεχνολογικών συνιστωσών κατά το onboarding και credential issuance.	82
Εικόνα 62 Διάγραμμα ροής των μηνυμάτων μεταξύ Holder, Issuer και Verifier σε όλα τα στάδια.....	83
Εικόνα 63 Μοντέλο κάμερας Sony IMX265 MER2-302-37GCP.....	88
Εικόνα 64 TLSG105PE ως Ethernet switch	88
Εικόνα 65 Αποστάσεις μεταξύ των τριών καμερών	89
Εικόνα 66 Αποτελέσματα εκτίμησης εργονομικής κατάστασης με την μορφή heatmap	90
Εικόνα 67 Εκτίμηση εργονομικής κατάστασης στο 21ο καρέ.....	91
Εικόνα 68 Αριστερά: Όλα τα νευρωνικά δίκτυα εκτελούνται στο εικονιζόμενο μηχάνημα στο γραφείο αριστερά που στεγάζεται στο Πανεπιστήμιο Κρήτης και είναι διαθέσιμο στην διεύθυνση http://greece40.csd.uoc.gr/ . Δεξιά: Πειραματικές δοκιμές των εφαρμογών πραγματοποιήσαμε τόσο σε ανοιχτά σύνολα δεδομένων όσο και στην εγκατάσταση I.C.HUMANS https://www.ics.forth.gr/hccv/project/15293 που παραχωρήθηκε στο Πανεπιστήμιο Κρήτης για την εκτέλεση των πειραμάτων.	92
Εικόνα 69 Κεντρική σελίδα λύσης 17 (http://greece40.csd.uoc.gr/) δίνοντας τις διάφορες διαθέσιμες επιλογές για εκτέλεση εφαρμογών.....	92
Εικόνα 70 Δοκιμές της εφαρμογής παρακολούθησης της αρθρωτικής κίνησης του ανθρώπινου σώματος.....	93
Εικόνα 71 Εκτέλεση της εφαρμογής από φυλλομετρητή μέσω της γραφικής διεπαφής Gradio.	94
Εικόνα 72 Εκτέλεση της εφαρμογής σε δεδομένα από γραμμές εργασίας σε εργοστάσια, και επιτήρηση των αποτελεσμάτων.....	94
Εικόνα 73 Χρήση των δυνατοτήτων της εφαρμογής σε ένα σενάριο που περιλαμβάνει την ψηφιοποίηση της κυκλοφορίας στους δρόμους χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες κατανόησης σκηνής που προσφέρει η λύση μας. Χρησιμοποιώντας τους χάρτες βάθους και κλάσης οχημάτων, τοποθετούμε δυο σημεία στην	

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

εικόνα (κίτρινες κουκίδες στην εικόνα χρώματος), Καθώς αυτοκίνητα περνούν η απόκριση του δικτύου μας μας επιτρέπει τον εντοπισμό των αυτοκινήτων (πράσινα γραφήματα) από τα οποία ο άξονας X περιλαμβάνει τον χρόνο και ο άξονας Y την παρουσία ή όχι ενός οχήματος μια δεδομένη στιγμή.....	95
Εικόνα 74 Εκτέλεση της εφαρμογής εξαγωγής βάθους/πόζας/κλάσης/ περιγραφής από φυλλομετρητή μέσω της γραφικής διεπαφής Gradío	95
Εικόνα 75 Εκτέλεση του οπτικο-γλωσσικού μοντέλου μέσω φυλλομετρητή gradío και επερωτήσεις σε σκηνές από βιομηχανικά περιβάλλοντα.....	96
Εικόνα 76 Πειραματική διάταξη γραμμής συναρμολόγησης του προϊόντος (πλανητικό σύστημα οδοντωτών τροχών) και η τελική μορφή του. Η εγκατάσταση του πιλοτικού συστήματος απαιτεί (α) την τοποθέτηση ενός οπτικού αισθητήρα σε θέση που επιτρέπει στο πεδίο θέασης του να απεικονίζεται ο πάγκος εργασίας, και (β) ένας υπολογιστής για την πρόσβαση στο εργαλείο καταγραφής και στην διαδικτυακή πλατφόρμα των εργαλείων της λύσης.....	98
Εικόνα 77 Σχηματική αναπαράσταση της τοπολογίας οπτικού αισθητήρα σε σχέση με τον πάγκο εργασίας όπως αυτή υιοθετήθηκε για το συγκεκριμένο σενάριο εργασίας βασιζόμενη στην ενδεικτική βιβλιογραφία. Η απόσταση του οπτικού αισθητήρα από το πάγκο εργασίας (d) είναι 1.78μ., από το έδαφος (h) είναι 1.54μ., και η κλίση (γωνία θέασης - α) ήταν 17°.....	99
Εικόνα 78 Σχηματική αναπαράσταση των εξαρτημάτων και των ακολουθιών τοποθέτησης τους για κάθε διαδικασία.....	100
Εικόνα 79 Διαδικασία επισημάνσης δεδομένων εξεταζόμενου σεναρίου με χρήση της προσφερόμενης διαδικτυακής διεπαφής.....	100
Εικόνα 80 Στιγμιότυπο από την ανάλυση μέσω της γραφικής διεπαφής αξιοποίησης του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων σε ένα από τα ληφθέντα βίντεο στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Κρήτης για το εξεταζόμενο σενάριο.....	101

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 KPIs Λύσης.....	7
Πίνακας 2 Σενάρια χρήσης λύσης και Δείκτες Απόδοσης (KPIs).....	8
Πίνακας 3 Σενάρια χρήσης λύσης και Δείκτες Απόδοσης (KPIs).....	10
Πίνακας 4 Σενάρια Χρήσης Digital Twin.....	14
Πίνακας 5 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας για την λύση 2.5β.....	24
Πίνακας 6 Αντιστοίχιση μεγεθών με ID & Key	26
Πίνακας 7 Σενάρια Χρήσης IIoT.....	29
Πίνακας 8 Σενάρια επαλήθευσης της λύσης.....	34
Πίνακας 9 Ρύθμιση παραμέτρων/προγραμματιστικού περιβάλλοντος για την πιλοτική επαλήθευση της εργαλειοθήκης σε εργαστηριακό περιβάλλον.....	36
Πίνακας 10 Βασικά σενάρια χρήσης και επίδειξης λειτουργίας.....	37
Πίνακας 11 Ρυθμίσεις παραμέτρων/σχεδίασης δομικών στοιχείων για την επαλήθευση λειτουργικότητας του σεναρίου 0.....	38
Πίνακας 12 Σύγκριση Simulink με την εργαλειοθήκη σε περιβάλλον Python για την εφαρμογή σε προγραμματισμό παραγωγής.....	42
Πίνακας 13 Η ιεραρχική δομή του PSM εξασφαλίζει ότι η μοντελοποίηση είναι ταυτόχρονα λεπτομερής και ολιστική.....	44
Πίνακας 14 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών συστήματος με βάση τον ρόλο τους στο σχήμα ελέγχου.....	54
Πίνακας 15 Λειτουργίες και Παρεχόμενες Πληροφορίες του Πίνακα Ελέγχου MPC.....	57
Πίνακας 16 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας για την λύση 10β.....	60
Πίνακας 17 Αποτελέσματα σεναρίων χρήσης και επίδειξης λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος αποκεντρωμένης ταυτότητας.....	83
Πίνακας 18 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας.....	96
Πίνακας 19 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας για την λύση 18.....	102

1. Εισαγωγή – Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου

Ο ψηφιακός μετασχηματισμός της μεταποιητικής βιομηχανίας αποτελεί έναν από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας, της ανθεκτικότητας και της βιώσιμης ανάπτυξης των παραγωγικών συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, το έργο Greece4.0 στοχεύει στη δημιουργία ενός Δικτύου Αριστείας για την ανάπτυξη, διάδοση και εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών Industry 4.0 και Industry 5.0 στην ελληνική βιομηχανία.

Το Παραδοτέο Π3.1 – «Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα» τεκμηριώνει τη διαδικασία ολοκλήρωσης και πιλοτικής επαλήθευσης των τεχνολογικών λύσεων που αναπτύχθηκαν στο έργο. Η πιλοτική εγκατάσταση πραγματοποιείται σε ελεγχόμενα εργαστηριακά περιβάλλοντα, τα οποία επιτρέπουν την ασφαλή αξιολόγηση της λειτουργικότητας των εφαρμογών, τη σταδιακή αύξηση της πολυπλοκότητας των δοκιμών και τη μέτρηση της απόδοσης βάσει προκαθορισμένων δεικτών (KPIs).

Οι λύσεις που παρουσιάζονται καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών πεδίων, όπως συνεργατική και κινητή ρομποτική, Ψηφιακά Δίδυμα, Τεχνητή Νοημοσύνη, Industrial IoT, Extended Reality εφαρμογές, συνθετικά δεδομένα, εργαλεία προσομοίωσης και υποστήριξης αποφάσεων. Η πιλοτική τους επίδειξη αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη μετάβαση από το επίπεδο της έρευνας και ανάπτυξης στην επιχειρησιακή αξιοποίηση σε πραγματικές παραγωγικές εγκαταστάσεις.

Το παραδοτέο οργανώνεται ανά τεχνολογική λύση, παρουσιάζοντας για καθεμία την ολοκλήρωση του πιλοτικού συστήματος, τα σενάρια επίδειξης λειτουργίας και τα αποτελέσματα αξιολόγησης, αναδεικνύοντας τη συμβολή τους στον εκσυγχρονισμό της ελληνικής μεταποίησης.

2. Πιλοτική Εγκατάσταση των Εφαρμογών του έργου Greece4.0

2.2. Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής

Η λύση «Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής» αφορά τον σχεδιασμό και την τελική υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου κυβερνο-φυσικού συστήματος το οποίο συνδυάζει μια αυτοκινούμενη ρομποτική πλατφόρμα και έναν συνεργατικό ρομποτικό βραχίονα, με στόχο την αυτόνομη εκτέλεση εργασιών ενδο-εφοδιαστικής αλυσίδας (intralogistics), διαχείρισης αποθήκης, και υποστήριξης εργασιών στη γραμμή παραγωγής. Στον πυρήνα της προσέγγισης βρίσκεται η ανάγκη για ευφυή αυτοματοποίηση της μεταφοράς και διαχείρισης εξαρτημάτων/υλικών, καθώς και για δυνατότητα ακριβούς χειρισμού αντικειμένων σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως αυτές απαντώνται σε πραγματικούς χώρους παραγωγής. Το σύστημα αντιμετωπίζει με ενιαίο τρόπο το πλήρες «κύκλο» της εργασίας: από την αντίληψη του περιβάλλοντος και την αναγνώριση του αντικειμένου, έως την εκτίμηση πόζας, την επιλογή κατάλληλου σημείου προσάρτησης, την εκτέλεση του χειρισμού, και την ασφαλή μετακίνηση/τοποθέτηση του ρομπότ σε καθορισμένους σταθμούς εργασίας.

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η ανάπτυξη της λύσης, όπως τεκμηριώνεται στην τελική έκδοση, οργανώθηκε εξαρχής γύρω από τον χειρισμό αντικειμένων με ρομπότ, δεδομένου ότι η αξιοπιστία του grasping και της μεταφοράς αποτελεί κρίσιμο περιορισμό σε εφαρμογές αποθήκης και παραγωγής. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν διακριτά υποσυστήματα υπολογιστικής όρασης, τα οποία επιτελούν συμπληρωματικούς ρόλους, αφενός τον εντοπισμό του αντικειμένου και της περιοχής που καταλαμβάνει στην εικόνα, αφετέρου την ακριβή εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού, και τελικά την επιλογή του βέλτιστου σημείου προσάρτησης για την αρπάγη. Παράλληλα, αναπτύχθηκε ο έλεγχος του ρομποτικού βραχίονα με αξιοποίηση ROS2 και MoveIt2, ώστε οι εντολές χειρισμού να μεταφράζονται σε ασφαλείς και εφικτές τροχιές, ενώ σε τελικό στάδιο ενσωματώθηκε ο έλεγχος της κινητής βάσης μέσω Navigation2 και η επικοινωνία/διασύνδεση με σύστημα οργάνωσης/συντονισμού. Αυτή η διάρθρωση αντανακλά μια πρακτική μηχανική λογική: πρώτα επιτυγχάνεται αξιόπιστος χειρισμός αντικειμένων (perception-to-action), στη συνέχεια εξασφαλίζεται η αυτονομία μετακίνησης στο χώρο, και τελικά ολοκληρώνεται η διαλειτουργική συνεργασία με το ευρύτερο λειτουργικό περιβάλλον της παραγωγής.

Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής, στα πλαίσια της λύσης υλοποιήθηκε ένα αυτοκινούμενο ρομπότ το οποίο δύναται να πλοηγηθεί αυτόνομα σε εγκαταστάσεις παραγωγής και να εκτελεί μια σειρά ενεργειών ανάκτησης/τοποθέτησης εξαρτημάτων μέσω του ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος είναι εγκατεστημένος πάνω στην κινητή πλατφόρμα. Η κινητή βάση διαθέτει αισθητήρες αντίληψης (π.χ. σαρωτές ασφαλείας/αισθητήρες που υποστηρίζουν χαρτογράφηση και εντοπισμό), ώστε να δημιουργεί ή να αξιοποιεί χάρτη του περιβάλλοντος και να προσαρμόζει τη διαδρομή της αποφεύγοντας εμπόδια σε πραγματικό χρόνο. Ο βραχίονας λειτουργεί συνεργατικά και φέρει αρπάγη (κενού) και κάμερα βάθους, ώστε να αντιλαμβάνεται και να διαβάξει τον χώρο εργασίας, να εντοπίζει αντικείμενα και σημεία προσάρτησης, και να εκτελεί την ενέργεια “pick” με ακρίβεια. Ένα ανώτερο επίπεδο ελέγχου αναλαμβάνει τον συντονισμό των επιμέρους λειτουργιών, δηλαδή τη χρονική αλληλουχία πλοήγηση → ευθυγράμμιση/πρόσδεση → αντίληψη αντικειμένου → υπολογισμός πόζας → ανάθεση grasp point → κίνηση βραχίονα → σύλληψη → μεταφορά/απόθεση, μέσω ανταλλαγής εντολών και καταστάσεων με τη χρήση του λειτουργικού συστήματος ROS2.

Κρίσιμο τεχνολογικό στοιχείο της λύσης αποτελεί η στοχευμένη αξιοποίηση τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης για την αύξηση της αξιοπιστίας σε απαιτητικές, «μη ιδανικές» συνθήκες, όπου η γεωμετρία των αντικειμένων, οι αντανακλάσεις, η απόκρυψη (occlusions) και οι μεταβολές φωτισμού μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση κλασικών αλγορίθμων. Για την εκτίμηση της ακριβούς θέσης και του προσανατολισμού κάθε εξαρτήματος, αξιοποιήθηκε το μοντέλο MegaPose6D, το οποίο αν και έχει τη δυνατότητα γενικευμένου εντοπισμού, ενισχύθηκε περαιτέρω μέσω επανεκπαίδευσης με μεγάλο αριθμό συνθετικών σκηνών που βασίστηκαν σε υψηλής ποιότητας CAD αρχεία ανά κομμάτι και τεχνητές υφές,

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

ώστε να γεφυρωθεί το «χάσμα» μεταξύ συνθετικού και πραγματικού περιβάλλοντος. Συμπληρωματικά, για τον προσδιορισμό του τύπου του αντικειμένου και της περιοχής που καταλαμβάνει στο οπτικό πεδίο, ενσωματώθηκε μοντέλο τμηματοποίησης/εντοπισμού βασισμένο στο YOLOv11, το οποίο εκπαιδεύτηκε με σύνολο πραγματικών εικόνων με χειροκίνητη επισήμειωση περιοχών, ώστε να εξασφαλίζεται αξιόπιστη αναγνώριση στο πραγματικό εργασιακό περιβάλλον. Η συνδυαστική χρήση των παραπάνω υποσυστημάτων επιτρέπει αφενός να «κλειδώνει» η ταυτότητα/περιοχή του αντικειμένου, αφετέρου να εξάγεται ακριβής τρισδιάστατη πόζα, και τελικά να υπολογίζεται η βέλτιστη προσάρτηση με βάση τόσο τη γεωμετρία όσο και τα δεδομένα βάθους.

Η διαδικασία επιλογής σημείων προσάρτησης σχεδιάστηκε ώστε να είναι συμβατή με τις απαιτήσεις βιομηχανικού χειρισμού: τα υποψήφια σημεία αντιστοιχίζονται σε κάθε εντοπισμένο αντικείμενο με βάση την περιοχή που καταλαμβάνει στην εικόνα, περνούν από στάδιο φιλτραρίσματος/επιλογής ώστε να παραμένει η βέλτιστη επιλογή, και στη συνέχεια μεταφέρονται σε 3D αναφορά μέσω των δεδομένων βάθους. Έτσι, το σημείο προσάρτησης και η εκτιμημένη πόζα συνδυάζονται, ώστε η αρπάγη να προσεγγίζει με κατάλληλο προσανατολισμό, βελτιώνοντας την πιθανότητα επιτυχούς σύλληψης και μειώνοντας σφάλματα λόγω οριακών προσπελάσεων ή ανεπαρκούς επιφάνειας επαφής. Η λογική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές αποθήκης/γραμμής, όπου ζητούμενο δεν είναι απλώς μια «μεμονωμένη» επιτυχία σύλληψης, αλλά σταθερή επαναληψιμότητα που υποστηρίζει κύκλους εργασίας και ρυθμό παραγωγής.

Στο επίπεδο ελέγχου κίνησης του βραχίονα, η λύση αξιοποιεί το ROS2 και τη βιβλιοθήκη MoveIt2, παρέχοντας μηχανισμούς σχεδιασμού τροχιών, επίλυσης κινηματικής και αποφυγής συγκρούσεων, ώστε οι κινήσεις να είναι υλοποιήσιμες και ασφαλείς στο δεδομένο ρομποτικό κελί. Η επιλογή αυτή είναι καθοριστική για τη μεταφερσιμότητα της λύσης, επειδή το MoveIt2 παρέχει τυποποιημένες διεπαφές που μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικούς βραχίονες, αισθητήρες και αρπάγες, ενώ επιτρέπει και την ενσωμάτωση πολιτικών αποφυγής στατικών και δυναμικών εμποδίων. Η τελική υλοποίηση δεν αντιμετωπίζει τον βραχίονα ως «απομονωμένο» υποσύστημα, αλλά ως λειτουργικό μέρος μιας κινητής ρομποτικής οντότητας, όπου οι μικρές αποκλίσεις θέσης της βάσης, η αβεβαιότητα στη μέτρηση βάθους και η μεταβολή του περιβάλλοντος πρέπει να απορροφώνται μέσω ανθεκτικού σχεδιασμού κινήσεων και κατάλληλης αλληλουχίας ενεργειών.

Στο επίπεδο αυτονομίας μετακίνησης, το σύστημα πλοήγησης βασίστηκε στο Navigation2 του ROS2. Η αναγνώριση θέσης (localization) του αυτοκινούμενου ρομπότ υλοποιήθηκε με τη μέθοδο Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL), ενώ η πλοήγηση εκτελείται με ορισμό στόχου πάνω σε στατικό χάρτη και αξιοποίηση της ROS2 διεπαφής του Navigation2, η οποία επικοινωνεί με τον οδηγό της πλατφόρμας για την εκτέλεση της κίνησης. Σημαντικό στοιχείο λειτουργικής ωριμότητας αποτελεί η διαδικασία πρόσδεσης/ευθυγράμμισης (docking) σε σταθμό εργασίας, καθώς σε εφαρμογές αποθήκης και γραμμής απαιτείται συχνά ακριβής τοποθέτηση σε συγκεκριμένη θέση για παραλαβή/παράδοση υλικού, φόρτιση ή συνέργεια με σταθερά μέσα. Για την επίτευξη αυτού του σταδίου αναπτύχθηκε PID ελεγκτής που αποστέλλει διορθωτικές κινήσεις στους τροχούς έως ότου ολοκληρωθεί με ακρίβεια η επιθυμητή ευθυγράμμιση, μειώνοντας το σφάλμα που μπορεί να έχει συσσωρευτεί από το localization και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η ροή πλοήγησης και docking επιδεικνύει ότι το σύστημα μπορεί όχι μόνο να μετακινηθεί προς έναν στόχο, αλλά και να «κλείσει» αξιόπιστα τον κύκλο εργασίας επιστρέφοντας και τοποθετούμενο σε θέση αναφοράς, στοιχείο που αποτελεί προϋπόθεση για επαναληψιμότητα.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Το περιβάλλον δοκιμής της λύσης «Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής» υλοποιήθηκε σε ελεγχόμενο εργαστηριακό χώρο, ο οποίος διαμορφώθηκε ώστε να προσομοιώνει με ρεαλιστικό τρόπο συνθήκες που απαντώνται σε εγκαταστάσεις βιομηχανικής υποδομής και χώρους υποστήριξης παραγωγής. Η επιλογή εργαστηριακού περιβάλλοντος επέτρεψε τον πλήρη έλεγχο των παραμέτρων δοκιμής, τη σταδιακή εισαγωγή πολυπλοκότητας και την ασφαλή αξιολόγηση της λύσης πριν από οποιαδήποτε μετάβαση σε πραγματικό βιομηχανικό χώρο. Ο σχεδιασμός του χώρου βασίστηκε στη λογική της ενδο-εφοδιαστικής και της υποστήριξης

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

εγκαταστάσεων, όπου απαιτείται η ανάσυρση, μεταφορά και τοποθέτηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού από και προς προκαθορισμένες θέσεις.

Συγκεκριμένα, το εργαστήριο οργανώθηκε σε διακριτές λειτουργικές ζώνες, οι οποίες αναπαριστούσαν σημεία αποθήκευσης, σημεία παραλαβής εξοπλισμού και περιοχές εργασιών συντήρησης εγκαταστάσεων. Σε αυτές τις ζώνες τοποθετήθηκαν αντικείμενα που αντιστοιχούν σε τυπικό ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όπως κουτιά ηλεκτρολογικών συνδέσεων, μικροί πίνακες, καλωδιοδιαδρομές και επιμέρους εξαρτήματα εγκαταστάσεων, τα οποία διαφοροποιούνταν ως προς το μέγεθος, τη γεωμετρία και την επιφάνεια, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του ρομποτικού συστήματος σε ποικιλία πραγματικών σεναρίων. Τα αντικείμενα τοποθετήθηκαν τόσο σε σταθερά ράφια όσο και σε επίπεδες επιφάνειες, προσομοιώνοντας συνθήκες αποθήκης αλλά και καταστάσεις όπου ο εξοπλισμός βρίσκεται προσωρινά αποθηκευμένος ή αποσπασμένος από την εγκατάσταση.

Η κινητή ρομποτική πλατφόρμα κινήθηκε αυτόνομα εντός του εργαστηρίου, αξιοποιώντας προκαθορισμένο χάρτη του χώρου, ο οποίος δημιουργήθηκε εκ των προτέρων και περιλάμβανε σταθερά εμπόδια, διαδρόμους κίνησης και περιοχές προσέγγισης εργασίας. Η διαδρομή του ρομπότ περιλάμβανε μετακινήσεις μεταξύ αποθηκευτικών θέσεων και σταθμών εργασίας, όπως θα συνέβαινε σε πραγματικό περιβάλλον συντήρησης εγκαταστάσεων, όπου απαιτείται η μεταφορά εξοπλισμού από αποθήκη σε σημείο παρέμβασης. Η δυνατότητα αυτόνομης πλοήγησης και ακριβούς προσέγγισης στα σημεία στόχου αποτέλεσε βασικό αντικείμενο αξιολόγησης, καθώς η επιτυχής συλλογή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού προϋποθέτει σωστή ευθυγράμμιση της πλατφόρμας σε σχέση με το αντικείμενο και το περιβάλλον.

Ο ρομποτικός βραχίονας, εγκατεστημένος πάνω στην κινητή βάση, αξιοποιήθηκε για την συλλογή και μεταφορά των ηλεκτρολογικών αντικειμένων από τις θέσεις αποθήκευσης ή εργασίας. Η διαδικασία δοκιμής περιελάμβανε τον εντοπισμό του εξοπλισμού μέσω συστημάτων όρασης, την εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού του αντικειμένου, και την εκτέλεση της σύλληψης με κατάλληλη αρπάγη, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, όπως επίπεδες επιφάνειες, αιχμηρές ακμές ή περιορισμένα σημεία πρόσβασης. Η μεταφορά πραγματοποιήθηκε εντός του εργαστηρίου σε προκαθορισμένες θέσεις απόθεσης, προσομοιώνοντας τη διαδικασία μετακίνησης εξοπλισμού προς ή από σημεία εγκατάστασης.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη δοκιμή της λύσης σε σεναρία που αντανακλούν πραγματικές εργασίες υποστήριξης εγκαταστάσεων, όπως η συλλογή εξοπλισμού από περιορισμένο χώρο, η μεταφορά του σε διαφορετικό σημείο του εργαστηρίου και η ασφαλής απόθεσή του χωρίς πρόκληση ζημιών. Το εργαστηριακό περιβάλλον επέτρεψε την παρατήρηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κινητής βάσης και βραχίονα, καθώς και την αξιολόγηση της σταθερότητας του συστήματος κατά τη διάρκεια της κίνησης με φορτίο. Παράλληλα, κατέστη δυνατή η επανάληψη των δοκιμών υπό διαφορετικές διαμορφώσεις του χώρου, ώστε να εξεταστεί η ανθεκτικότητα της λύσης σε μεταβολές του περιβάλλοντος, όπως αλλαγές στη θέση των αντικειμένων ή διαφοροποίηση των διαδρομών κίνησης.

2.3. Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης

Η λύση «Ψηφιακό Δίδυμο για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης» αφορά την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού περιβάλλοντος προσομοίωσης, παρακολούθησης και υποστήριξης λήψης αποφάσεων για συνεργατικά ρομποτικά συστήματα, με στόχο την αύξηση της ευελιξίας, της αποδοτικότητας και της προσαρμοστικότητάς τους σε μεταβαλλόμενες βιομηχανικές συνθήκες. Η προσέγγιση βασίζεται στη φιλοσοφία του Digital Twin, όπου ένα ψηφιακό αντίγραφο του φυσικού συστήματος αναπαριστά με υψηλή πιστότητα τη γεωμετρία, την κινηματική, τη δυναμική και τη λειτουργική του συμπεριφορά, επιτρέποντας την ανάλυση, την πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Το ψηφιακό δίδυμο της λύσης σχεδιάστηκε ώστε να αναπαριστά μια ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον ίδιο τον ρομποτικό βραχίονα όσο και το περιβάλλον εργασίας, τα αντικείμενα που χειρίζεται και την αλληλεπίδραση με ανθρώπινους χειριστές. Η αναπαράσταση περιλαμβάνει τα γεωμετρικά και κινηματικά χαρακτηριστικά του ρομπότ, τα όρια κίνησης των αρθρώσεων, τις επιτρεπόμενες ταχύτητες και επιταχύνσεις, καθώς και τις συνθήκες φόρτισης που προκύπτουν κατά την εκτέλεση διαφορετικών εργασιών. Με τον τρόπο αυτό, το ψηφιακό δίδυμο δεν λειτουργεί ως απλή οπτικοποίηση, αλλά ως ενεργό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο, την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του φυσικού συστήματος.

Η υλοποίηση της λύσης βασίζεται στη διασύνδεση του ψηφιακού περιβάλλοντος με το φυσικό ρομποτικό σύστημα μέσω κατάλληλων διεπαφών επικοινωνίας, επιτρέποντας τη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων κατάστασης. Δεδομένα όπως οι θέσεις και οι ταχύτητες των αρθρώσεων, οι καταστάσεις λειτουργίας, οι εντολές κίνησης και οι πληροφορίες από αισθητήρες μεταφέρονται από το φυσικό σύστημα στο ψηφιακό δίδυμο, ενώ αντίστοιχα το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ή επικύρωση εντολών πριν αυτές εφαρμοστούν στο πραγματικό ρομπότ. Η διπλή αυτή ροή πληροφορίας επιτρέπει την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, αλλά και την εκτέλεση δοκιμών και σεναρίων “what-if” χωρίς τον κίνδυνο φθοράς εξοπλισμού ή διακοπής της παραγωγής.

Κεντρικό ρόλο στη λύση διαδραματίζει η ενσωμάτωση τεχνικών ΤΝ στο Ψηφιακό Δίδυμο, με στόχο την υποστήριξη της ευφυούς λήψης αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συνεργατικών ρομπότ. Μέσα από την ανάλυση δεδομένων τα οποία συλλέγονται από το φυσικό σύστημα καθώς και από το ψηφιακό μοντέλο, οι αλγόριθμοι ΤΝ μπορούν να αναγνωρίζουν πρότυπα λειτουργίας, να εντοπίζουν αποκλίσεις από την επιθυμητή συμπεριφορά και να προτείνουν εναλλακτικές στρατηγικές κίνησης ή εκτέλεσης εργασιών. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλοντα συνεργατικής ρομποτικών συστημάτων, όπου η προσαρμογή στις ανθρώπινες κινήσεις και στις μεταβολές του χώρου εργασίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα ασφάλειας και αποδοτικότητας.

Το Ψηφιακό Δίδυμο αξιοποιείται επίσης ως εργαλείο προσομοίωσης και δοκιμής νέων σεναρίων λειτουργίας, προτού αυτά εφαρμοστούν στο φυσικό σύστημα. Μέσα από το ψηφιακό περιβάλλον, μπορούν να σχεδιαστούν και να αξιολογηθούν διαφορετικές διατάξεις χώρου, εναλλακτικές τροχιές κίνησης, ή νέες αλληλουχίες εργασιών, χωρίς να απαιτείται άμεση επέμβαση στο πραγματικό ρομποτικό σύστημα. Ως εκ τούτου είναι εφικτή η μείωση του χρόνου ρύθμισης και επαναπρογραμματισμού, στοιχείο ιδιαίτερα κρίσιμο για ευέλικτες γραμμές παραγωγής μικρών παρτίδων ή εξατομικευμένων προϊόντων.

Σε επίπεδο συνεργασίας ανθρώπου–ρομπότ, το Ψηφιακό Δίδυμο λειτουργεί ως μέσο κατανόησης και πρόβλεψης της αλληλεπίδρασης, επιτρέποντας την ανάλυση πιθανών συγκρούσεων, την αξιολόγηση ζωνών ασφαλείας και την προσαρμογή της συμπεριφοράς του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο. Η ενσωμάτωση δεδομένων από αισθητήρες και η χρήση αλγορίθμων ΤΝ επιτρέπει στο σύστημα να αντιδρά σε απρόβλεπτες ανθρώπινες κινήσεις ή αλλαγές στο περιβάλλον, ενισχύοντας τόσο την ασφάλεια όσο και τη φυσικότητα της συνεργασίας.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Η λύση σχεδιάστηκε με γνώμονα τη διαλειτουργικότητα και την επεκτασιμότητα, ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους συνεργατικών ρομπότ και εφαρμογών. Το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει πρόσθετα στοιχεία του συστήματος, όπως εργαλεία, αισθητήρες ή βοηθητικό εξοπλισμό, διατηρώντας τη συνοχή μεταξύ ψηφιακού και φυσικού κόσμου. Με αυτόν τον τρόπο, η λύση δεν περιορίζεται σε μια μεμονωμένη εφαρμογή, αλλά λειτουργεί ως γενικευμένη πλατφόρμα υποστήριξης ευφυών ρομποτικών συστημάτων.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Η πιλοτική επίδειξη της λύσης «Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης» πραγματοποιήθηκε σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον, με στόχο την επαλήθευση της λειτουργικότητας, της διαλειτουργικότητας και της προσαρμοστικότητας της πλατφόρμας σε ρεαλιστικά σενάρια βιομηχανικής συνεργασίας ανθρώπου–ρομπότ. Η λύση βασίζεται στη φιλοσοφία του Digital Twin, όπου ένα ψηφιακό αντίγραφο του φυσικού ρομποτικού συστήματος αναπαριστά με υψηλή πιστότητα τη γεωμετρία, την κινηματική, τη δυναμική και τη λειτουργική συμπεριφορά του, επιτρέποντας την παρακολούθηση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Το εργαστηριακό περιβάλλον διαμορφώθηκε ώστε να αναπαριστά ένα τυπικό συνεργατικό ρομποτικό κελί παραγωγής, στο οποίο ένας συνεργατικός βραχίονας εκτελεί εργασίες χειρισμού ή συναρμολόγησης σε συνθήκες όπου συνυπάρχουν ανθρώπινοι χειριστές. Η ψηφιακή αναπαράσταση του κελιού υλοποιήθηκε μέσω της πλατφόρμας Unity3D, ενώ η αμφίδρομη διασύνδεση με το φυσικό σύστημα επιτεύχθηκε μέσω ROS2 και της γέφυρας ROS2 TCP, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων, καταστάσεων και εντολών ελέγχου μεταξύ φυσικού και ψηφιακού κόσμου.

Σενάριο 1: Παρακολούθηση λειτουργίας συνεργατικού ρομπότ σε πραγματικό χρόνο

Στο πρώτο σενάριο επίδειξης, το Ψηφιακό Δίδυμο χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο εποπτείας της λειτουργίας του συνεργατικού ρομπότ κατά την εκτέλεση προκαθορισμένων εργασιών. Το εικονικό περιβάλλον απεικόνιζε σε πραγματικό χρόνο τη θέση των αρθρώσεων, τις τροχιές κίνησης, τις ταχύτητες και τις καταστάσεις λειτουργίας του ρομπότ, παρέχοντας στον χειριστή πλήρη εικόνα της εξέλιξης της διαδικασίας. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει την απομακρυσμένη επιτήρηση και τη διάγνωση της συμπεριφοράς του ρομπότ, καθώς και την ανίχνευση αποκλίσεων μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής εκτέλεσης.

Σενάριο 2: Προσομοίωση και επικύρωση νέων εργασιών πριν την εκτέλεση στο φυσικό σύστημα

Το δεύτερο σενάριο αφορούσε την αξιοποίηση του Ψηφιακού Διδύμου ως εργαλείου προσομοίωσης για τον σχεδιασμό και την επικύρωση νέων ρομποτικών διεργασιών χωρίς την ανάγκη άμεσης πρόσβασης στον φυσικό εξοπλισμό. Το σύστημα επιτρέπει την αναπαραγωγή της λειτουργίας της ρομποτικής πλατφόρμας, δίνοντας τη δυνατότητα για εικονικό έλεγχο, δοκιμές και βελτιστοποίηση των συστημάτων πριν την πραγματική εφαρμογή.

Στο πλαίσιο της επίδειξης, ο χρήστης μπορούσε να ορίσει εναλλακτικές τροχιές ή νέες εργασίες χειρισμού, να ελέγξει κατά πόσο η διάταξη είναι εφικτή μέσω του ψηφιακού περιβάλλοντος και στη συνέχεια να μεταφέρει την επικυρωμένη διαδικασία στο φυσικό ρομπότ.

Σενάριο 3: Ανίχνευση ανθρώπινης παρουσίας και δυναμική αποφυγή σύγκρουσης

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ασφαλή συνεργασία ανθρώπου–ρομπότ, η οποία αποτελεί κρίσιμο στοιχείο σε περιβάλλοντα όπου συνεργατικοί βραχίονες λειτουργούν σε κοινό χώρο με χειριστές. Για τον σκοπό αυτό ενσωματώθηκαν αλγόριθμοι TN για ανίχνευση ανθρώπινης παρουσίας και αποφυγή σύγκρουσης. Το Ψηφιακό Δίδυμο συγχρονιζόταν με δεδομένα από αισθητήρες του πραγματικού κελιού, αναπαριστώντας σε πραγματικό χρόνο τη θέση του χειριστή και δημιουργώντας δυναμικά εμπόδια προς αποφυγή, επιτρέποντας στο ρομπότ να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του όταν εντοπίζεται ανθρώπινη είσοδος στη ζώνη εργασίας.

Σενάριο 4: Ευέλικτη προσαρμογή του ψηφιακού διδύμου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες παραγωγής

Το Ψηφιακό Δίδυμο σχεδιάστηκε ως μια επεκτάσιμη πλατφόρμα η οποία δύναται να προσαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους συνεργατικών ρομπότ, εργαλείων και εφαρμογών. Η επίδειξη περιλάμβανε την

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

προσθήκη νέων στοιχείων στο ψηφιακό περιβάλλον (όπως μεταξύ άλλων εργαλεία, αντικείμενα, αισθητήρες), διατηρώντας τη συνοχή μεταξύ ψηφιακού και φυσικού κόσμου. Με αυτό τον τρόπο, η λύση δεν περιορίζεται σε μία μεμονωμένη περίπτωση χρήσης, αλλά λειτουργεί ως γενικευμένη πλατφόρμα υποστήριξης ευφύων ρομποτικών συστημάτων.

Συμπεράσματα

Η εργαστηριακή επίδειξη επιβεβαίωσε ότι η λύση μπορεί να λειτουργήσει ως ολοκληρωμένο σύστημα:

- παρακολούθησης και εποπτείας συνεργατικών ρομπότ σε πραγματικό χρόνο,
- ασφαλούς αλληλεπίδρασης ανθρώπου–ρομπότ μέσω AI-based collision avoidance,
- προσομοίωσης και επικύρωσης νέων διεργασιών πριν την εφαρμογή,
- ευέλικτης επέκτασης σε νέα σενάρια παραγωγής.

Η πιλοτική εγκατάσταση τεκμηριώνει την τεχνολογική ωριμότητα της λύσης και αναδεικνύει τη συμβολή του Digital Twin στη βελτίωση της ασφάλειας, της αποδοτικότητας και της προσαρμοστικότητας συνεργατικών ρομποτικών συστημάτων σε σύγχρονες βιομηχανικές συνθήκες.

Η αξιολόγηση της λύσης πραγματοποιήθηκε με βάση τους δείκτες KPI οι οποίοι έχουν προσδιοριστεί στο Παραδοτέο Π1.1. Τα αποτελέσματα της πιλοτικής επίδειξης κατέδειξαν σημαντική μείωση του χρόνου αναδιαμόρφωσης του ρομποτικού συστήματος, ταχύτερη ενσωμάτωση νέου εξοπλισμού στο ψηφιακό δίδυμο, καθώς και αποτελεσματικότερη συνέχιση λειτουργίας σε περιπτώσεις απρόβλεπτων γεγονότων, επιβεβαιώνοντας την επιχειρησιακή αξία της πλατφόρμας Digital Twin.

Πίνακας 1 KPIs Λύσης

KPI	Περιγραφή Δείκτη	Τιμή πριν το Digital Twin	Τιμή μετά το Digital Twin	Βελτίωση
KPI1	Μείωση χρόνου αναδιαμόρφωσης λειτουργίας του ρομποτικού συστήματος παραγωγής	6–8 ώρες (χειροκίνητος επαναπρογραμματισμός)	2–3 ώρες (προσομοίωση + αυτόματη μεταφορά)	~60%
KPI2	Μείωση χρόνου ενσωμάτωσης νέου υποσυστήματος/εξοπλισμού στο ψηφιακό δίδυμο	3–4 ώρες (μοντελοποίηση & παραμετροποίηση)	1–1.5 ώρα (modular ενημέρωση DT)	~65%
KPI3	Μείωση χρόνου συνέχισης λειτουργίας σε περιπτώσεις βλαβών ή απρόβλεπτων γεγονότων	30–45 λεπτά (manual stop & restart)	10–15 λεπτά (AI detection + dynamic replanning)	~70%

2.4. Λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση υβριδικών μεθόδων

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Το πιλοτικό σύστημα της λύσης «Λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση υβριδικών μεθόδων» ολοκληρώθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον με στόχο την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός ολοκληρωμένου εργαλείου υποστήριξης της διαδικασίας Additive Manufacturing (AM). Η λύση ανταποκρίνεται στις βασικές προκλήσεις των διεργασιών προσθετικής κατασκευής, οι οποίες σχετίζονται τόσο με την ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου (εγκλείσματα, πόροι, μικρορωγμές), όσο και με γεωμετρικές αποκλίσεις και ανάγκες επανακατεργασίας. Η πιλοτική εγκατάσταση περιλάμβανε την υλοποίηση λογισμικού πλαισίου βελτιστοποίησης το οποίο αξιοποιεί υβριδικές μεθόδους προσομοίωσης και δεδομένων κατεργασίας, παρέχοντας τις ακόλουθες λειτουργίες:

- διασύνδεση με εργαλεία προσομοίωσης για πρόβλεψη ποιότητας,
- έλεγχο κλειστού βρόγχου για δυναμική διόρθωση σφαλμάτων,
- εκτίμηση κόστους και χρόνου παραγωγής,
- συστήματα αυτόματης ρύθμισης παραμέτρων διεργασίας,
- υποστήριξη διαφορετικών υλικών και στρατηγικών παραγωγής,
- ενσωματωμένες αρχές Design for Additive Manufacturing (DfAM).

Η εγκατάσταση του πιλοτικού συστήματος πραγματοποιήθηκε σε σταθμούς εργασίας του εργαστηρίου, με κατάλληλη παραμετροποίηση ώστε να υποστηρίζονται σενάρια προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας πριν την εκτέλεση σε πραγματικό εξοπλισμό. Με αυτό τον τρόπο, το λογισμικό λειτουργεί ως εργαλείο ενίσχυσης της αποδοτικότητας, της ποιότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας της προσθετικής κατασκευής.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Η επίδειξη λειτουργίας της λύσης πραγματοποιήθηκε μέσω αντιπροσωπευτικών σεναρίων χρήσης που προσεγγίζουν πραγματικές ανάγκες βιομηχανικής προσθετικής κατασκευής. Τα σενάρια σχεδιάστηκαν ώστε να αξιολογούν την επιχειρησιακή αξία του λογισμικού, σύμφωνα με τους δείκτες KPI που έχουν οριστεί στο Παραδοτέο Π1.1.

Πίνακας 2 Σενάρια χρήσης λύσης και Δείκτες Απόδοσης (KPIs)

Σενάριο	Στόχος	KPI	Τιμή πριν	Τιμή μετά	Βελτίωση
Σενάριο 1: Βελτιστοποίηση παραμέτρων εκτύπωσης μέσω προσομοίωσης	Μείωση χρόνου παραγωγής μέσω βέλτιστων process parameters	KPI1	12 ώρες build time	9.5 ώρες build time	~21%
Σενάριο 2: Πρόβλεψη σφαλμάτων και αποφυγή αποτυχημένων builds	Μείωση κόστους κατασκευής λόγω λιγότερων απορρίψεων	KPI2	480€ ανά εξάρτημα	390€ ανά εξάρτημα	~19%
Σενάριο 3: Closed-loop έλεγχος για διόρθωση αποκλίσεων	Μείωση κόστους συντήρησης και downtime μηχανής	KPI3	6 ώρες downtime/μήνα	3.5 ώρες downtime/μήνα	~42%
Σενάριο 4: Ενοποιημένη διαδικασία	Μείωση διπλών εργασιών και επανασχεδιασμών	KPI4	3 iterations ανά εργοτεμάχιο	1–2 iterations ανά εργοτεμάχιο	~45%

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Σενάριο	Στόχος	KPI	Τιμή πριν	Τιμή μετά	Βελτίωση
workflow (design, simulation, print) Σενάριο 5: Υποστήριξη εντοπισμού υλικών/εργαλείων και workflow planning	Μείωση χρόνου προετοιμασίας λόγω καλύτερης διαχείρισης πόρων	KPI5	50 λεπτά setup	30 λεπτά setup	~40%

2.5. Λογισμικό για την δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η λύση «Λογισμικό για την δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης» αφορά την ανάπτυξη μιας πλατφόρμας παραγωγής συνθετικών δεδομένων (synthetic data generation), με στόχο την υποστήριξη της εκπαίδευσης και βελτιστοποίησης αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η ανάγκη για συνθετικά δεδομένα προκύπτει από το γεγονός ότι σε πολλές εφαρμογές Industry 4.0/5.0 η συλλογή πραγματικών δεδομένων είναι:

- χρονοβόρα,
- οικονομικά δαπανηρή,
- περιορισμένη λόγω σπανιότητας βλαβών,
- δύσκολη λόγω εμπιστευτικότητας και GDPR,
- ανεπαρκής για robust training σύγχρονων AI μοντέλων.

Το πιλοτικό σύστημα εγκαταστάθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον και περιλαμβάνει μηχανισμούς δημιουργίας συνθετικών δειγμάτων μέσω υβριδικών μεθόδων όπως:

- προσομοίωση φυσικών διεργασιών,
- Generative Adversarial Networks (GANs),
- Variational Autoencoders (VAEs),
- data augmentation pipelines για χρονοσειρές (time-series) και δεδομένα προερχόμενα από αισθητήρες.

Η πλατφόρμα επιτρέπει τη δημιουργία ρεαλιστικών συνθετικών σεναρίων βλαβών και λειτουργίας εξοπλισμού, παρέχοντας επαρκή όγκο δεδομένων για την εκπαίδευση predictive maintenance και anomaly detection αλγορίθμων. Με την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, το πιλοτικό σύστημα θεωρείται λειτουργικό ως εργαλείο ενίσχυσης της ανάπτυξης AI εφαρμογών στη βιομηχανία, μειώνοντας σημαντικά την εξάρτηση από πραγματικά datasets.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Η επίδειξη λειτουργίας της λύσης πραγματοποιήθηκε μέσω αντιπροσωπευτικών σεναρίων χρήσης που καλύπτουν τη δημιουργία, αξιολόγηση και αξιοποίηση συνθετικών δεδομένων για εκπαίδευση AI μοντέλων. Τα σενάρια σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τους δείκτες αξιολόγησης (KPIs) όπως αυτοί έχουν οριστεί στο Παραδοτέο Π1.1.

Πίνακας 3 Σενάρια χρήσης λύσης και Δείκτες Απόδοσης (KPIs)

Σενάριο	Στόχος	KPI	Τιμή πριν	Τιμή μετά	Βελτίωση
Σενάριο 1: Παραγωγή συνθετικών δεδομένων βλαβών για predictive maintenance	Αύξηση διαθέσιμων δεδομένων εκπαίδευσης	KPI1	1.000 πραγματικά δείγματα	10.000 δείγματα (1k real + 9k synthetic)	+900%
Σενάριο 2: Εκπαίδευση AI μοντέλου με synthetic augmentation	Βελτίωση ακρίβειας ταξινόμησης βλαβών	KPI2	78% accuracy	89% accuracy	+11 μονάδες
Σενάριο 3: Μείωση ανάγκης συλλογής	Μείωση κόστους δεδομένων και labeling	KPI3	100% real data collection	35% real + 65% synthetic	-65% κόστος

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Σενάριο	Στόχος	KPI	Τιμή πριν	Τιμή μετά	Βελτίωση
πραγματικών δεδομένων Σενάριο 4: Επιτάχυνση ανάπτυξης AI pipeline	Μείωση χρόνου ανάπτυξης AI εφαρμογής	KPI4	8 εβδομάδες	5 εβδομάδες	~38%

2.5^α. Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Εξοπλισμού στην Βιομηχανία 4.0

Η τεχνολογική λύση αφορά την παροχή λογισμικού/πλατφόρμας Ψηφιακού Διδύμου (digital twin), όπου μια επιχείρηση θα μπορεί να παρακολουθεί τη γραμμή παραγωγής της συμπεριλαμβανομένου των διαδικασιών και των μηχανών που συμμετέχουν σε αυτή. Η λύση είναι βασισμένη σε υφιστάμενες και ευρέως διαδεδομένες πλατφόρμες και λογισμικά ανοικτού κώδικα όπως η πλατφόρμα Digital Twin Eclipse Ditto. Η πλατφόρμα ψηφιακού Διδύμου, προσφέρει 3D απεικόνιση των μηχανών, διασύνδεση με ιστορικά δεδομένα καθώς και δεδομένα πραγματικού χρόνου (διασύνδεση με SCADA, Ρομποτικά συστήματα και IOT συσκευές κ.α.). Πέρα από τη διασύνδεση, διαχείριση, μοντελοποίηση και απεικόνιση των δεδομένων η λύση Ψηφιακού Διδύμου του υποστηρίζει την ενσωμάτωση εξελιγμένων τεχνικών/αλγορίθμων (βαθιάς) μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για την προσφορά καινοτόμων υπηρεσιών όπως η έγκαιρη διάγνωση βλαβών, ο ποιοτικός έλεγχος διεργασιών, η προληπτική συντήρηση στην παραγωγή κτλ. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι αυτοί σε συνδυασμό με τις λειτουργίες μοντελοποίησης του Ψηφιακού Διδύμου επιτρέψουν τη δημιουργία ενός δυναμικού περιβάλλοντος προσομοίωσης μίας γραμμής παραγωγής ή μιας μηχανής σε μία παραγωγική μονάδα.

Το παρόν παραδοτέο περιγράφει αναλυτικά τη διαδικασία εγκατάστασης, ρύθμισης, εκκίνησης και επαλήθευσης της πλατφόρμας, καθώς και σε υποστηρικτικές υπηρεσίες όπως MQTT broker, reverse proxy, Telegraf και βοηθητικά services. Παρέχονται επίσης πληροφορίες για την αρχιτεκτονική, τον τρόπο διακίνησης των δεδομένων και τις απαιτήσεις του συστήματος.

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Για τη λειτουργία της πλατφόρμας απαιτούνται συγκεκριμένα εργαλεία, όπως Docker έκδοσης 20+ και Docker Compose έκδοσης 1.29+, καθώς και πρόσβαση σε terminal ή command line με δικαιώματα root ή sudo, ιδιαίτερα όταν χρειάζεται δημιουργία φακέλων logs ή αλλαγή δικαιωμάτων. Η λύση μπορεί επίσης να λειτουργήσει μέσω Docker Desktop σε Windows ή macOS, αρκεί να είναι ενεργοποιημένο το Linux backend. Αφού ληφθεί ο κώδικας της εφαρμογής μέσω git clone και μεταβείτε στον αντίστοιχο φάκελο, θα βρείτε μέσα το configuration του Docker Compose, το build του frontend, τις ρυθμίσεις για Nginx και Mosquitto, τα αρχεία για Telegraf και τις custom υπηρεσίες επικοινωνίας με InfluxDB, καθώς και το απαραίτητο υλικό για MongoDB και Ditto.

Πριν ξεκινήσουν οι υπηρεσίες, χρειάζεται να βεβαιωθείτε ότι υπάρχουν όλα τα απαιτούμενα αρχεία ρυθμίσεων. Το Mosquitto χρησιμοποιεί το αρχείο mosquitto.conf που καθορίζει το listening port (συνήθως 1883), την πιθανή ενεργοποίηση authentication και την προαιρετική αποθήκευση persistent δεδομένων. Το Nginx αξιοποιεί αρχεία όπως nginx.conf, nginx.htpasswd, nginx-cors.conf, mime.types και index.html για να λειτουργήσει ως reverse proxy προς το Ditto Gateway και τα API endpoints, να διαχειριστεί HTTPS (εφόσον ενεργοποιηθεί), να εξυπηρετήσει το frontend και να ρυθμίσει το CORS για τις Ditto API διεπαφές. Ο Telegraf χρησιμοποιεί το telegraf/telegraf.conf ώστε να συλλέγει metrics από τα containers, να τα στέλνει στο InfluxDB και να παρακολουθεί την υγεία της εφαρμογής. Αν θέλετε να διατηρούνται logs από τα Ditto services, απαιτείται δημιουργία του φακέλου /var/log/ditto και αλλαγή ιδιοκτησίας του στον χρήστη 1000, που είναι ο default χρήστης του Ditto container.

Το αρχείο docker-compose.yml επιτρέπει πλήρη παραμετροποίηση με μεταβλητές όπως η έκδοση του Ditto που θα εκτελεστεί, το εξωτερικό port του Ditto Gateway, τα tokens και τις λεπτομέρειες authentication για InfluxDB, καθώς και usernames και passwords για InfluxDB, Nginx, MongoDB και Ditto Gateway. Προαιρετικά μπορεί να γίνει επιπλέον παραμετροποίηση όπως volume mounts για τοπική αποθήκευση, χρονοδιακόπτες healthcheck και περιορισμοί στους πόρους συστήματος.

Οι υπηρεσίες εκκινούν με την εντολή docker-compose up -d από τον φάκελο που περιέχει το docker-compose.yml. Αυτό ενεργοποιεί τον Mosquitto ως MQTT broker, τη βάση δεδομένων MongoDB για το Ditto, όλες τις υπηρεσίες του Eclipse Ditto (policies, things, things-search, connectivity και gateway), τα UI components όπως το ditto-ui και το swagger-ui, τον reverse proxy Nginx, την InfluxDB ως time-series βάση, τον Telegraf για τη συλλογή metrics, το custom influx-service που μεταφέρει δεδομένα από το Ditto στο InfluxDB, καθώς και το frontend που εξυπηρετείται μέσω Nginx.

Για τον έλεγχο της κατάστασης του συστήματος, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την docker ps για να δείτε τα containers που τρέχουν και την docker logs -f για την προβολή των logs συγκεκριμένων

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

υπηρεσιών όπως το gateway, το influx-service και ο telegraf. Η εντολή docker inspect με το κατάλληλο health format δείχνει την κατάσταση υγείας κάθε container, κάτι πολύ χρήσιμο για τις υπηρεσίες του Ditto και της InfluxDB.

Η πρόσβαση στην πλατφόρμα γίνεται μέσω του frontend στη διεύθυνση <http://localhost> ή στο port που έχει οριστεί ως DITTO_EXTERNAL_PORT, ενώ το Ditto UI είναι διαθέσιμο σε αντίστοιχο port, το Swagger/OpenAPI interface στο path /openapi του Ditto Gateway, και το UI της InfluxDB στη θύρα 8086 αν είναι ενεργοποιημένο. Σε ορισμένες περιπτώσεις η πρόσβαση περνά μέσα από authentication στο Nginx, ανάλογα με τον τρόπο που έχει ρυθμιστεί το reverse proxy.

Για τερματισμό του συστήματος χρησιμοποιείται το docker-compose down, ενώ για πλήρη καθαρισμό, με διαγραφή δεδομένων και volumes, χρησιμοποιείται το docker-compose down -v, κάτι που θα οδηγήσει σε απώλεια όλων των αποθηκευμένων δεδομένων. Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας βασίζεται σε μία ροή όπου τα IoT devices στέλνουν MQTT μηνύματα στον Mosquitto, ο οποίος τα προωθεί στη Ditto Connectivity που τα μετατρέπει σε Ditto protocol messages. Το Eclipse Ditto ενημερώνει τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins), το influx-service εντοπίζει τις αλλαγές και τις στέλνει στο InfluxDB για αποθήκευση και αναζήτηση ως time-series δεδομένα. Το frontend ανακτά πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και ιστορικά στοιχεία, ενώ ο Telegraf αποστέλλει metrics στο InfluxDB για monitoring της υγείας των containers.

Για ανάπτυξη ή μικρές εγκαταστάσεις απαιτούνται περίπου 4 πυρήνες CPU, 8 GB RAM, πάνω από 20 GB ελεύθερου χώρου και ένα Linux ή Docker Desktop περιβάλλον. Για παραγωγικά συστήματα είναι προτιμότεροι τουλάχιστον 8 πυρήνες CPU, 16–32 GB RAM, μόνιμα volumes με πολιτική backup και προαιρετικά ένας reverse proxy με SSL termination. Με αυτή τη συνολική περιγραφή, το περιβάλλον αποκτά την οργανικότητα ενός ενιαίου έργου, επιτρέποντας ευκολότερη κατανόηση της συνολικής λειτουργίας.

Προκειμένου να επαληθευτούν οι βασικοί δείκτες απόδοσης, το σύστημα εγκαταστάθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον. Για το δοκιμαστικό σενάριο χρησιμοποιήθηκε ένα βιομηχανικό PLC το οποίο εκτελεί έλεγχο στάθμης μία δεξαμενής. Για τη συλλογή δεδομένων για την ανίχνευση συνθηκών σφάλματος στην μηχανή που βρίσκεται στην έξοδο της δεξαμενής αναπτύχθηκε ένας μηχανισμός ανίχνευσης δονήσεων. Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει τη ροή δεδομένων από τους αισθητήρες προς διακομιστή μόνο στην περίπτωση μετρήσεων δονήσεων που υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο κατώφλι.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

(Σενάριο 1) KPI1: Βελτίωση της παρακολούθησης της παραγωγής σε θέματα χρονικής και ποσοτικής ροής δεδομένων.

Για την αξιολόγηση της βελτίωσης στην παρακολούθηση της παραγωγής υλοποιήθηκε ένα εργαστηριακό σενάριο στο οποίο μία γραμμή παραγωγής προσομοιώνεται από ένα βιομηχανικό PLC που ελέγχει τη στάθμη δεξαμενής και παράγει δεδομένα διεργασίας όπως ροές, στάθμη, καταστάσεις και συναγεμούς, καθώς και από ένα υποσύστημα ανίχνευσης δονήσεων τοποθετημένο στη μηχανή εξόδου της δεξαμενής, το οποίο αποστέλλει δεδομένα μόνο όταν ανιχνεύονται δονήσεις άνω ενός καθορισμένου ορίου. Και τα δύο υποσυστήματα μεταδίδουν δεδομένα προς την πλατφόρμα του Ψηφιακού Διδύμου μέσω MQTT, όπου τα δεδομένα εισάγονται στη Ditto Connectivity, ενημερώνουν το Digital Twin και στη συνέχεια προωθούνται στο InfluxDB μέσω του influx-service για χρονοσειριακή αποθήκευση. Στο εργαστηριακό περιβάλλον καταγράφηκε η συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη χωρητικότητα λήψης δεδομένων, δηλαδή τον αριθμό μηνυμάτων ανά δευτερόλεπτο που μπορεί να υποδεχθεί το σύστημα, τον ρυθμό προώθησης των δεδομένων και το latency από τη συσκευή έως το Ditto και στη συνέχεια έως το InfluxDB, τη συνοχή και την αξιοπιστία της ροής δεδομένων με έμφαση σε απώλειες πακέτων και χρονικά κενά, καθώς και τον χρονικό συσχετισμό δεδομένων πραγματικού χρόνου και ιστορικών ως προς τον συγχρονισμό μεταξύ PLC, αισθητήρων, Ditto και διεπαφής χρήστη. Το σενάριο αυτό επιτρέπει τη μέτρηση της ροής δεδομένων υπό διαφορετικά φορτία.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

(Σενάριο 2) KPI2: Πιο έγκαιρη διάγνωση σφαλμάτων με την εφαρμογή υπαρχόντων μεθόδων πρόβλεψης.

Για την επαλήθευση της ικανότητας του συστήματος να εντοπίζει σφάλματα έγκαιρα και με μεγαλύτερη ακρίβεια υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο εργαστηριακό σενάριο, το οποίο περιλαμβάνει την εγκατάσταση μηχανισμού ανίχνευσης δονήσεων στο τέλος της δεξαμενής, όπου βρίσκεται η κρίσιμη μηχανή (όπως αντλία, βαλβίδα ή μοτέρ), βασισμένου σε μικροελεγκτή Adafruit Huzzah 32 – ESP32 με ασύρματη συνδεσιμότητα Wi-Fi, επιταχυνσιόμετρο LIS3DH της STMicroelectronics, διασύνδεση μέσω SPI και υποστήριξη ενημερώσεων λογισμικού over-the-air (OTA). Η διαδικασία παραλαβής των δεδομένων από τον αισθητήρα πραγματοποιείται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, με κάθε παράθυρο μέτρησης να έχει διάρκεια 1 δευτερολέπτου και το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παραθύρων να κυμαίνεται από 1,5 έως 2,5 δευτερόλεπτα, ανάλογα με την ποιότητα της ασύρματης σύνδεσης. Ο βασικός στόχος του σεναρίου είναι η επίτευξη σημαντικά ταχύτερης και πιο αξιόπιστης διάγνωσης σφαλμάτων σε σύγκριση με συμβατικές προσεγγίσεις, όπως ο οπτικός έλεγχος, η παρακολούθηση μέσω HMI ή οι χειροκίνητες διαδικασίες.

(Σενάριο 3) KPI3: Αποδοτικότερος προγραμματισμός της παραγωγής με τη χρήση δυναμικών προσομοιώσεων και υποθετικών σεναρίων.

Για την επαλήθευση του KPI υλοποιήθηκε αλγόριθμος προσομοίωσης του συστήματος βάσει της περιγραφής του στο Digital Twin. Στο εργαστηριακό σενάριο, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει εικονικά παραμέτρους της παραγωγής και να εξετάσει την απόκριση του συστήματος χωρίς αυτή η αλλαγή να επηρεάσει την πραγματική εγκατάσταση. Μέσω του αντίστοιχου μενού στην διαδικτυακή πλατφόρμα, μπορεί να ελέγξει το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με σκοπό να προγραμματίσει να γίνουν οι αλλαγές και στο πραγματικό σύστημα. Για να ολοκληρωθεί η επαλήθευση, στο εργαστηριακό σενάριο έγινε πρώτα προσομοίωση της επιθυμητής στάθμης της δεξαμενής και έπειτα η αλλαγή έγινε και στο πραγματικό σύστημα για να επιβεβαιωθεί η πιστότητα της προσομοίωσης.

Πίνακας 4 Σενάρια Χρήσης Digital Twin

KPI	Σενάριο	Στόχος	Μέσα Επαλήθευσης
KPI1: Βελτίωση της παρακολούθησης της παραγωγής σε θέματα χρονικής και ποσοτικής ροής δεδομένων.	Διασύνδεση ροών δεδομένων με την πλατφόρμα ψηφιακού διδύμου. Σύνδεση προγραμματιζόμενου βιομηχανικού λογικού ελεγκτή (PLC) στην πλατφόρμα Eclipse Ditto μέσω MQTT.	Έλεγχος ορθής λειτουργίας του ψηφιακού συστήματος διδύμου και μέτρηση απόκρισης συστήματος με μετρήσεις για: - Μείωση latency - Ρυθμό Επεξεργασίας Δεδομένων - Αξιοπιστία Δεδομένων	Μετρήσεις Latency: - Στο Ditto Gateway - Στο InfluxDB Ρυθμός Επεξεργασίας Δεδομένων: - Απώλειες πακέτων - Χρονικές καθυστερήσεις Αξιοπιστία Δεδομένων: - Ποσοστό χαμένων μηνυμάτων - Consistency των timestamps
KPI2: Πιο έγκαιρη διάγνωση σφαλμάτων με την εφαρμογή μεθόδων πρόβλεψης.	Χρήση Event-triggered αισθητήρα δονήσεων και FFT ανάλυση με ML μοντέλα (RF, Transformer) για διάγνωση στο Digital Twin	Έλεγχος χρόνου αναγνώρισης και πιστότητας του σφάλματος μέσα από την πλατφόρμα	- Βελτίωση χρόνου ανίχνευσης. - Εντοπισμός σφαλμάτων πριν γίνουν ορατά στη ροή παραγωγής. - Μείωση false negatives σε κρίσιμες καταστάσεις. - Διαθεσιμότητα πληροφορίας στο

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

ΚΡΙ	Σενάριο	Στόχος	Μέσα Επαλήθευσης
ΚΡΙ3: Αποδοτικότερος προγραμματισμός της παραγωγής με τη χρήση δυναμικών προσομοιώσεων και υποθετικών σεναρίων	Εκτέλεση υποθετικών σεναρίων προσομοιώσεων	Έλεγχος πιστότητας μέσω αποτελεσμάτων	Digital Twin και στο dashboard. - Throughput/cycle- time accuracy - Bottleneck detection - Scenario comparisons

2.5^β. Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Διαδικασιών στην Βιομηχανία 4.0

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η προσφερόμενη τεχνολογική λύση παρέχει ένα εργαλείο στις βιομηχανικές παραγωγικές μονάδες για την δημιουργία ψηφιακών αντιγράφων της γραμμής παραγωγής αποτυπώνοντας την λειτουργία και αλληλεπίδραση των βιομηχανικών συστημάτων με τη χρήση της γλώσσας μοντελοποίησης AutomationML.

Η πιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος έγινε στο αντίγραφο-μικρογραφία μιας γραμμής παραγωγής που υπάρχει εγκατεστημένο στο Ινστιτούτο Βιομηχανικών Συστημάτων του ΑΘΗΝΑ. Η γραμμή παραγωγής αποτελείται από πραγματικά συστήματα ελέγχου (PLC, ρομποτικά συστήματα ελέγχου) όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1 Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής και Ψηφιακού διδύμου

Εργαστηριακή διάταξη βιομηχανικής γραμμής παραγωγής

Η εργαστηριακή διάταξη αποτελείται από τα εξής:

- Έναν ρομποτικό βραχίονα Niryo Ned2 Educational Desktop Robotic Arm¹ που εκτελεί εσωτερικές εργασίες μεταφοράς προϊόντων.
- Μια αυτοματοποιημένη αποθήκη πολυεπίπεδων θέσεων (Fischertechnik Automated High-Bay Warehouse 24V²) για την αποθήκευση των ενδιάμεσων προϊόντων.
- Μια μηχανή διάτρησης με μεταφορική ταινία (Fischertechnik Punching Machine with Conveyor Belt 24V³) που αντιπροσωπεύει ένα από τα κελύφη παραγωγής.
- Μια γραμμή με δύο σταθμούς κατεργασίας (Fischertechnik Indexed Line with two Machining Stations 24V⁴) που αντιπροσωπεύει ένα δεύτερο κέλυφος παραγωγής.
- Ένας ελεγκτής αναλογικών/ψηφιακών σημάτων (Industrial Shields M-DUINO PLC ARDUINO ETHERNET & WiFi & BLUETOOTH LE 54ARA I/Os ANALOG/DIGITAL/RELAY PLUS⁵) στον οποίο τα αναλογικά σήματα μεταδίδονται μέσω καλωδίων, όπου μετατρέπονται σε πακέτα Modbus TCP για μετάδοση σε PLC.

¹ <https://niryo.com/product/educational-desktop-robotic-arm/>

² <https://www.fischertechnik.de/en/products/industry-and-universities/training-models/536631-automated-high-bay-warehouse-24v>

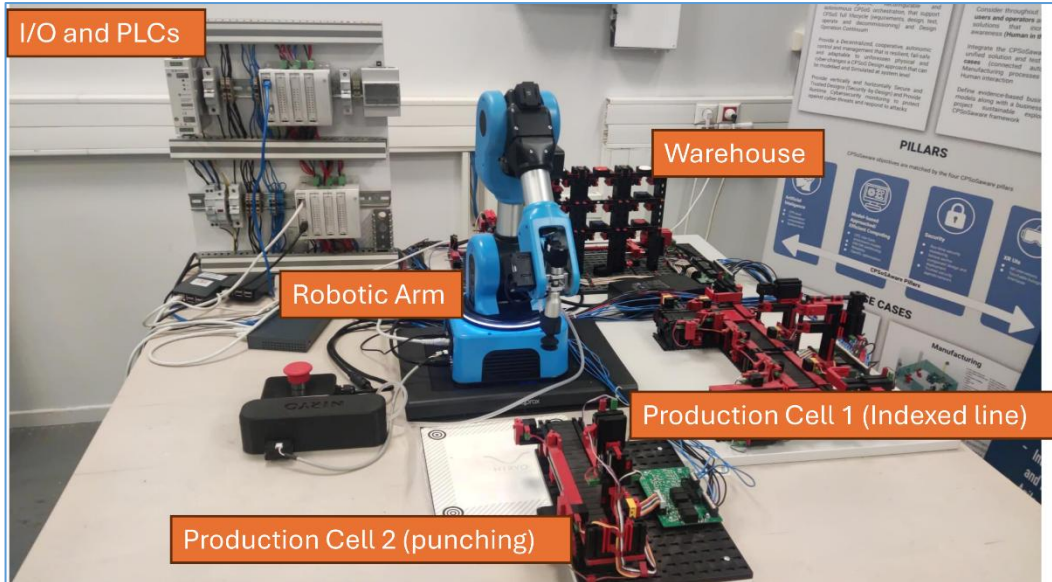
³ <https://www.fischertechnik.de/en/products/industry-and-universities/training-models/96785-punching-machine-with-conveyor-belt-24v>

⁴ <https://www.fischertechnik.de/en/products/industry-and-universities/training-models/96790-indexed-line-with-two-machining-stations-24v-simulation>

⁵ <https://www.industrialshields.com/the-most-versatile-arduino-based-plc-programmable-controllers>

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

- Ένας Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (Programmable Logic Controller - PLC) που αποτελείται από μια εγκατάσταση OpenPLC σε ένα Raspberry Pi 4. Το OpenPLC⁶ λειτουργεί ως ελεγκτής ανοιχτού κώδικα που συμμορφώνεται με τα πρότυπα IEC 61131-3 και περιλαμβάνει ένα ενσωματωμένο περιβάλλον ανάπτυξης που επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν προγράμματα χρησιμοποιώντας Μονάδες Οργάνωσης Προγραμμάτων (POU). Ο ελεγκτής λειτουργεί χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Modbus μέσω ενός στοίβα δικτύου TCP/IP.
- Επιπλέον, ο έλεγχος του ρομπότ γίνεται μέσω ενός ελεγκτή βασισμένο στο λειτουργικό σύστημα Robot Operating System (ROS)⁷.



Εικόνα 2 Εργαστηριακή διάταξη βιομηχανικής γραμμής παραγωγής

Μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής με χρήση AutomationML

Το φυσικό περιβάλλον παραγωγής αποτυπώνεται ολοκληρωμένα σε ένα μοντέλο AutomationML (AML), μέσω μιας διπλής ιεραρχικής δομής που ενσωματώνει τόσο φυσικά όσο και κυβερνο-φυσικά στοιχεία.

Στον πυρήνα του μοντέλου AML βρίσκεται μια λεπτομερής ανάλυση των φυσικών βιομηχανικών στοιχείων, τα οποία συγκροτούν βασικές λειτουργικές ζώνες, όπως το εργοστάσιο, η αποθήκη και ο χώρος επεξεργασίας. Οι ζώνες αυτές αναλύονται περαιτέρω σε επιμέρους μηχανήματα και εξαρτήματα, όπως:

1. **Συστήματα χειρισμού υλικών**, όπως μεταφορείς με φωτοηλεκτρικούς αισθητήρες και κινητήρες
2. **Μονάδες επεξεργασίας**, όπως αυτόματες γραμμές παραγωγής, σταθμοί συναρμολόγησης, μονάδες ποιοτικού ελέγχου και πακεταρίσματος
3. **Ρομποτικοί χειριστές**, όπως αρθρωτοί ρομποτικοί βραχίονες, και βοηθητικός εξοπλισμός, όπως μετρητές, διακόπτες.

Κάθε φυσική οντότητα περιγράφεται μέσω SystemUnitClasses και RoleClasses και συνδέεται με εξωτερικές διεπαφές (π.χ. IPhotoSensor, IDCMotor, IPLCSignalInterface) για τον καθορισμό της συνδεσιμότητας και των λειτουργικών ρόλων. Αυτές οι διεπαφές διευκολύνουν επίσης την αλληλεπίδραση με το επίπεδο αυτοματισμού, επιτρέποντας τη συνεπή ενσωμάτωση του υλικού με τη λογική ελέγχου.

⁶ <https://autonomylogic.com/>

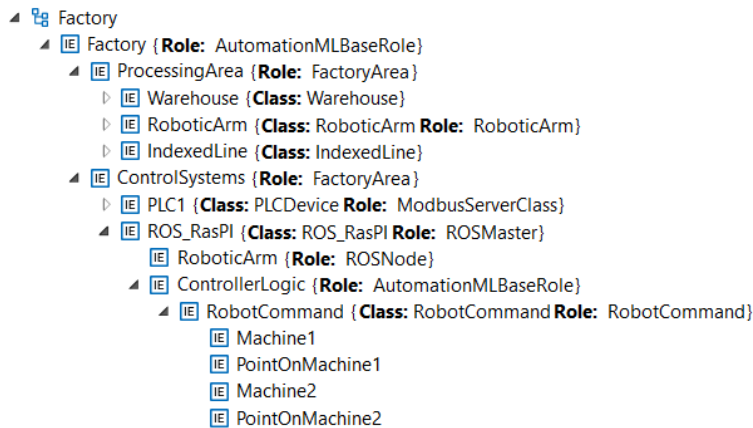
⁷ <https://www.ros.org/>

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Εκτός από τη φυσική ιεραρχία, το μοντέλο AML ορίζει μια ιεραρχία ελέγχου που καταγράφει τη λογική, τη ροή δεδομένων και τη συμπεριφορά εποπτείας εντός του συστήματος κατασκευής.

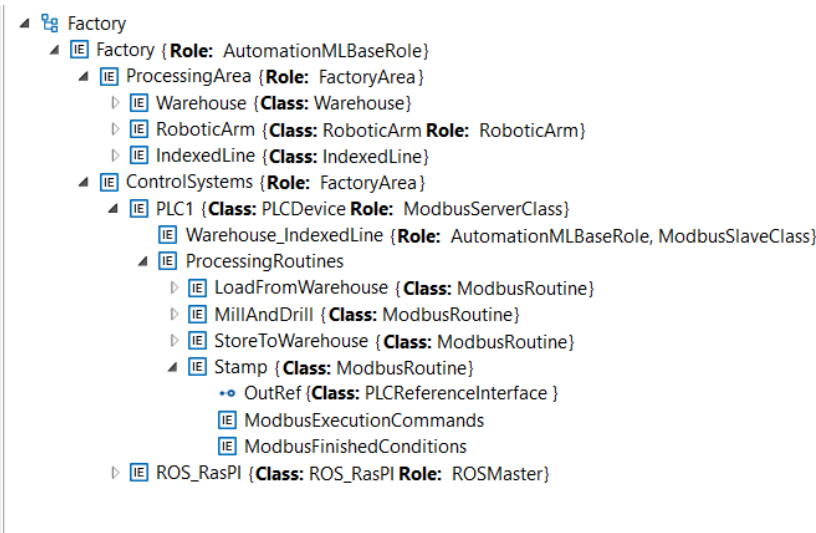
Η ιεραρχία ελέγχου του μοντέλου AML περιλαμβάνει:

- **Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές (PLC)**, όπως ο PLC1, οι οποίοι διασυνδέονται με φυσικές συσκευές για τη διαχείριση λειτουργιών ενεργοποίησης και ανίχνευσης,
- **Ελεγκτές βασισμένους στο ROS** (π.χ. ROS_RasPI), που συντονίζουν την εκτέλεση ρομποτικών εντολών και την ανατροφοδότηση από αισθητήρες,



Εικόνα 3 Περιγραφή ελεγκτή ρομποτικού βραχίονα σε AutomationML

- **Προγραμματισμένες λειτουργίες ελέγχου**, ενσωματωμένες ως εσωτερικά στοιχεία AML (π.χ. LoadFromWarehouse, StoreToWarehouse, MillAndDrill, Stamp, RobotCommand), οι οποίες περιγράφουν λειτουργικές εργασίες υψηλού επιπέδου.

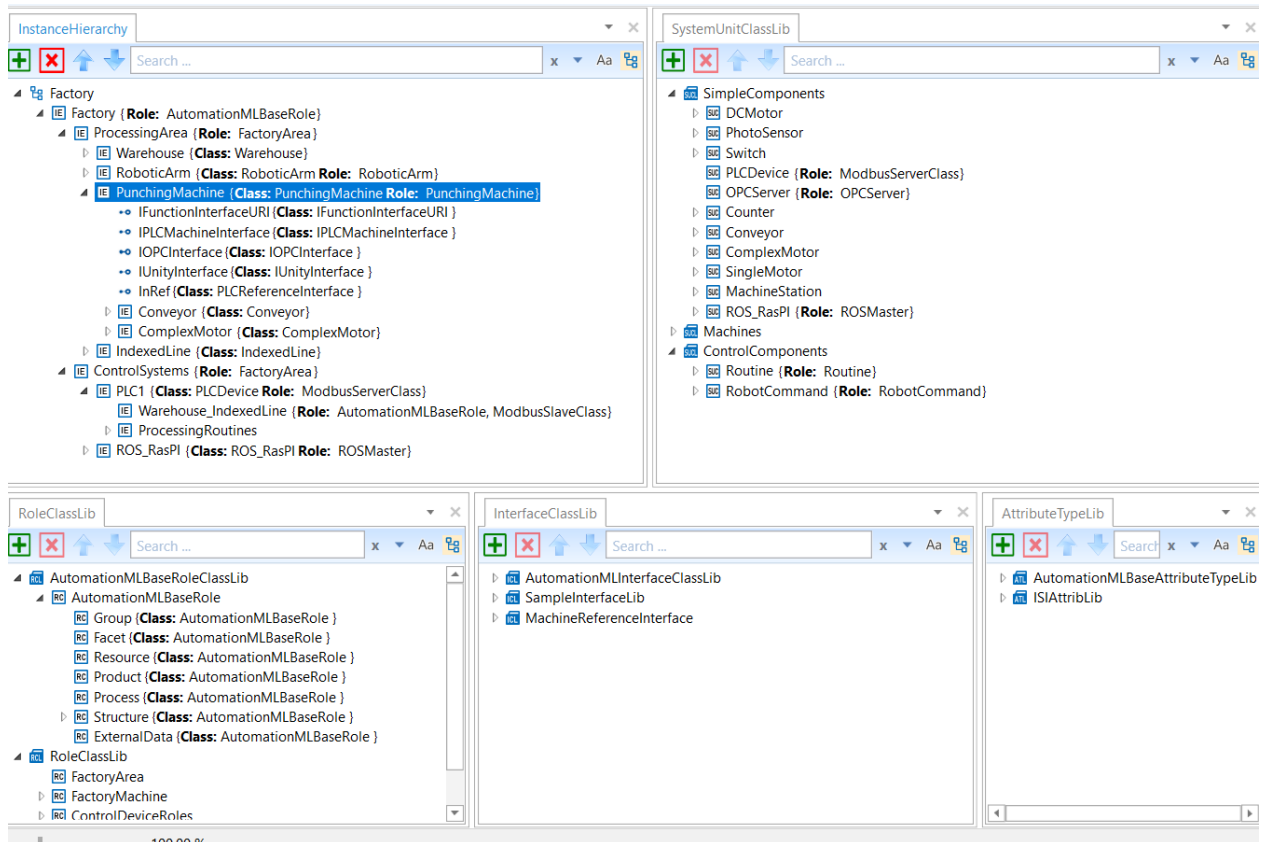


Εικόνα 4 Ορισμός προγραμματισμένων λειτουργιών ελέγχου σε AutomationML

Κάθε λειτουργία συνδέεται ρητά με την αντίστοιχη μονάδα υλικού μέσω **συνδέσμων αναφοράς και δηλώσεων διεπαφής** (π.χ. IPLCMachineInterface, IOPCInterface, IUnityInterface). Αυτό

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

επιτρέπει την ανιχνεύσιμη και συνεπή **χαρτογράφηση του κυβερνοφυσικού περιβάλλοντος**, διασφαλίζοντας ότι κάθε ενέργεια ελέγχου είναι συσχετισμένη με το φυσικό βιομηχανικό στοιχείο στο οποίο απευθύνεται.



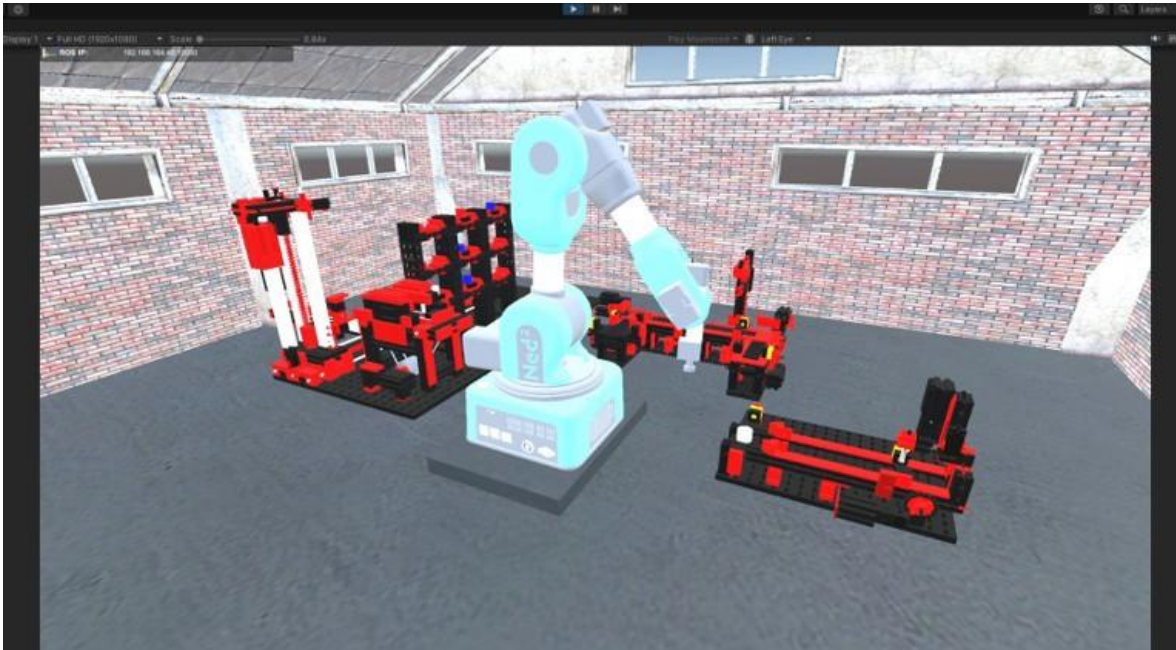
Εικόνα 5 Περιγραφή εννοιών της γραμμής παραγωγής στο AutomationML Editor

Επιπλέον, η αρθρωτή δομή της AML αντανακλά μια επαναχρησιμοποιήσιμη δομή, όπου μηχανές όπως ταινίες μεταφοράς και φωτοαισθητήρες δημιουργούνται από γενικευμένες βιβλιοθήκες εξαρτημάτων (π.χ. SimpleComponents/Conveyor, SimpleComponents/PhotoSensor). Αυτό εξασφαλίζει τη συνοχή μεταξύ των εξαρτημάτων του συστήματος καθώς και την επεκτασιμότητα του μοντέλου.

Δημιουργία Τρισδιάστατης Αναπαράστασης της Γραμμής Παραγωγής

Η διαδικασία δημιουργίας του DT ξεκινά με την ανάλυση του αρχείου AutomationML που δημιουργήθηκε. Για την δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού αντιγράφου εκτελέστηκαν 2 ενέργειες:

- 1) Δημιουργία και τοποθέτηση των μηχανημάτων στον εικονικό τρισδιάστατο χώρο βάση προκατασκευασμένων τρισδιάστατων μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά δεν περιέχουν μόνο την τρισδιάστατη απεικόνιση, αλλά παρέχουν και ρουτίνες για την κίνηση των αντικειμένων καθώς και βιομηχανικού τύπου διασύνδεση μέσω ModBus πρωτοκόλλου επικοινωνίας.
- 2) Δημιουργία εικονικών μηχανών προσομοίωσης ελεγκτών, οι οποίες είναι οι εξής:
 - Μια εικονική μηχανή με OpenPLC, η οποία έχει τον προγραμματισμό που υπάρχει στο PLC του φυσικού περιβάλλοντος με τις κατάλληλες παραμέτρους ώστε να επικοινωνεί με τα ψηφιακά αντίγραφα των μηχανών στο εικονικό περιβάλλον.
 - Μια εικονική μηχανή με εγκατεστημένο ROS για τον έλεγχο του ψηφιακού αντιγράφου του βραχίονα στο εικονικό περιβάλλον.



Εικόνα 6 Τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο της γραμμής παραγωγής

Αυτόματη παραμετροποίηση πλατφόρμας Ψηφιακού Διδύμου

Σάρωση αρχείου AML

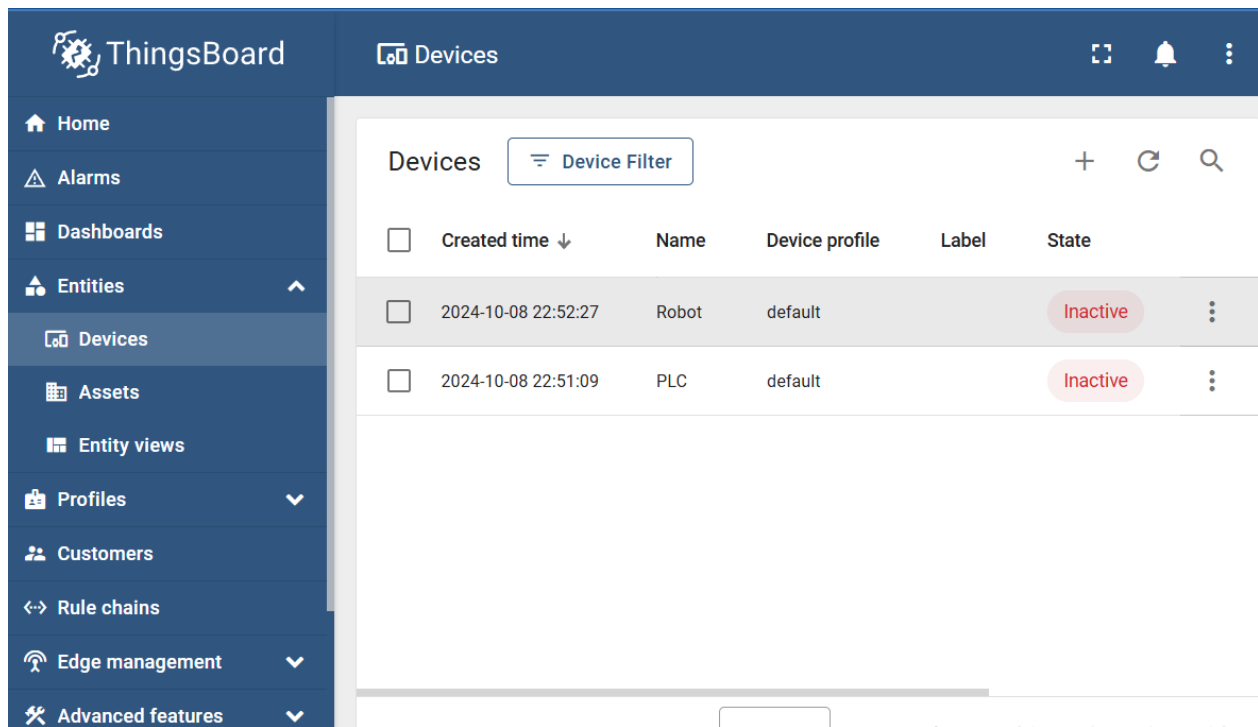
Η δεύτερη φάση της ανάλυσης αφορά την σάρωση του AML αρχείου για την εξαγωγή των βασικών παραμέτρων για την ορθή παραμετροποίηση της πλατφόρμας του Ψηφιακού Διδύμου. Το αποτέλεσμα της σάρωσης είναι η δημιουργία αρχείων JSON που χρησιμοποιούνται για την παραμετροποίηση των υποσυστημάτων της πλατφόρμας του Ψηφιακού Δίδυμου. Τα αρχεία αυτά είναι:

- **devices.json** περιέχει την κατάλληλη πληροφορία για τα βιομηχανικά συστήματα και τους ελεγκτές τους
- **routines.json** περιέχει τις προγραμματιστικές ρουτίνες που ρυθμίζουν την λειτουργία των βιομηχανικών συστημάτων μέσω των ελεγκτών.
- **llm.json** περιέχει την απαραίτητη πληροφορία που αποτελεί είσοδο στο μεγάλο γλωσσικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την δημιουργία σεναρίων.

Παραμετροποίηση Πλατφόρμας IoT

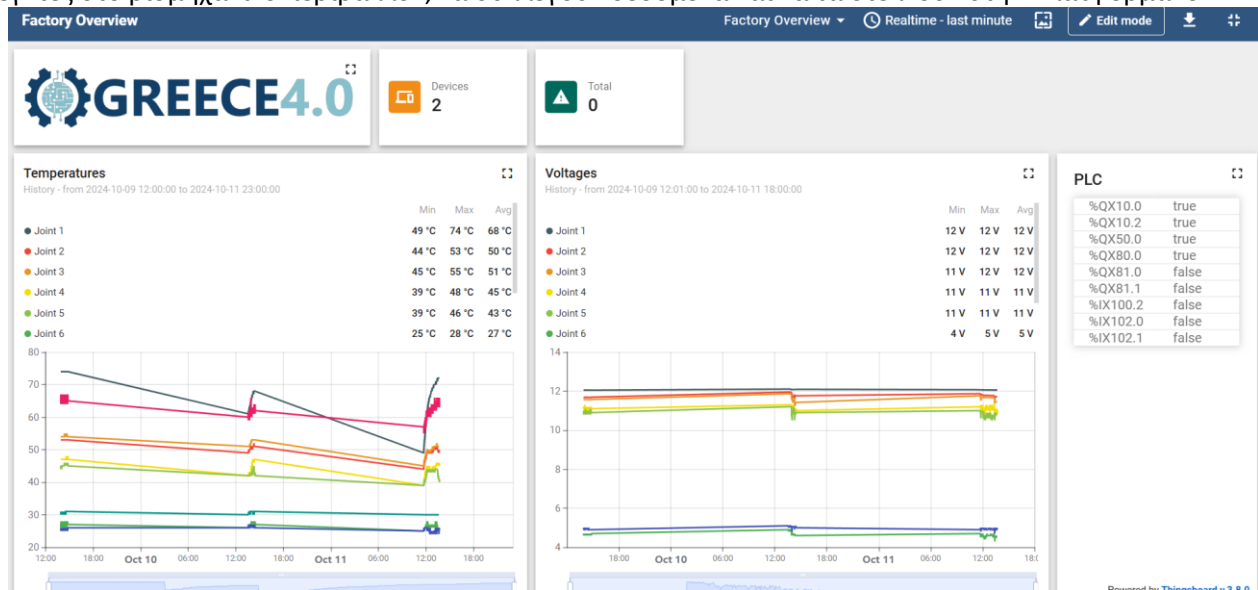
Λαμβάνοντας την πληροφορία από το αρχείο devices.json, ο DT Configurator συνδέεται με την Πλατφόρμα IoT (ThingsBoard) και μέσω του Administration REST API, δημιουργεί τα κατάλληλα Devices στη πλατφόρμα. Κάθε Device μπορεί να δέχεται τηλεμετρία μέσω διάφορων πρωτοκόλλων όπως HTTP, CoAP και MQTT.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 7 Τα Devices του ThingsBoard για την λήψη δεδομένων από τους ελεγκτές της γραμμής παραγωγής

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τις πληροφορίες που υπάρχουν στα αρχεία παραμέτρων δημιουργούνται αυτόματα τα στιγμιότυπα των κατάλληλων διαμεσολαβητών που αναλαμβάνουν να συνδεθούν με τους ελεγκτές στο βιομηχανικό περιβάλλον, να συλλέγουν δεδομένα και να τα στέλνουν στην Πλατφόρμα IoT.



Εικόνα 8 Συγκέντρωση και παρουσίαση δεδομένων από τη βιομηχανική γραμμή παραγωγής.

Παραμετροποίηση Process Orchestrator

Ο DT Configurator προσδιορίζει τα κύρια στοιχεία που καταγράφονται στα JSON αρχεία στον Process Orchestrator. Η παραμετροποίηση του Process Orchestrator χρειάζεται τις παραμέτρους για τις μηχανές και τους ελεγκτές στο βιομηχανικό περιβάλλον (devices.json) αλλά και για τις προγραμματιστικές ρουτίνες που αντιπροσωπεύουν τις δυνατότητες της γραμμής παραγωγής (routines.json). Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τη παραμετροποιημένη πλατφόρμα.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

The screenshot shows the 'Devices' page in the GREECE 4.0 interface. It features a sidebar with navigation options: Home, Devices, Routines, and Scenarios. The main content area has an 'Add new' button, a search bar, and a table listing devices. The table has columns for ID, Name, Manufacturer, Model, Date Added, Controller, and Actions. There are 4 entries in the table, all dated 2024-10-07. Below the table, it says 'Showing 1 to 4 of 4 entries' and has 'Previous', '1', and 'Next' navigation buttons. The footer of the page reads 'Copyright © Greece-4.0 2024'.

ID	Name	Manufacturer	Model	Date Added	Controller	Actions
1	Warehouse	Fischer Technik	Warehouse	2024-10-07	modbus	Edit Delete
2	Index Line	Fischer Technik	IndexLine	2024-10-07	modbus	Edit Delete
3	Punching Machine	Fischer Technik	PunchingMachine	2024-10-07	modbus	Edit Delete
4	Robotic Arm	Niryo	NED2	2024-10-07	ros	Edit Delete

Εικόνα 9 Process Orchestrator: Σελίδα διαχείρισης βιομηχανικών μηχανών της γραμμής παραγωγής

The screenshot shows the 'Routines' page in the GREECE 4.0 interface. It features a sidebar with navigation options: Home, Devices, Routines, and Scenarios. The main content area has an 'Add new' button, a search bar, and a table listing routines. The table has columns for ID, Name, Device, Date Added, Inputs, and Actions. There are 7 entries in the table, all dated 2024-10-07. Below the table, it says 'Showing 1 to 7 of 7 entries' and has 'Previous', '1', and 'Next' navigation buttons. The footer of the page reads 'Copyright © Greece-4.0 2024'.

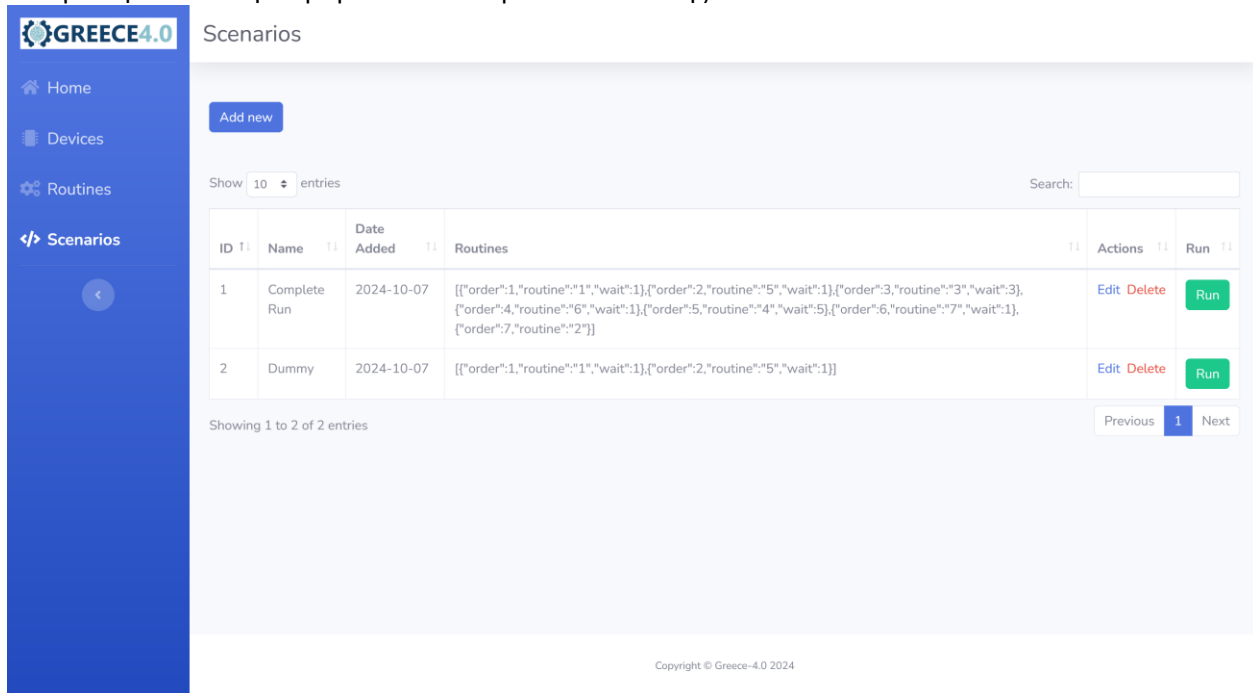
ID	Name	Device	Date Added	Inputs	Actions
1	Load from Warehouse	1	2024-10-07	[{"coil":80,"value":true}]	Edit Delete
2	Store to Warehouse	1	2024-10-07	[{"coil":82,"value":true}]	Edit Delete
3	Mill and drill	2	2024-10-07	[{"coil":400,"value":true}]	Edit Delete
4	Stamp	3	2024-10-07	[{"coil":640,"value":true}, {"coil":649,"value":true}]	Edit Delete
5	Pick from Warehouse and Place to Index Line	4	2024-10-07	[{"pose1":"wh","pose2":"id","state1":"start","state2":"start"}]	Edit Delete
6	Pick from Index Line and Place to Punching Machine	4	2024-10-07	[{"pose1":"id","pose2":"pm","state1":"finish","state2":"start"}]	Edit Delete
7	Pick from Punching Machine and Place to Punching Machine	4	2024-10-07	[{"pose1":"pm","pose2":"wh","state1":"finish","state2":"finish"}]	Edit Delete

Εικόνα 10 Process Orchestrator: Σελίδα διαχείρισης ρουτινών της γραμμής παραγωγής

Επιπλέον, αναλύοντας τις προδιαγραφές, καθορίζει ότι αυτά τα εικονικά βιομηχανικά στοιχεία απαιτούν ξεχωριστά πρωτόκολλα επικοινωνίας, επισημαίνοντας τον ρομποτικό βραχίονα για μια διεπαφή ROS και τα άλλα τρία μηχανήματα για έλεγχο μέσω Modbus TCP. Με βάση αυτήν την ανάλυση, διαμορφώνονται οι απαραίτητες ενδιάμεσες υπηρεσίες για τον έλεγχο του προσομοιωμένου εργοστασίου, βάσει προκατασκευασμένων προγραμμάτων λογισμικού. Ξεκινά μια ειδική υπηρεσία ROS για τον ρομποτικό βραχίονα και δημιουργείται μια υπηρεσία Modbus TCP για τα μηχανήματα που ελέγχονται από PLC. Για αυτήν την εικονική ανάπτυξη, ο Process Orchestrator διαμορφώνει τις υπηρεσίες με τα τελικά σημεία δικτύου των ελεγκτών που εκτελούνται στο περιβάλλον προσομοίωσης. Μόλις οι υπηρεσίες ξεκινήσουν την λειτουργία τους, καθιερώνουν επικοινωνία με τα αντίστοιχα εικονικά τους

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

δίδυμο και αναφέρουν πίσω στον Process Orchestrator. Αυτό επιβεβαιώνει ότι ολόκληρο το ψηφιακό δίδυμο της κυψέλης είναι πλήρως συνδεδεμένο και έτοιμο είτε για λειτουργία μόνο στον εικονικό κόσμο είτε για την εκτέλεση πειραματικών σεναρίων κατασκευής.



Εικόνα 11 Process Orchestrator: Σελίδα διαχείρισης διαδικασιών παραγωγής.

Μετά το πέρας της παραμετροποίησης το Ψηφιακό Δίδυμο είναι έτοιμο και συνδεδεμένο με την βιομηχανική γραμμή παραγωγής και μπορεί να παρέχει τις εξής υπηρεσίες:

- 1) Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των μεταβλητών σχετικών την λειτουργία της γραμμής παραγωγής και αποθήκευση αυτών.
- 2) Παρακολούθηση της λειτουργία της γραμμής παραγωγή σε πραγματικό χρόνο στο εικονικό τρισδιάστατο περιβάλλον τους ΨΔ.
- 3) Εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων παραγωγής στην πραγματική γραμμή παραγωγής μέσω του Process Orchestrator
- 4) Δημιουργία σεναρίων διαδικασιών με χρήση τεχνικών Δημιουργικής Τεχνικής Νοημοσύνης, εκτέλεση και επικαιροποίηση τους στο Ψηφιακό Δίδυμο.
- 5) Εκτέλεση επικαιροποιημένων διαδικασιών παραγωγής στη πραγματική γραμμή παραγωγής
- 6) Εκτέλεση σεναρίων επαναπρογραμματισμού ελεγκτών στο Ψηφιακό Δίδυμο και αυτόματος επαναπρογραμματισμό των ελεγκτών στο πραγματικό περιβάλλον.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Για τη πιστοποίηση της λειτουργίας του Ψηφιακού Διδύμου έχουν οριστεί συγκεκριμένα σενάρια χρήσης και επίδειξης, που χωρίζονται σε δυο ομάδες που χαρακτηρίζουν τους δείκτες επαλήθευσης της ανάπτυξης της πλατφόρμας Ψηφιακού Διδύμου:

- 1) KPI1: Εφαρμογή για μοντελοποίηση τουλάχιστον 2 βιομηχανικών διαδικασιών.
Αναμενόμενο αποτέλεσμα: Αυτόματη προσαρμογή της γραμμής παραγωγής και του Ψηφιακού Διδύμου.
- 2) KPI2: Εκτέλεση 3 σεναρίων αναπροσαρμογής της παραγωγικής διαδικασίας.
Αναμενόμενο αποτέλεσμα: Επιτυχής εκτέλεση των σεναρίων στην προγραμματική γραμμή παραγωγής.

Τα σενάρια αυτά καθώς και τα κριτήρια επαλήθευσή τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σενάριο	Στόχος	Μέσα επαλήθευσης
KPI1: Εφαρμογή για μοντελοποίηση τουλάχιστον 2 βιομηχανικών διαδικασιών		
Εκτέλεση προκαθορισμένης βιομηχανικής διαδικασίας παραγωγής	Έλεγχος ορθής λειτουργίας του Ψηφιακού Διδύμου για την παρακολούθηση της παραγωγής και των παραμέτρων αυτής σε πραγματικό χρόνο.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Οι τιμές παρακολούθησης του πραγματικού περιβάλλοντος πρέπει να συλλέγονται, να αποθηκεύονται και να παρουσιάζονται. 2) Το ψηφιακό αντίγραφο στον τρισδιάστατο χώρο πρέπει να εκτελεί ακριβώς την ίδια διαδικασία με τη πραγματική γραμμή παραγωγής.
Εκτέλεση εναλλακτικής διαδικασίας παραγωγής	Έλεγχος ορθής προσαρμογής Ψηφιακού Διδύμου στην αλλαγή του πραγματικού περιβάλλοντος.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Δημιουργία και επικύρωση του AutomationML μοντέλου για τη νέα γραμμή παραγωγής. 2) Επιτυχής δημιουργία ψηφιακού αντιγράφου στον εικονικό τρισδιάστατο κόσμο. 3) Επιτυχής επαναπροσαρμογή της πλατφόρμας του ΨΔ. 4) Επιτυχής εκτέλεση και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της διαδικασίας.
KPI2: Αναστολή λειτουργίας μηχανής και ανάγκη προσαρμογής της παραγωγικής διαδικασίας		
Αναστολή λειτουργίας μηχανής και ανάγκη προσαρμογής της παραγωγικής διαδικασίας	Έλεγχος της ορθής λειτουργίας της δημιουργίας σεναρίων παραγωγής, της προσομοίωσής τους της επικαιροποίηση τους στο ΨΔ και στη συνέχεια εκτέλεση τους στο πραγματικό περιβάλλον.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας με κριτήριο της απώλεια βιομηχανικού εξοπλισμού. 2) Επιτυχής προσομοίωση διαδικασιών παραγωγής στο ΨΔ. 3) Επιτυχής προσαρμογή της διαδικασίας στο πραγματικό περιβάλλον παραγωγής.
Βελτιστοποίηση βάση στόχων όπως παραγωγή με νέα μηχανήματα ή νέες απαιτήσεις στην παραγωγή.	Έλεγχος της ορθής λειτουργίας της δημιουργίας σεναρίων παραγωγής, της προσομοίωσής τους της επικαιροποίηση τους στο ΨΔ και στη συνέχεια εκτέλεση τους στο πραγματικό περιβάλλον.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας 2) Επιτυχής προσομοίωση διαδικασιών παραγωγής στο ΨΔ. 3) Επιτυχής προσαρμογή της διαδικασίας στο πραγματικό περιβάλλον παραγωγής.
Αλλαγή στην γεωγραφική τοποθέτηση των βιομηχανικών συστημάτων	Έλεγχος ορθού υπολογισμού και προσομοίωσης της αλλαγής στην τοπολογία του εργοστασίου στο ψηφιακό αντίγραφο και αυτόματο επαναπρογραμματισμό των ελεγκτών σε πραγματικό χρόνο.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας βάση αλλαγών στην τοπολογία της γραμμής παραγωγής. 2) Επιτυχής προσομοίωση της διαδικασίας παραγωγής στο ΨΔ και δημιουργία νέων προγραμμάτων ελέγχου. 3) Επιτυχής επαπρογραμματισμός των ελεγκτών του πραγματικού περιβάλλοντος.

2.6. Πλατφόρμα Ανάλυσης και Διαχείρισης Δεδομένων από το Βιομηχανικό Δίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things)

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η παρούσα λύση αφορά την ανάπτυξη και πιλοτική εφαρμογή μίας ολοκληρωμένης πλατφόρμας ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων από βιομηχανικά συστήματα, με αξιοποίηση τεχνολογιών Industrial Internet of Things (IIoT). Η πλατφόρμα έχει σχεδιαστεί ώστε να συλλέγει, αποθηκεύει, αναλύει και οπτικοποιεί δεδομένα διεργασίας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, παρέχοντας εργαλεία προηγμένης ανάλυσης για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων.

Η πιλοτική εγκατάσταση της λύσης πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον, με στόχο τη διασύνδεση ενός βιομηχανικού προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC), ο οποίος εκθέτει τα δεδομένα του μέσω OPC UA, με την πλατφόρμα IIoT που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου. Η αποστολή των μετρήσεων προς την πλατφόρμα πραγματοποιείται μέσω ενδιάμεσης εφαρμογής (Python utility), η οποία λειτουργεί ως OPC UA client και ως HTTP/REST publisher.

Υλικό και Δικτυακή Υποδομή

Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε:

- Siemens S7-1200 (CPU 1214C AC/DC/RLY):
 - Συνδέεται στο τοπικό δίκτυο
 - Εκθέτει τις τιμές ως OPC Server
- Ένας υπολογιστής/διακομιστής (gateway), όπου εκτελείται η Python εφαρμογή που:
 - συνδέεται στον OPC UA server του PLC,
 - διαβάζει τις τιμές των μεταβλητών,
 - τις προωθεί στην πλατφόρμα IIoT μέσω REST API
- Ο Server φιλοξενίας της IIoT πλατφόρμας, όπου είναι αναπτυγμένο το backend και η web διεπαφή (dashboards)



Εικόνα 12 Siemens S7 1200 CPU 1214C AC/DC/RLY

Η πλατφόρμα εγκαταστάθηκε σε ιδιόκτητο server του εργαστηρίου, ο οποίος λειτουργεί ως κεντρικό σημείο συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας των IIoT δεδομένων. Η αρχιτεκτονική ακολουθεί μοντέλο edge-to-cloud, όπου το PLC και ο υπολογιστής/διακομιστής λειτουργούν ως edge node, ενώ η πλατφόρμα υλοποιεί κεντρικές αλγοριθμικές υπηρεσίες.

Ο OPC UA server του PLC είναι προσβάσιμος στο εργαστηριακό δίκτυο στο endpoint:

- `opc.tcp://192.168.0.111:4840`

Η πλατφόρμα IIoT είναι διαθέσιμη μέσω HTTPS στη διεύθυνση:

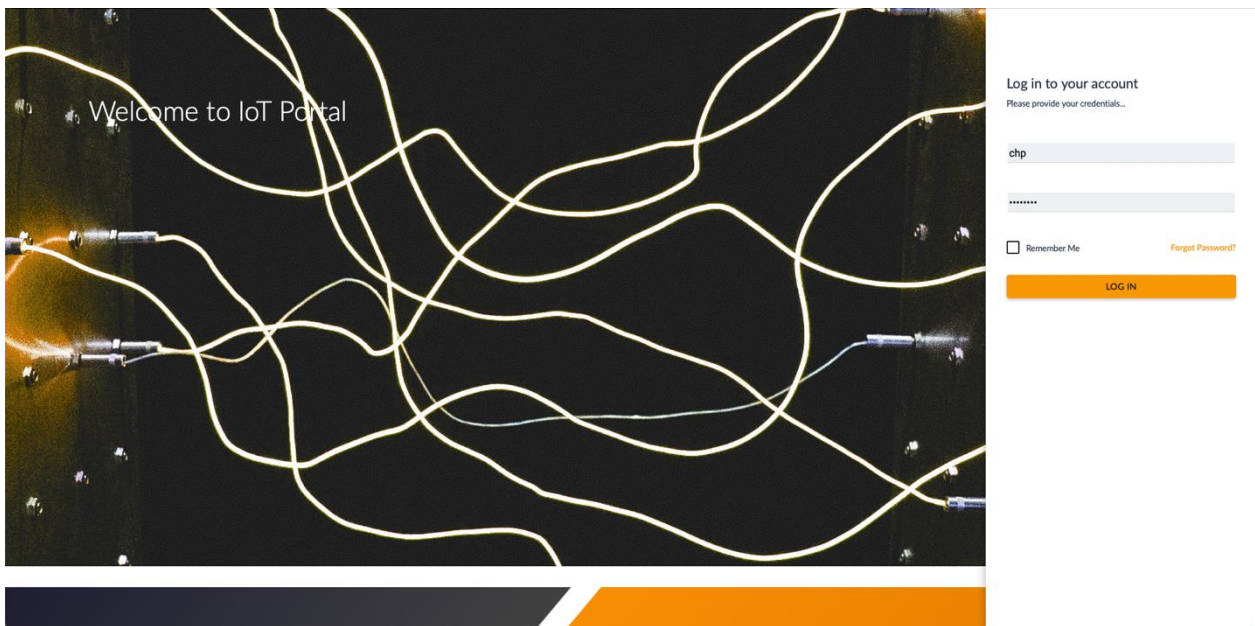
- `https://iiot-greece4.iti.gr/`

και ειδικότερα μέσω των REST endpoints του υποσυστήματος assignments:

- `https://iiot-greece4.iti.gr/iiot/api/assignments/{assignmentToken}/measurements?tenantAuthToken={tenantAuthToken}`

Στην πλατφόρμα υποστηρίζεται η είσοδος χρηστών με ατομικά διαπιστευτήρια, εξασφαλίζοντας ελεγχόμενη και ασφαλή πρόσβαση στις διαθέσιμες λειτουργίες. Κάθε χρήστης αντιστοιχίζεται σε συγκεκριμένο ρόλο (role), ο οποίος καθορίζει τα δικαιώματα πρόσβασης και τις επιτρεπόμενες ενέργειες στο σύστημα.

Η ιεραρχική αυτή δομή ρόλων επιτρέπει την ευέλικτη διαχείριση χρηστών και τη διασφάλιση ότι κάθε χρήστης έχει πρόσβαση μόνο στις λειτουργίες και τα δεδομένα που αντιστοιχούν στον ρόλο του.



Εικόνα 13 Είσοδος Χρήστη στην πλατφόρμα

Μεταβλητές και Δεδομένα Μετρήσεων

Επειδή δεν υπήρχαν φυσικοί αισθητήρες διαθέσιμοι για τις ανάγκες της πιλοτικής εγκατάστασης, το PLC παρήγαγε συνθετικά δεδομένα (datasets) που αντιστοιχούν σε τυπικά βιομηχανικά μεγέθη. Τα δεδομένα περιλάμβαναν:

- Θερμοκρασία (temperature, σε C°)
- Πίεση (Pressure, σε bar)
- Τάση (Voltage, σε Volt)
- Ένταση (Current, σε Ampere)
- Θόρυβο (Noise, σε dB)
- Δόνηση (acceleration/vibration, σε m/s²)
- Υγρασία (humidity, σε %)

Κάθε μέγεθος εκτίθεται ως OPC UA node σε συγκεκριμένο NodeId και κοινό namespace index. Στο Python utility, η αντιστοίχιση γίνεται μέσω της δομής MEASUREMENTS, όπου για κάθε μέγεθος ορίζεται:

- Node_id: το OPC UA NodeId της αντίστοιχης μεταβλητής,
- Measurement_key: το κλειδί που χρησιμοποιείται στο payload προς την πλατφόρμα,
- Assignment_token: το μοναδικό token που αντιστοιχεί στη συσκευή/ροή δεδομένων,
- Tenant_token: το token εξουσιοδότησης του tenant στην πλατφόρμα.

Ενδεικτικά:

Πίνακας 6 Αντιστοίχιση μεγεθών με ID & Key

Μέγεθος	Node ID	Key
Πίεση	13	Pressure
Θερμοκρασία	14	Temperature
Τάση	15	Voltage
Θόρυβος	16	Noise
Δόνηση	17	Acceleration
Ένταση	18	Current
Υγρασία	19	Humidity

Η ενδιάμεση εφαρμογή, υλοποιημένη σε Python, λειτουργεί ως εξής:

1. Σύνδεση στο OPC UA server του PLC

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη orcuca (Python OPC UA client). Η εφαρμογή συνδέεται στο endpoint `opc.tcp://192.168.0.111:4840` (PLC IP : Port), με δυνατότητα παραμετροποίησης (endpoint, namespace index).

2. Δημιουργία Node Objects

Βάσει ενός λεξικού MEASUREMENTS, η εφαρμογή καλεί `client.get_node(ua.NodeId(node_id, namespace_index))` για κάθε μέγεθος, δημιουργώντας ένα σύνολο OPC UA nodes που αντιστοιχούν στις μετρήσεις του PLC.

3. Περιοδική ανάγνωση μετρήσεων

Σε καθορισμένο χρονικό διάστημα (π.χ. κάθε 1 δευτερόλεπτο, μέσω παραμέτρου), η εφαρμογή διαβάζει τις τιμές όλων των OPC UA nodes και αποθηκεύει τις μετρήσεις σε ένα λεξικό (π.χ. {«pressure»: 5.1, «temperature»: 62.3, ...}).

4. Δημιουργία χρονοσήμανσης

Για κάθε “κύκλο” ανάγνωσης, δημιουργείται timestamp σε UTC, σε μορφή ISO 8601 με ακρίβεια microseconds: YYYY-MM-DDTHH:MM:SS.ffffffZ π.χ. 2025-06-12T10:15:30.123456Z.

5. Δημιουργία και αποστολή HTTP αιτημάτων

Για κάθε μέγεθος, δημιουργείται ξεχωριστό HTTP POST προς το αντίστοιχο assignment της πλατφόρμας. Το JSON payload έχει μορφή:

```
{ "measurementDate": " YYYY-MM-DDTHH:MM:SS.ffffffZ ",
  "updateState": <boolean>,
  "measurements": {
    "<measurement_key>": <value> }
}
```

π.χ. για την τάση:

```
{ "measurementDate": "2025-06-12T10:15:30.123456Z",
  "updateState": True,
  "measurements": {
    "voltage": 438.1 }
}
```

Η αποστολή γίνεται, με χρήση HTTP Basic Authentication, προς το endpoint: `https://iiot-greece4.iti.gr/iot/api/assignments/{assignmentToken}/measurements?tenantAuthToken={tenantToken}`

6. Διαχείριση λαθών και επαναλήψεων

Η εφαρμογή χρησιμοποιεί `requests.Session()` για αποδοτικότητα, και χειρίζεται αποτυχίες (timeouts, network errors) μέσω κατάλληλων μηνυμάτων καταγραφής (logging), χωρίς να διακόπτεται η συνεχής λειτουργία της.

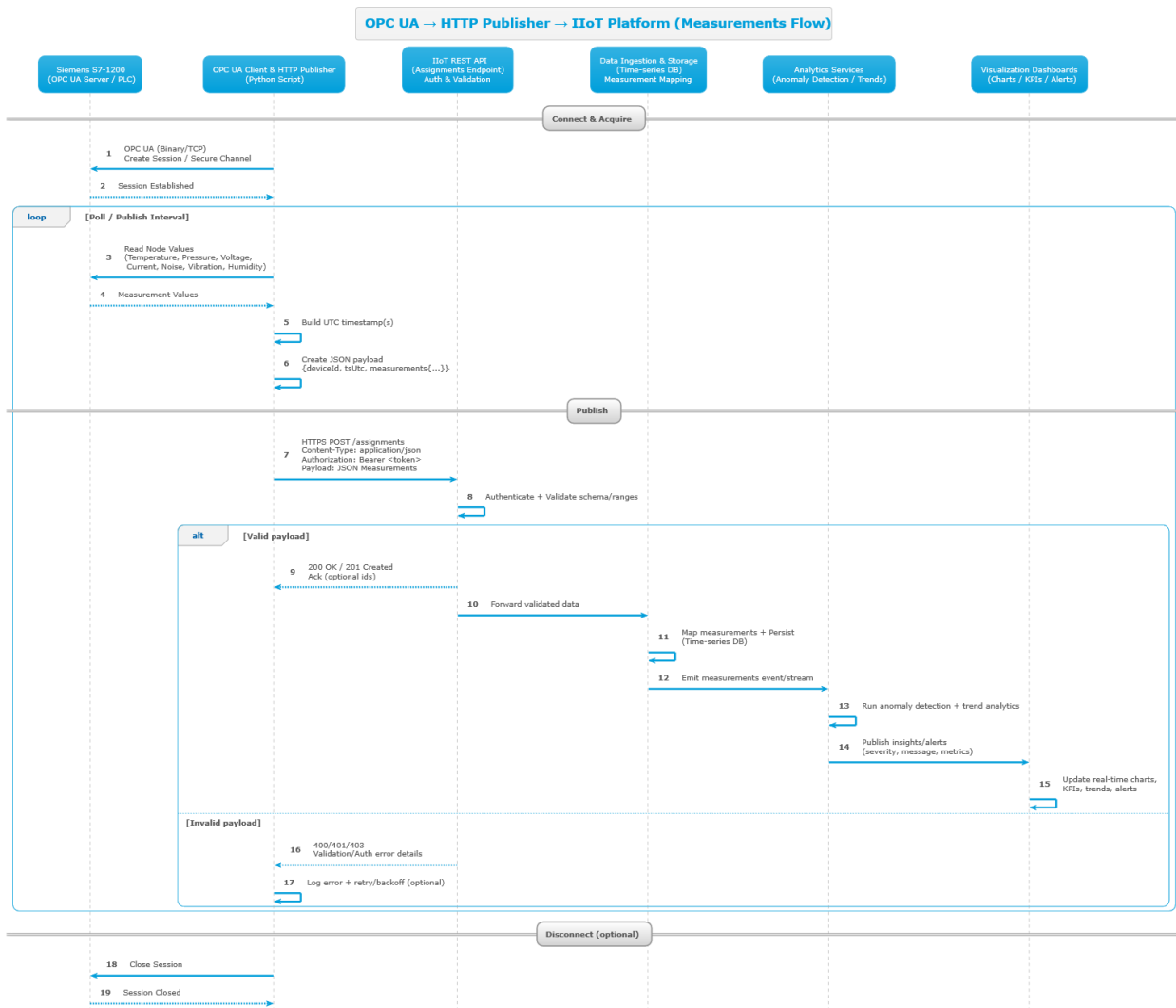
Ροή Δεδομένων στην Πλατφόρμα

Από τη στιγμή που τα HTTP POST requests παραληφθούν από την πλατφόρμα IIoT:

1. Το REST API επαληθεύει τα tokens (assignmentToken, tenantAuthToken) και ελέγχει τη δομή του JSON payload.
2. Τα δεδομένα διοχετεύονται στο υποσύστημα εισαγωγής και αποθήκευσης μετρήσεων, όπου αποθηκεύονται ως χρονοσειρές.
3. Ενεργοποιούνται οι υπηρεσίες:
 - anomaly detection,
 - trend analytics.
4. Τα αποτελέσματα και οι μετρήσεις είναι διαθέσιμα στα dashboards για real-time παρακολούθηση και ιστορική ανάλυση.

Με αυτόν τον τρόπο, η πιλοτική εγκατάσταση υλοποιεί ένα πλήρες chain:

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 14 Ροή Δεδομένων

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Για την πιλοτική επίδειξη της λύσης και την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας της σε εργαστηριακό περιβάλλον, υλοποιήθηκαν αντιπροσωπευτικά σενάρια χρήσης, τα οποία καλύπτουν τόσο τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων όσο και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Τα σενάρια σχεδιάστηκαν ώστε να προσομοιώνουν ρεαλιστικές βιομηχανικές συνθήκες λειτουργίας, αξιοποιώντας δεδομένα από βιομηχανικό ελεγκτή και τις ενσωματωμένες υπηρεσίες ανάλυσης της πλατφόρμας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επιβεβαίωση των βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs) που είχαν οριστεί για τη λύση.

Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν δύο σενάρια, τα οποία αντιστοιχούν στα ακόλουθα KPIs:

1. Ποικιλία ενσωματωμένων αλγοριθμικών υπηρεσιών
2. Μείωση χρόνου λήψης αποφάσεων

Σενάριο 1 για KPI1: Ποικιλία ενσωματωμένων αλγοριθμικών υπηρεσιών

Στόχος αυτού του σεναρίου είναι να αποδειχθεί ότι η πλατφόρμα μπορεί να εφαρμόσει πολλαπλές αλγοριθμικές υπηρεσίες πάνω σε ανεξάρτητα streams IIoT δεδομένων.

Σε αυτό το σενάριο:

1. Το PLC δημοσιεύει συνεχείς τιμές θερμοκρασίας, δόνησης, πίεσης και άλλων μεταβλητών.
2. Η πλατφόρμα εκτελεί σε πραγματικό χρόνο:
 - Anomaly Detection: εντοπισμός απόκλισης από το κανονικό πρότυπο λειτουργίας.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

- Trend Analytics: υπολογισμός τάσεων και ρυθμού μεταβολής των μεγεθών.
3. Οι δύο υπηρεσίες μπορούν να παρακολουθούνται συνδυαστικά:
 - Μία τιμή μπορεί να μην αποτελεί anomaly, αλλά να παρουσιάζει αυξητική τάση.
 - Αντίστροφα, μια τιμή μπορεί να είναι ξαφνικά εκτός εύρους και να επισημαίνεται άμεσα.
 4. Τα αποτελέσματα προβάλλονται στο dashboard της πλατφόρμας.

Αναμενόμενα αποτελέσματα:

- Ο χρήστης μπορεί να βλέπει real-time alerts.
- Τα δεδομένα παρουσιάζονται με τάσεις, ιστορικό και τιμές στιγμής.
- Η ποικιλία των υπηρεσιών καλύπτει πλήρως το KPI1.

Σενάριο 2 για KPI2: Μείωση Χρόνου Λήψης Αποφάσεων

Στόχος αυτού του σεναρίου είναι να αποδειχθεί ότι η πλατφόρμα επιταχύνει τη διαδικασία λήψης απόφασης σε σχέση με την τοπική αξιολόγηση συναγερμών (alarms) από το PLC.

Σε αυτό το σενάριο:

1. Το PLC παράγει δεδομένα που οδηγούν σε μία συνθήκη alarm (π.χ. υψηλή θερμοκρασία ή αυξημένες δονήσεις)
2. Παραδοσιακά, το PLC εμφανίζει μόνο το alarm, χωρίς αξιολόγηση σοβαρότητας ή συσχέτιση με άλλα μεγέθη.
3. Με τη χρήση της πλατφόρμας:
 - Τα δεδομένα αναλύονται άμεσα με anomaly detection και trend analytics.
 - Η ειδοποίηση εμφανίζεται σε web διεπαφή, προσβάσιμη από οποιονδήποτε χρήστη χωρίς φυσική παρουσία στο PLC.
 - Παρέχεται συγκεντρωμένη και οπτικοποιημένη πληροφορία
4. Ο χρόνος μέχρι την κατανόηση της κατάστασης μειώνεται από 5–10 λεπτά (χειροκίνητη διαδικασία) σε λιγότερο από 1 λεπτό.

Αναμενόμενα αποτελέσματα:

- Ο χρήστης λαμβάνει άμεσα notifications.
- Η πλατφόρμα επιταχύνει αισθητά την αντίδραση σε βιομηχανικά συμβάντα.
- Το KPI2 επιτυγχάνεται χωρίς την ύπαρξη φυσικών αισθητήρων, μέσω συνθετικών datasets.

Πίνακας 7 Σενάρια Χρήσης IIoT

Σενάριο	Στόχος	Μέσα Επαλήθευσης
Εφαρμογής ενσωματωμένων αλγοριθμικών υπηρεσιών	Επιβεβαίωση της δυνατότητας της πλατφόρμας να ενσωματώνει και να λειτουργεί πολλαπλές αλγοριθμικές υπηρεσίες ανάλυσης πάνω σε βιομηχανικά δεδομένα	<ul style="list-style-type: none">- Εκτέλεση υπηρεσιών anomaly detection και trend analytics σε πραγματικά δεδομένα από PLC- Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων στα dashboards της πλατφόρμας- Καταγραφή ανωμαλιών και τάσεων σε ιστορικό δεδομένων
Μείωσης χρόνου λήψης αποφάσεων	Αξιολόγηση της συνεισφοράς της πλατφόρμας στη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την κατανόηση και αξιολόγηση κρίσιμων καταστάσεων λειτουργίας	<ul style="list-style-type: none">- Σύγκριση χρόνου αντίδρασης μεταξύ τοπικής αξιολόγησης alarm στο PLC και κεντρικής ανάλυσης μέσω της πλατφόρμας- Άμεση εμφάνιση ειδοποιήσεων και αναλύσεων μέσω web διεπαφής- Συνδυαστική παρουσίαση δεδομένων, ανωμαλιών και τάσεων

2.7. Ολογράμματα βασισμένα σε Ψηφιακά Δίδυμα για μεταφορά γνώσης και εκπαίδευση εργαζομένων-χειριστών στο περιβάλλον της Βιομηχανίας 4.0

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η προσφερόμενη τεχνολογική λύση παρέχει ένα μέσο δημιουργίας σεναρίων βασισμένα σε ολογράμματα με χρήση επαυξημένης πραγματικότητας με χρήση ψηφιακού διδύμου για την αποθήκευση των σεναρίων και των δεδομένων τους.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα παραδοτέα, για την σωστή λειτουργία της συγκεκριμένης λύσης απαιτείται η εγκατάσταση δύο εφαρμογών και η δημιουργία μία βάσης δεδομένων-Industrial IoT. Οι εφαρμογές πρέπει να εγκατασταθούν σε έναν σταθερό υπολογιστή (XR-Creator) και ένα VR Headset (XR-Viewer) ενώ το υποσύστημα για την καταγραφή των δεδομένων, για τις ανάγκες της εργαστηριακής εγκατάστασης, θα γίνει σε τοπικό server του ΕΚΕΤΑ. Προκειμένου να γίνει πιστοποίηση του συστήματος, επιλέχθηκε να δημιουργήσουμε ένα σενάριο εκπαίδευσης εργαζομένων για τη συναρμολόγηση ανελκυστήρα σε ένα άδειο φρεάτιο, το οποίο επιλέχθηκε μετά από επικοινωνία με ειδικούς της βιομηχανίας. Ως πρώτο βήμα έγινε η εγκατάσταση των εφαρμογών και η δοκιμή της λειτουργίας τους μέσα από τα Demo accounts που έχουν δημιουργηθεί για αυτό τον σκοπό.

Μέσα από αυτά τα σενάρια μπορούμε να δούμε ότι οι δυο εφαρμογές λειτουργούν όπως θα έπρεπε, καθώς και η βάση δεδομένων, αφού μπορούμε να αντλήσουμε τα δεδομένα που χρειαζόμαστε από την εκάστοτε εφαρμογή. Έπειτα, έγινε η συλλογή υλικού για το δοκιμαστικό σενάριο. Πιο συγκεκριμένα, το δοκιμαστικό σενάριο περιγράφεται στα παρακάτω βήματα:

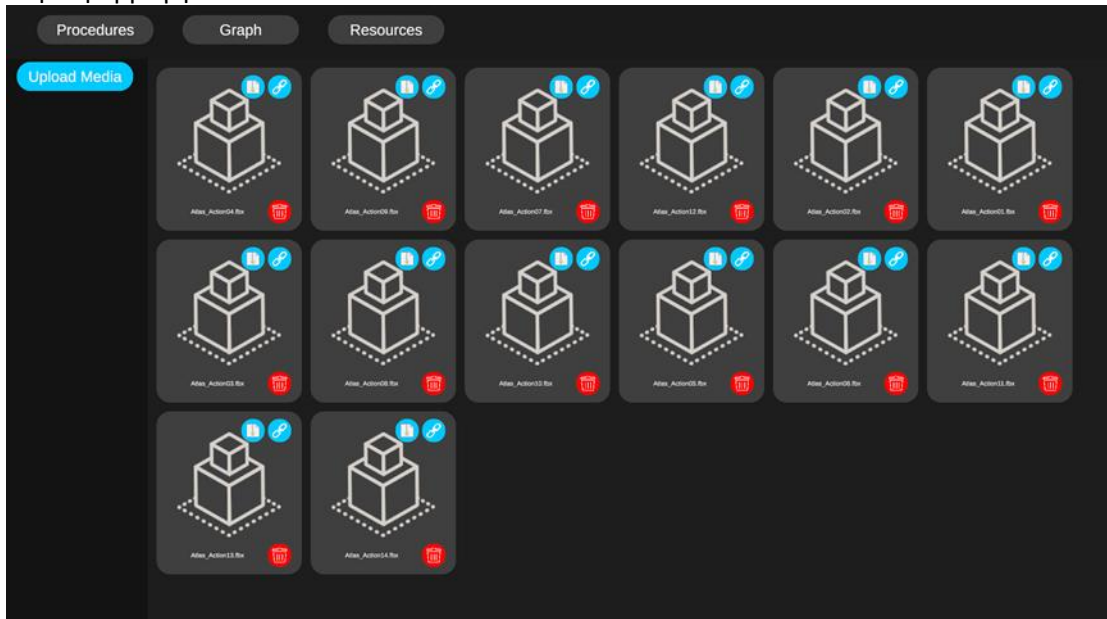
1. Διάτρηση τοίχου στα τέσσερα κόκκινα σημεία δεξιά και αριστερά του φρεατίου.
2. Τοποθέτηση βίδας στις οπές, προσθήκη παξιμαδιού DIN127A12 και βίδας DIN934M12x1.75 και βίδωμα με καρυδάκι M12. Επανάληψη για όλες τις οπές.
3. Τοποθέτηση κλιπ στις άνω οπές του εξαρτήματος 5294201_935, χρήση παξιμαδιών DIN127A10 και βιδών DIN934M10x1.5, σύσφιξη με καρυδάκι M10. Στερέωση του 5294201_935 στο 5294312 με χρήση παξιμαδιών DIN126-15.5 και βιδών DIN933M12x30 με καρυδάκι M12. Επανάληψη στην απέναντι πλευρά.
4. Τοποθέτηση κλιπ στις μεσαίες οπές του 5244236, χρήση παξιμαδιών DIN127A10 και βιδών DIN934M10x1.5, σύσφιξη με καρυδάκι M10.
5. Στερέωση του 5244236 στο 5244203 και του 5244205xx στο ίδιο εξάρτημα, με παξιμάδια 125A13 και 127A12 και βίδες 933M12x30 και 934M12x1.75. Εφαρμογή σύσφιξης με καρυδάκι M12.
6. Τοποθέτηση του 5244231xx στα πλάγια στηρίγματα, χρήση παξιμαδιών 127A12 και βιδών 933M12x30 για άνω και κάτω σύνδεση με καρυδάκι M12. Στερέωση μεταλλικών βυσμάτων M12 στις οπές του τοίχου με παξιμάδι 125A13 και βίδα 934M12x1.75.
7. Εισαγωγή δύο κλιπ στις άνω οπές του 5294231, τοποθέτηση παξιμαδιών 127A12 και βιδών 934M12x1.75, σύσφιξη με καρυδάκι M12. Στερέωση του 5294231 στο 5294222 με διπλά παξιμάδια (125A13 και 127A12) και βίδες 933M12x30.
8. Επαναληπτική διάτρηση τοίχου στα σημεία στερέωσης όπου απαιτείται.
9. Τοποθέτηση και σύσφιξη επιπλέον κλιπ στις μεσαίες οπές του 5244236, με καρυδάκι M10.
10. Επαναληπτική συναρμολόγηση πλευρικών στηριγμάτων (5244231xx, 5244203, 5244205xx) με καρυδάκι M12 και αντίστοιχα παξιμάδια και βίδες.
11. Ξεβίδωμα βιδών 934M12x1.75 από τα κλιπ για προετοιμασία τοποθέτησης ράγας.
12. Τοποθέτηση κάθετης ράγας μεταξύ των οπών των κλιπ, χρήση παξιμαδιών 127A12 και βιδών 934M12x1.75, σύσφιξη με καρυδάκι M12. Επανάληψη για τις υπόλοιπες ράγες.

Για την συγκεκριμένη εγκατάσταση δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα με animations τα οποία κρίθηκαν καλύτερα για να μεταφέρουν την γνώση σε σχέση με δισδιάστατα αρχεία κειμένου. Τα τρισδιάστατα μοντέλα συνοδεύονται από περιγραφή για την περαιτέρω διευκόλυνση του εκπαιδευόμενου καθώς και για την περιγραφή λεπτομερειών όπως η διάμετρος των βιδών και

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

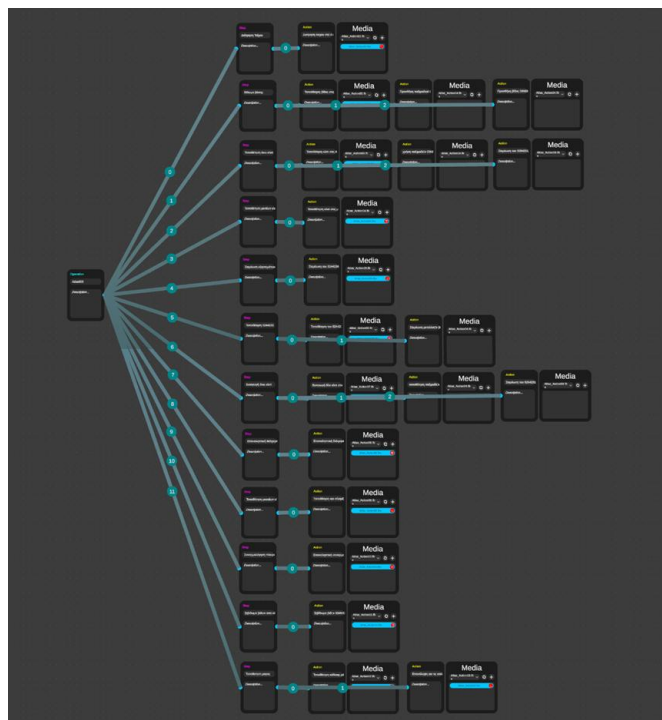
παξιμαδιών που θα χρειαστούν για την εγκατάσταση, καθώς και την διευκόλυνση στην επιλογή των κατάλληλων εργαλείων.

Μετά την συγκέντρωση του υλικού, πρέπει να δημιουργηθεί το σενάριο με την χρήση του XR-Viewer. Στόχος της εφαρμογής είναι να κάνει όσο πιο εύκολη την δημιουργία του σεναρίου, χωρίς απαίτηση για ιδιαίτερες γνώσης από την χρήστη-δημιουργό. Πρώτο βήμα είναι να γίνει η μεταφόρτωση των αρχείων μέσα στην εφαρμογή.



Εικόνα 15 Αρχεία φορτωμένα στην εφαρμογή XR-Creator

Έπειτα, μέσα από το γραφικό περιβάλλον, πρέπει να περιγραφούν τα βήματα και να γίνει η διασύνδεσή τους με το εκάστοτε οπτικοακουστικό υλικό. Το συγκεκριμένο σενάριο αναλύθηκε σε XX βήματα, τα οποία φαίνονται στην παρακάτω εικόνα μέσα από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής.



Εικόνα 16 Περιγραφή σεναρίου με χρήση Nodes στην εφαρμογή XR-Creator

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας και την αποθήκευση του σεναρίου στην βάση δεδομένων του ΠΟΤ, σειρά έχει η αναπαραγωγή του στην εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας. Παρακάτω παρατίθεται το json του σεναρίου που δημιουργήθηκε

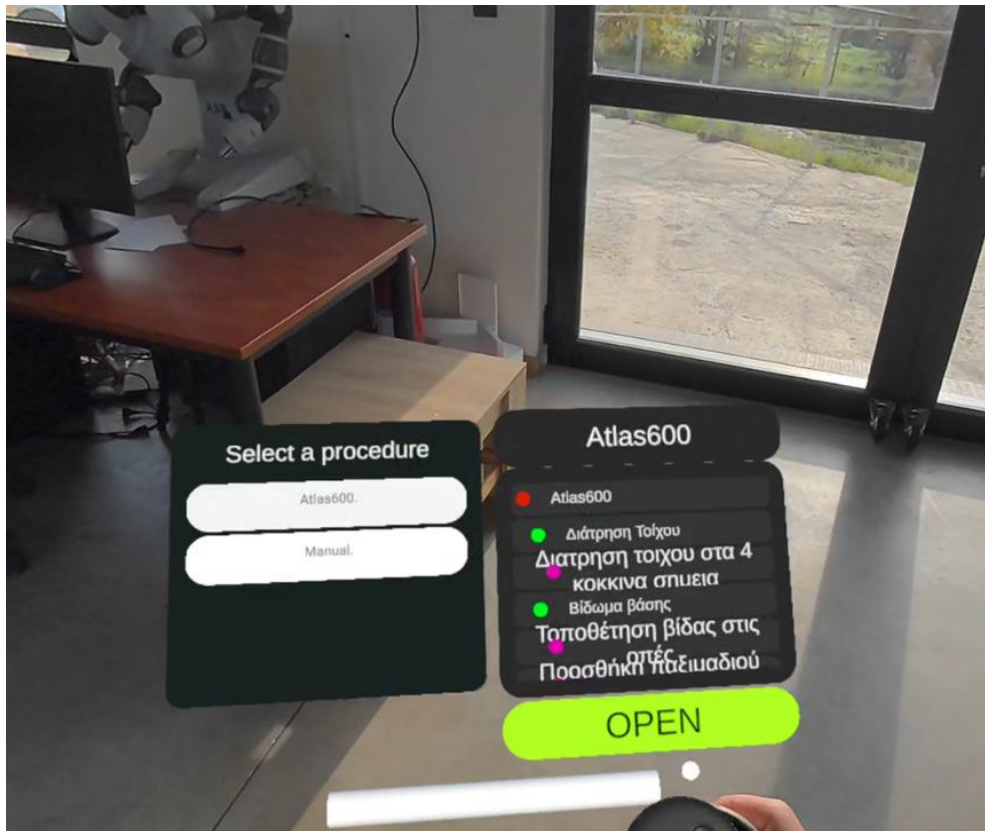
```
operations [1]
  0 {4}
    name : Atlas600
    position {3}
    Description : Εγκατάσταση του ανελευστήρα
    steps [12]
      0 {4}
        name : Διάτρηση Τοίχου
        position {3}
        Description : {value}
        actions [1]
      1 {4}
        name : Βιδώμα βάσης
        position {3}
        Description : {value}
        actions [3]
      2 {4}
        name : Τοποθέτηση άνω κλιπ
        position {3}
        Description : {value}
        actions [3]
      3 {4}
        name : Τοποθέτηση μεσών κλιπ
        position {3}
        Description : {value}
        actions [1]
      4 {4}
        name : Στερέωση εξαρτημάτων
        position {3}
        Description : {value}
        actions [1]
      5 {4}
        name : Τοποθέτηση 5244231
        position {3}
        Description : {value}
        actions [2]
      6 {4}
        name : Εισαγωγή άνω κλιπ
        position {3}
        Description : {value}
        actions [3]
      7 {4}
        name : Επαναληπτική διάτρηση τοιχου
        position {3}
        Description : {value}
        actions [1]
      8 {4}
        name : Τοποθέτηση μεσαίων κλιπ
        position {3}
        Description : {value}
        actions [1]
      9 {4}
        name : Συναρμολόγηση πλευρικών στηριγματος
        position {3}
        Description : {value}
        actions [1]
      10 {4}
        name : Ξεβιδώμα βιδων απο κλιπ
        position {3}
        Description : {value}
        actions [1]
      11 {4}
        name : Τοποθετηση ραγας
        position {3}
        Description : {value}
        actions [2]
```

Εικόνα 17 JSON δοκιμαστικού σεναρίου όπως παράχθηκε από την εφαρμογή XR-Creator

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η εφαρμογή XR-Viewer έχει εγκατασταθεί σε μία συσκευή Meta Quest 3, η οποία παρέχει passthrough AR δυνατότητες. Στον XR-Viewer ο χρήστης μπορεί να δει μέσα από την λίστα σεναρίων το σενάριο που μόλις δημιουργήθηκε.



Εικόνα 18 Λίστα σεναρίων στην εφαρμογή XR-Viewer

Αφού την επιλέξει, θα αρχίσει η φόρτωση του οπτικοακουστικού υλικού από την βάση του IIoT. Αυτή η διαδικασία μπορεί να πάρει από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά, ανάλογα με το μέγεθος των αρχείων που χρειάζεται να κατέβουν από τον server. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται ενδεικτικά μερικά μοντέλα στο περιβάλλον του XR-Viewer.



Εικόνα 19 Τρισδιάστατα μοντέλα στην εφαρμογή XR-Viewer

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Έπειτα μέσα από το GUI ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί στα βήματα του σεναρίου και να τα εκτελεί ο ίδιος σε πραγματικό χρόνο. Προκειμένου να επαληθευτούν οι βασικοί δείκτες απόδοσης, το σενάριο θα εκτελεστεί από μία δοκιμαστική ομάδα ατόμων. Κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του εκπαιδευτικού σεναρίου θα καταμετρηθεί τόσο ο χρόνος ολοκλήρωσης όσο και τα λάθη τα οποία κάνουν οι χρήστες. Έτσι θα μπορέσουμε να εξακριβώσουμε, αν και πόσο η εφαρμογή.

Πίνακας 8 Σενάρια επαλήθευσης της λύσης

Σενάριο	Στόχος	Μέσα επαλήθευσης
KPI1: Μείωση λαθών κατά την εκτέλεση της διαδικασίας		
Εκτέλεση του εκπαιδευτικού σεναρίου συναρμολόγησης ανελκυστήρα από τη δοκιμαστική ομάδα	Έλεγχος αν η χρήση XR-Viewer μειώνει τον αριθμό λαθών κατά την εκτέλεση της διαδικασίας	<ul style="list-style-type: none"> - Καταγραφή λαθών κατά την εκτέλεση - Σύγκριση αποτελεσμάτων XR ομάδας και ομάδας εγχειριδίων - Ποιοτική ανάλυση σφαλμάτων στη σειρά και ακρίβεια των βημάτων
KPI2: Μείωση χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας		
Εκτέλεση του ίδιου σεναρίου από δύο ομάδες με διαφορετική μέθοδο εκπαίδευσης	Αξιολόγηση του αν η επαυξημένη πραγματικότητα επιταχύνει την ολοκλήρωση μιας τεχνικής διαδικασίας	<ul style="list-style-type: none"> - Μέτρηση συνολικού χρόνου εκτέλεσης - Χρονική καταγραφή ανά βήμα της διαδικασίας - Σύγκριση χρόνων μεταξύ XR ομάδας και ομάδας εγχειριδίων
KPI3: Μείωση αναγκών καθοδήγησης από ειδικούς		
Εκπαίδευση χρηστών στη διαδικασία με δύο μεθόδους: εγχειρίδια και XR-Viewer	Επιβεβαίωση ότι η XR εκπαίδευση παρέχει πληρέστερη κατανόηση και μειώνει την ανάγκη βοήθειας	<ul style="list-style-type: none"> - Καταμέτρηση αριθμού ερωτήσεων προς ειδικούς - Ποιοτική αξιολόγηση κενών κατανόησης - Σύγκριση μεταξύ των δύο ομάδων
KPI4: Ορθή λειτουργία Creator–Server–Viewer και εγκυρότητα δεδομένων		
Δημιουργία σεναρίου στο XR-Creator και αναπαραγωγή του στο XR-Viewer μέσω του IIoT server	Πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας της τεχνικής αλυσίδας (Creator → Server → Viewer) και της εγκυρότητας όλων των δεδομένων	<ul style="list-style-type: none"> - Έλεγχος εγκυρότητας JSON - Έλεγχος επιτυχούς φόρτωσης όλων των media (βίντεο, εικόνες, 3D μοντέλα, PDF) - Δοκιμή hand tracking και passthrough AR στο Meta Quest 3 - Έλεγχος σταθερότητας επικοινωνίας με τη βάση IIoT

2.8. Εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής και διαχείρισης προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής

Η συγκεκριμένη τεχνική λύση στοχεύει στο σχεδιασμό, την ανάπτυξη και υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης, ανοιχτής εργαλειοθήκης για τον προγραμματισμό, τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση ευέλικτων και ανθεκτικών δικτύων παραγωγής στη μεταποιητική βιομηχανία. Η εργαλειοθήκη αναπτύσσεται σε περιβάλλον ανοιχτού λογισμικού (Python) και ενσωματώνει σε ένα ενιαίο ψηφιακό οικοσύστημα τη γραφική μοντελοποίηση ροών παραγωγής, τον ευφυή/ασαφή έλεγχο και την ανάλυση σεναρίων λειτουργίας με βάση δείκτες απόδοσης. Σε αντίθεση με κλασικές, κλειστές λύσεις APS/MES (Advanced Planning & Scheduling και Manufacturing Execution System αντίστοιχα), η προτεινόμενη εργαλειοθήκη επιτρέπει την ευέλικτη αναπαράσταση πολύπλοκων δικτύων (γραμμές, αποθήκες, σημεία συναρμολόγησης/αποσυναρμολόγησης) και τον πειραματισμό με διαφορετικές πολιτικές ελέγχου και προγραμματισμού, με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής απόδοσης και της ανθεκτικότητας σε διαταραχές. Η τεχνική λύση οργανώνεται γύρω από τρία βασικά, διασυνδεδεμένα υποσυστήματα:

1. την γραφική μοντελοποίηση και δημιουργία ενός «ψηφιακού διδύμου» του δικτύου παραγωγής, μέσω block-diagram περιβάλλοντος όπου ο χρήστης ορίζει και συνδέει μηχανές, buffers, γραμμές μεταφοράς και κόμβους
2. τον καθορισμό πολιτικών ελέγχου (ευρετικές και ασαφείς), επιτρέποντας τον ορισμό κανόνων if-then-else, καθώς και τη διαμόρφωση ασαφών ελεγκτών με συναρτήσεις συμμετοχής και κανόνες που λαμβάνουν υπόψη WIP, ζήτηση, αξιοποίηση κ.ά., ώστε το δίκτυο παραγωγής να αυτοπροσαρμόζεται σε μεταβολές και διαταραχές.
3. την μηχανή προσομοίωσης, η οποία συγκεντρώνει τις τιμές εισόδων/εξόδων/παραμέτρων ενδιαφέροντος, υπολογίζει βασικούς δείκτες απόδοσης (ρυθμός παραγωγής, WIP, βαθμός χρησιμοποίησης εξοπλισμού, βαθμός ανθεκτικότητας) και υποστηρίζει την οπτικοποίησή τους, διευκολύνοντας τη σύγκριση σεναρίων και τη λήψη αποφάσεων από τα εμπλεκόμενα μέρη.

Στο πλαίσιο της Ενότητας Εργασίας 2 παρουσιάστηκε η γενική μεθοδολογία, η αρχιτεκτονική της λύσης και τα αρχικά βήματα σχεδιασμού και υλοποίησης της εργαλειοθήκης, υπό ένα βασικό, τεχνολογικά ουδέτερο πλαίσιο. Στο πλαίσιο της Ενότητας Εργασίας 3, η τεχνική λύση εφαρμόζεται πιλοτικά σε εργαστηριακά (και στη συνέχεια βιομηχανικά-πραγματικά) περιβάλλοντα, ώστε να ελεγχθεί, να αξιολογηθεί και να επικυρωθεί η αποτελεσματικότητά της μέσα από ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας/προσομοίωσης. Το παρόν παραδοτέο εστιάζει στην εγκατάσταση και ολοκλήρωση του πιλοτικού συστήματος σε εργαστηριακό περιβάλλον, τον περαιτέρω εμπλουτισμό λειτουργικότητας, την εκτενέστερη δοκιμή κι αποσφαλμάτωση μετά από πολλές δοκιμές και παραμετροποιήσεις, καθώς και στον επιλογή/υλοποίηση αντιπροσωπευτικών σεναρίων χρήσης και επίδειξης. Η συνολική επικύρωση της λύσης σε ένα πραγματικό βιομηχανικό σενάριο εφαρμογής (κοινό με την επόμενη τεχνολογική λύση (9) του Πολυτεχνείου Κρήτης) θα παρουσιαστεί σε επόμενο παραδοτέο της Ενότητας Εργασίας 3.

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Ο βασικός στόχος του πιλοτικού συστήματος είναι η εργαστηριακή επαλήθευση της λειτουργικότητας της εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής, μέσω α) επαλήθευσης λειτουργικότητας σε “from-scratch” κατασκευασμένα σενάρια διαβαθμισμένης δυσκολίας/πολυπλοκότητας και β) σύγκρισης με ένα ήδη υλοποιημένο μοντέλο προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Στο Simulink έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο γραμμής παραγωγής με τρεις μηχανές και ενδιάμεσες αποθήκες, με δύο εναλλακτικές πολιτικές ελέγχου:

- Κατανεμημένη προσέγγιση, με τρεις ελεγκτές ασαφούς ελέγχου που ρυθμίζουν τους ρυθμούς παραγωγής κάθε μηχανής.
- Ευρετική πολιτική κατώφλιου, όπου η απόφαση βασίζεται σε απλούς κανόνες τύπου κατώφλι-υπερβολή.

Σκοπός της πρώτης προσέγγισης είναι να επαληθευθεί η πλήρης λειτουργικότητα της εργαλειοθήκης, να χρησιμοποιηθούν/αναλυθούν όλες οι διαθέσιμες επιλογές του γραφικού περιβάλλοντος και να

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

εντοπιστούν/διορθωθούν αστοχίες/παραλείψεις/λογικά λάθη. Σκοπός της δεύτερης προσέγγισης είναι το πιλοτικό μας σύστημα σε Python να αναπαράγει την ίδια γραμμή παραγωγής στο νέο, ανοιχτό εργαλείο (εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής), με στόχο:

- να επιβεβαιωθεί ότι τα βασικά μεγέθη (Work-In-Progress – WIP), παραγωγή, αξιοποίηση, ζήτηση εξελίσσονται με συνεπή τρόπο σε σχέση με το Simulink,
- να επιδειχθεί η ισοδυναμία των πολιτικών ελέγχου (fuzzy vs heuristic) όταν μεταφέρονται στο νέο περιβάλλον,
- να αποδειχθεί στην πράξη το πλεονέκτημα της open-source αρχιτεκτονικής (ταχύτητα εκτέλεσης, ευκολία παραμετροποίησης, δυνατότητα επέκτασης).

Το πιλοτικό σύστημα εγκαταστάθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον, με τα εξής βασικά στοιχεία:

Πίνακας 9 Ρύθμιση παραμέτρων/προγραμματιστικού περιβάλλοντος για την πιλοτική επαλήθευση της εργαλειοθήκης σε εργαστηριακό περιβάλλον

Στοιχείο/ υποσύστημα	Συνοπτική περιγραφή	Χαρακτηριστικά
Υπολογιστική πλατφόρμα	Σταθμός εργασίας με λειτουργικό Windows, εγκατεστημένα τα εργαλεία	<ul style="list-style-type: none"> - Matlab/Simulink (για το baseline μοντέλο) - Python 3.12.6 με τις βιβλιοθήκες Tkinter, scikit-fuzzy, python-control, bdsim (ανάλογα με την τελική έκδοση της εργαλειοθήκης)
Εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης παραγωγής	Λογισμικό και συνοδευτικά αρχεία (εικονίδια, εγχειρίδιο, βιβλιοθήκες)	<ul style="list-style-type: none"> - Πηγαίος κώδικας Python (για σκοπούς ανάπτυξης/δοκιμών) και - Αυτόνομο εκτελέσιμο αρχείο (.exe) για δοκιμή «σαν τελικός χρήστης» χωρίς εξαρτήσεις από Matlab ή άλλα εμπορικά εργαλεία
Σύνολο αρχείων Simulink & FIS	Αρχεία υλοποίησης σε περιβάλλον Matlab / Simulink για την εκτέλεση / επαλήθευση του μοντέλου αναφοράς	<ul style="list-style-type: none"> - Τα αρχεία .slx για τις δύο πολιτικές ελέγχου, - Τα αρχεία .fis με τους κανόνες ασαφούς ελέγχου, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά κατά τη μεταφορά της λογικής στο νέο εργαλείο

Η εργαστηριακή εγκατάσταση επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση του ίδιου σεναρίου στο Simulink (ως μοντέλο αναφοράς) και στην εργαλειοθήκη σε Python (ως υπό αξιολόγηση λύση). Έτσι, οι δοκιμές γίνονται στο ίδιο περιβάλλον (ίδιος υπολογιστής, ίδιοι αρχικοί σπόροι τυχαιότητας όπου είναι δυνατόν), ελαχιστοποιώντας εξωγενείς παράγοντες. Η διαδικασία ολοκλήρωσης του πιλοτικού συστήματος περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Εγκατάσταση και έλεγχος περιβάλλοντος Python

- Εγκατάσταση Python 3.x και απαιτούμενων βιβλιοθηκών (Tkinter, scikit-fuzzy, python-control, bdsim κ.λπ.).
- Έλεγχος εκτέλεσης βασικών σεναρίων της εργαλειοθήκης (φόρτωση/αποθήκευση μοντέλου, εκτέλεση απλής προσομοίωσης).

2. Εισαγωγή/αναπαραγωγή γραμμής παραγωγής στο νέο εργαλείο

- Σχεδίαση της γραμμής παραγωγής συνδεδεμένων μηχανών ως δομικό διάγραμμα (block diagram):
 - Μπλοκ μηχανών με παραμέτρους μέγιστου ρυθμού παραγωγής,
 - Μπλοκ αποθηκών με συγκεκριμένη χωρητικότητα μονάδων,
 - Μπλοκ ζήτησης με στοχαστική ή σταθερή διαδικασία άφιξης.

3. Ορισμός πολιτικών ελέγχου (fuzzy & heuristic)

- a. Ορισμός της λογικής της εργαλειοθήκης (μεταβλητές εισόδου/εξόδου, γλωσσικοί όροι και κανόνες).
- b. Ορισμός της ευρετικής πολιτικής με κανόνες if-then-else.

4. Διασύνδεση με μηχανισμό προσομοίωσης

- a. Ρύθμιση παραμέτρων (βήμα προσομοίωσης, διάρκεια, αρχικοποίηση στοχαστικών γεννητριών όπου είναι δυνατόν).
- b. Έλεγχος ότι τα διαγράμματα χρόνου (ζήτηση, παραγωγή, WIP, αξιοποίηση) παράγονται σε συμβατή μορφή.

5. Δημιουργία “πακέτου εργαστηριακής επίδειξης”

- a. Προκαθορισμένα αρχεία μοντέλων για κάθε σενάριο (baseline fuzzy, baseline heuristic).
- b. Καταγραφή βημάτων-οδηγιών ώστε να είναι εφικτή η επανάληψη προσομοιώσεων και η σύγκριση αποτελεσμάτων.

Με την υλοποίηση των παραπάνω βημάτων, το πιλοτικό σύστημα θεωρείται πλήρως εγκατεστημένο και λειτουργικό σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Για την καλύτερη οργάνωση και τεκμηρίωση των δοκιμών, τα βασικά σενάρια χρήσης και επίδειξης της εργαλειοθήκης συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 10). Για κάθε σενάριο περιγράφεται ο κύριος στόχος/ερευνητικό ερώτημα και τα αρχεία ή υποσυστήματα που αξιοποιούνται, τόσο στο περιβάλλον Matlab/Simulink όσο και στο νέο, ανοιχτό εργαλείο σε Python.

Πίνακας 10 Βασικά σενάρια χρήσης και επίδειξης λειτουργίας

Σενάριο	Σκοπός / Ερευνητικό ερώτημα	Χρησιμοποιούμενα αρχεία / υποσυστήματα και παράμετροι
Σενάριο 0 - From-scratch βασικά σενάρια λειτουργίας	Έλεγχος πλήρους λειτουργικότητας της εργαλειοθήκης σε απλά, «καθαρά» σενάρια (1-2 μηχανές, σταθερή ή απλή στοχαστική ζήτηση). Χρήση όλων των βασικών δυνατοτήτων του GUI (δημιουργία/σύνδεση blocks, ρυθμίσεις παραμέτρων, εκτέλεση/παύση/επανεκκίνηση προσομοίωσης) και εντοπισμός αρχικών αστοχιών ή λογικών λαθών.	<ul style="list-style-type: none"> - Εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης παραγωγής (εκτελέσιμο αρχείο εφαρμογής) - Demo μοντέλα «from-scratch» (γραμμή 2 μηχανών με buffer και distributed ελεγκτή) - Χωρίς χρήση υλοποίησης αναφοράς (Simulink) - εστίαση στην ίδια την εργαλειοθήκη
Σενάριο 1 – Ονομαστική λειτουργία με καταναμημένη ασαφή πολιτική	Αναπαραγωγή της γραμμής παραγωγής τριών μηχανών με καταναμημένο ασαφή έλεγχο και σύγκριση εργαλειοθήκης με το baseline μοντέλο Simulink. Επαλήθευση ότι βασικά μεγέθη (WIP, παραγωγή, αξιοποίηση, ζήτηση) εξελίσσονται με συνεπή τρόπο και ότι η ασαφής πολιτική ελέγχου υλοποιείται ορθά στο νέο περιβάλλον.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulink: αρχείο .slx - FIS αρχεία: .fis, των ελεγκτών - Αντίστοιχο μοντέλο στην εργαλειοθήκη (γραμμή 3 μηχανών + fuzzy ελεγκτές) - Μέγιστος Ρυθμός παραγωγής 2 τεμ/χρ. Μον. για όλες τις μηχανές. - Χωρητικότητα αποθηκών ίση με 10 μονάδες για όλες τις αποθήκες. - Στοχαστική ζήτηση, γεωμετρική με πιθανότητα άφιξης πελάτη σε ένα

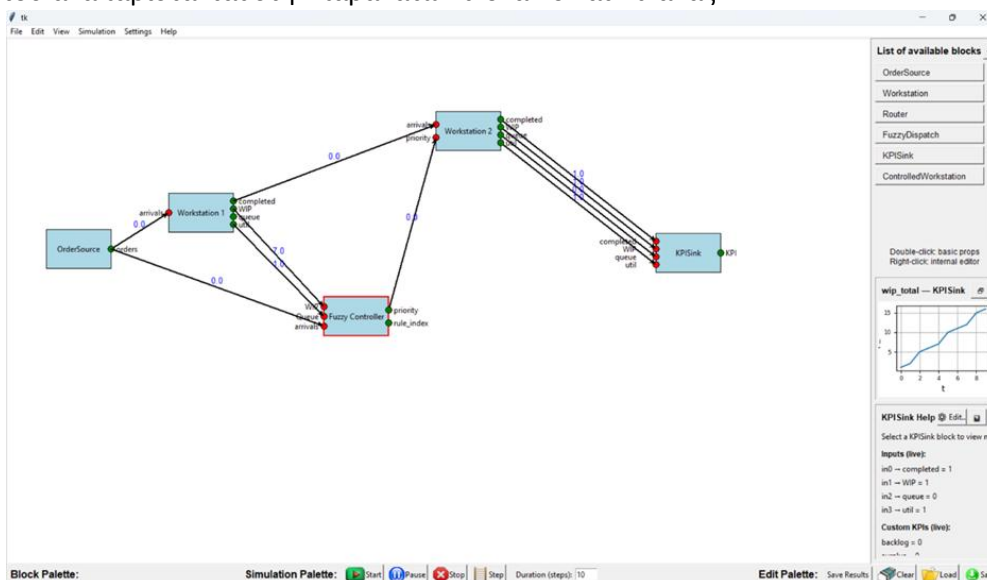
**Σενάριο 2 –
Ευρετική
πολιτική
κατωφλίου
(threshold-
based heuristic)**

Αξιολόγηση της δυνατότητας της εργαλειοθήκης να υλοποιεί ευρετικές/κανονιστικές πολιτικές ελέγχου μέσω ControlledWorkStation και FuzzyDispatch mblock. Σύγκριση απόδοσης heuristic vs fuzzy πολιτικής όσον αφορά επιλεγμένα KPIs (π.χ. WIP, ρυθμό παραγωγής, αξιοποίηση και «ηρεμία»/σταθερότητα γραμμής).

κύκλο 0.05 (μέση ζήτηση στην μονάδα του χρόνου 1 τεμ).

- Simulink: αρχείο .slx
- Αντίστοιχο μοντέλο στην εργαλειοθήκη με κανόνες if-then-else
- Κοινή βάση παραμέτρων (ρυθμοί, χωρητικότητες, ζήτηση) με το Σενάριο 1
- Μέγιστος Ρυθμός παραγωγής 2 τεμ/χρ. Μον. για όλες τις μηχανές.
- Χωρητικότητα αποθηκών ίση με 10 μονάδες για όλες τις αποθήκες.
- Στοχαστική ζήτηση, γεωμετρική με πιθανότητα άφιξης πελάτη σε ένα κύκλο 0.05 (μέση ζήτηση στην μονάδα του χρόνου 1 τεμ).

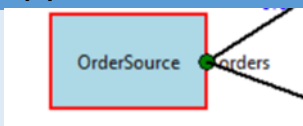
Σενάριο 0: Η σχεδίαση του δικτύου παραγωγής καθώς και οι επιμέρους παράμετροι των δομικών στοιχείων του αναπαρίστανται στην παρακάτω Εικόνα 20 και Πίνακας 11.



Εικόνα 20 Σχεδίαση ενός βασικού δικτύου παραγωγής για επαλήθευση λειτουργικότητας τεχνολογικής λύσης 8 (2 σταθμοί εργασίας – μηχανές, ένας ελεγκτής ασαφούς λογικής)

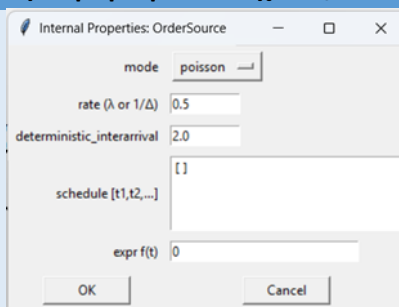
Πίνακας 11 Ρυθμίσεις παραμέτρων/σχεδίασης δομικών στοιχείων για την επαλήθευση λειτουργικότητας του σεναρίου 0

Περιγραφή



Μπλοκ «Ζήτησης»: επιλογή τυχαίας άφιξης (επιλέγεται η κατάλληλη παράμετρος από τα 4 πεδία προς συμπλήρωση που ταιριάζει στο επιλεγμένο είδος συνάρτησης «άφιξης» των παραγγελιών)

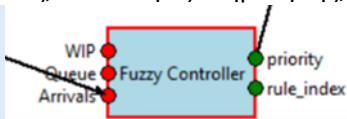
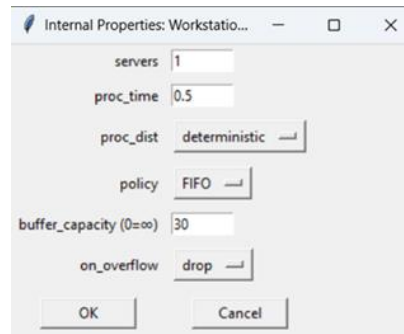
Ρύθμιση παραμέτρων στοιχείου/block



Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



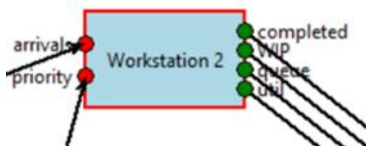
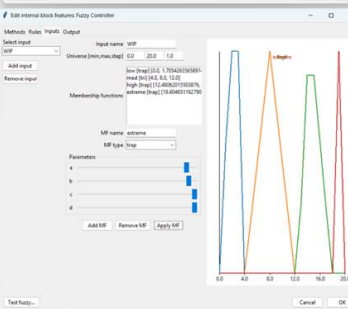
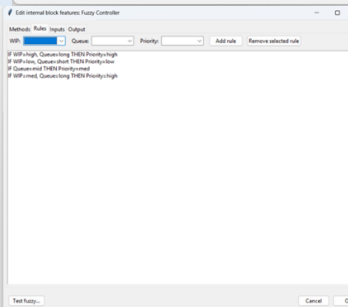
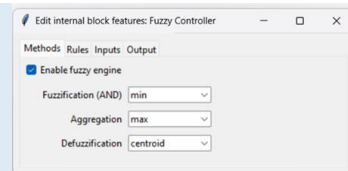
Σταθμός εργασίας – Μηχανή 1: 4 έξοδοι (ολοκληρωμένα προϊόντα, WIP, προϊόντα σε αναμονή, χρησιμοποιούμενα υλικά), εσωτερικές παράμετροι στοιχείου (καθορισμός χωρητικότητας, χρόνου επεξεργασίας, πολιτική εξυπηρέτησης, κ.α.)



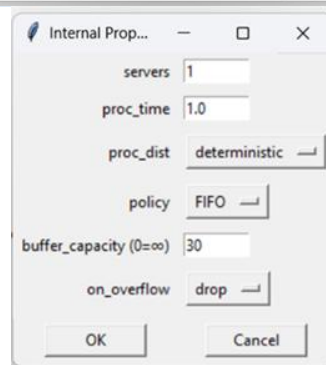
Καταμετρημένος ελεγκτής ασαφούς λογικής: Δέχεται ως είσοδο το WIP, τα προϊόντα σε αναμονή από την downstream μηχανή και την ζήτηση από το αρχικό μπλοκ και «στέλνει» την καθορισμένη πολιτική ελέγχου στην επόμενη μηχανή (upstream).

Οι εσωτερικές παράμετροι αφορούν σε:

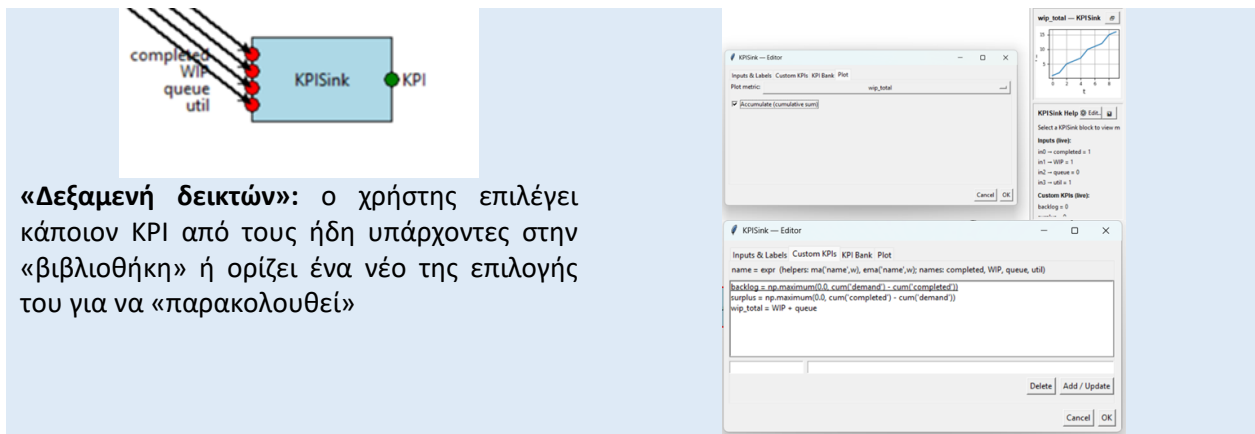
- Κανόνες ασαφοποίησης /αποασαφοποίησης
- Δυνατότητα ενεργοποίησης και προεπισκόπησης της λειτουργίας του ελεγκτή ασαφούς λογικής
- Τον καθορισμό των κανόνων που συνδέουν την είσοδο με την έξοδο
- Της συναρτήσεων συμμετοχής



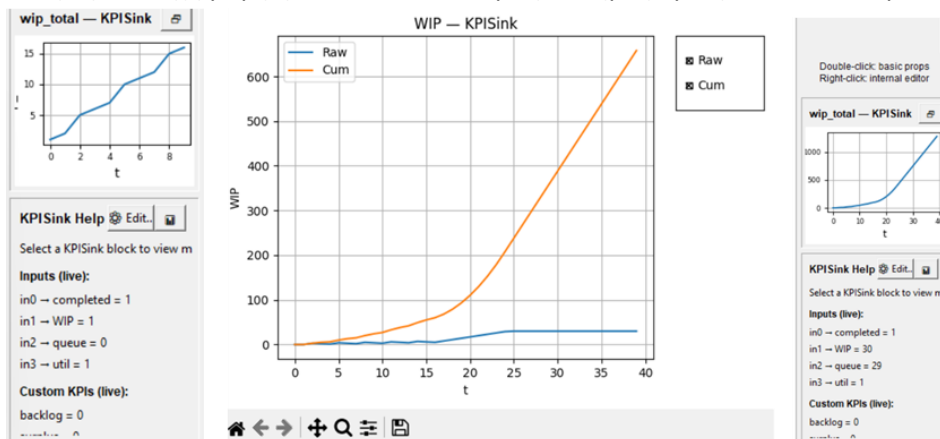
Σταθμός εργασίας – Μηχανή 1: 4 έξοδοι (ολοκληρωμένα προϊόντα, WIP, προϊόντα σε αναμονή, χρησιμοποιούμενα υλικά), εσωτερικές παράμετροι στοιχείου (καθορισμός χωρητικότητας, χρόνου επεξεργασίας, πολιτική εξυπηρέτησης, κ.α.)



Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



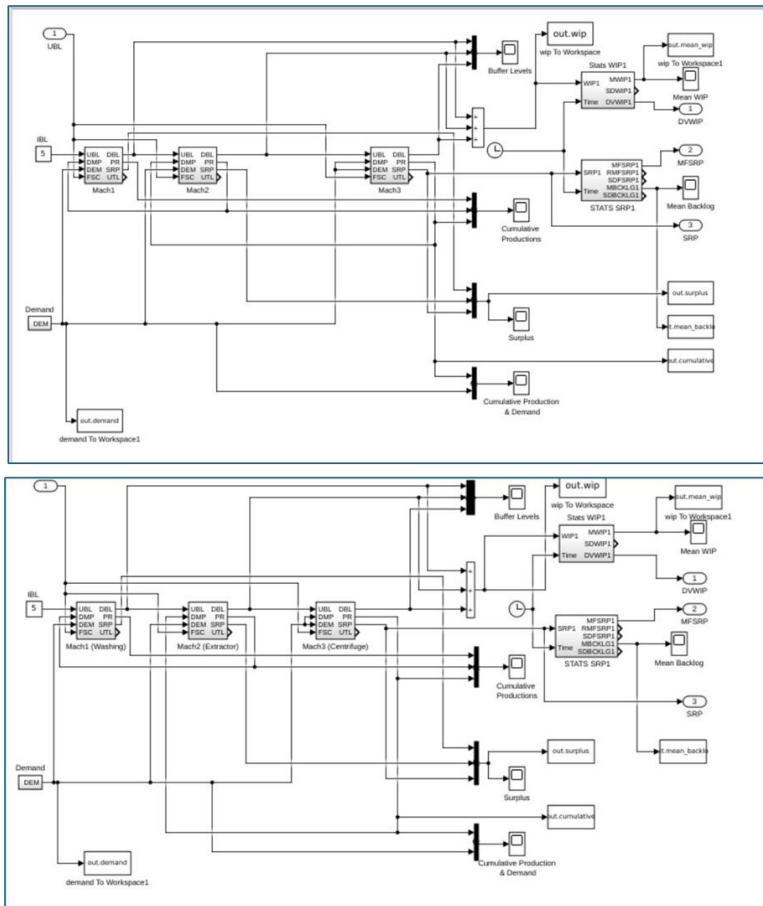
Η Εικόνα 21 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης για 40 χρονικές στιγμές, επιβεβαιώνοντας την συνεχή μορφή των δεικτών και ροή «πληροφορίας» από το ένα μπλοκ στο άλλο.



Εικόνα 21 Ενδεικτική απεικόνιση αποτελεσμάτων κατά την εκτέλεση του πιλοτικού σεναρίου 0.

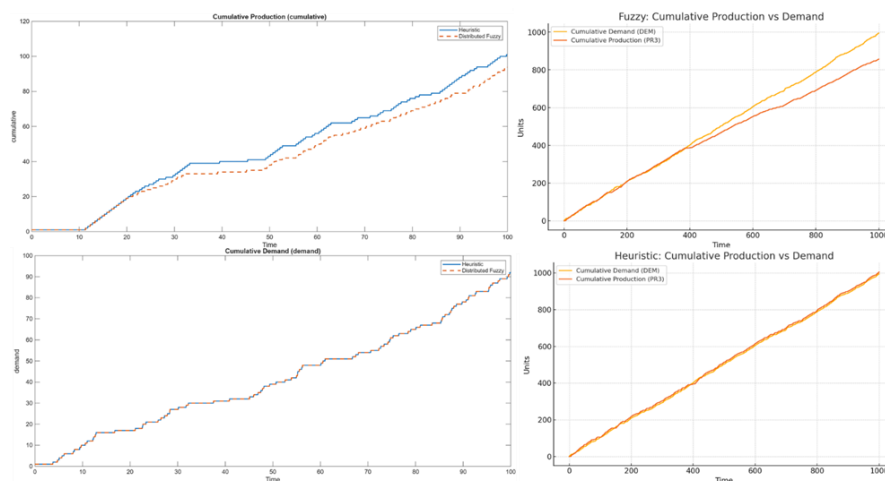
Η σχεδίαση του δικτύου παραγωγής (σε περιβάλλον Simulink) καθώς και οι επιμέρους παράμετροι των δομικών στοιχείων του για τα σενάρια δοκιμών 1 και 2 αναπαρίστανται στην παρακάτω Εικόνα 22 (πάνω και κάτω αντίστοιχα).

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 22 Σχεδίαση δικτύου παραγωγής (3 μηχανές σε σειρά) σε περιβάλλον Simulink για τα σενάρια δοκιμών 1 (πάνω – έλεγχος με ευρετική μέθοδο) και 2 (κάτω – έλεγχος με κατανεμημένο ελεγκτή ασαφούς λογικής)

Η Εικόνα 23 παραθέτει συγκριτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με κοινές παραμέτρους, αντιπαραβάλλοντας την έξοδο του συστήματος με χρήση της εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης παραγωγής που εφαρμόζεται στην τρέχουσα τεχνολογική λύση με το αποτέλεσμα προσομοίωσης της μεθοδολογίας αναφοράς (ground truth), δηλαδή το εμπορικό λογισμικό αναφοράς Simulink.



Εικόνα 23 Συγκριτική αναπαράσταση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης και προσομοίωσης δικτύου παραγωγής με χρήση του λογισμικού αναφοράς (εμπορικό λογισμικό Simulink, αριστερή στήλη) και της εργαλειοθήκης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της τεχνολογικής λύσης 8 (δεξιά στήλη)

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Παρατηρούμε ότι η χρήση της εργαλειοθήκης ανοιχτού λογισμικού επαληθεύει την έξοδο της ground-truth μεθοδολογίας και μάλιστα για το ίδιο απόλυτο χρονικό διάστημα προσομοίωσης (1 λεπτό) έχουμε “τρέξει” το σενάριο δεκαπλάσιες μονάδες χρόνου σε σχέση με τις δυνατότητες που προσφέρει το εμπορικό λογισμικό αναφοράς.

Η πιλοτική εφαρμογή με χρήση των σεναρίων fuzzy και heuristic έδειξε ότι η νέα εργαλειοθήκη σε Python μπορεί να αναπαράγει με συνέπεια τη συμπεριφορά της γραμμής παραγωγής που είχε αρχικά υλοποιηθεί σε Simulink, τόσο σε επίπεδο χρονικών σειρών όσο και σε συγκεντρωτικούς δείκτες. Με δεδομένη αυτή τη λειτουργική ισοδυναμία, η επιλογή της λύσης σε Python αντί της αποκλειστικής χρήσης Simulink αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς κόστους, επεκτασιμότητας, ανεξαρτησίας από εμπορικές άδειες και δυνατοτήτων για μελλοντική αξιοποίηση σε μεγαλύτερα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά πλεονεκτήματα της προσέγγισης με Python σε σχέση με την αρχική προσέγγιση που βασίζεται αποκλειστικά στο Simulink.

Πίνακας 12 Σύγκριση Simulink με την εργαλειοθήκη σε περιβάλλον Python για την εφαρμογή σε προγραμματισμό παραγωγής

Άξονας σύγκρισης	Προσέγγιση με Simulink (υφιστάμενο μοντέλο αναφοράς)	Προσέγγιση με εργαλειοθήκη Python (νέα λύση)	Σχόλιο / Πλεονέκτημα Python
Κόστος και άδειες χρήσης	Απαιτείται εμπορική άδεια Matlab/Simulink, συνήθως διαθέσιμη μόνο σε πανεπιστημιακά ή εταιρικά περιβάλλοντα.	Βασίζεται σε Python και open-source βιβλιοθήκες δεν απαιτείται εμπορική άδεια. Μπορεί να διανεμηθεί ως αυτόνομο .exe.	Μηδενικό licensing cost, ευκολότερη διάδοση σε ΜμΕ και εκπαιδευτικούς φορείς.
Ανοικτότητα – επεκτασιμότητα	Κλειστό οικοσύστημα, με δυνατότητα επεκτάσεων αλλά εντός του πλαισίου Matlab/Simulink.	Πλήρως ανοικτή αρχιτεκτονική (open-source), δυνατότητα χρήσης/ενσωμάτωσης τρίτων βιβλιοθηκών (π.χ. scikit-fuzzy, numpy, pandas, matplotlib).	Υψηλή επεκτασιμότητα και δυνατότητα προσαρμογής σε ειδικές ανάγκες χωρίς vendor lock-in.
Διανομή σε τελικούς χρήστες	Η εκτέλεση απαιτεί εγκατάσταση Matlab/Simulink σε κάθε σταθμό εργασίας ή χρήση ειδικών runtime licenses.	Η εργαλειοθήκη μπορεί να «πακεταριστεί» ως εκτελέσιμο (.exe) και να εγκατασταθεί σε οποιονδήποτε σταθμό με Windows χωρίς πρόσθετες άδειες.	Ευκολότερη διανομή σε βιομηχανικούς χρήστες, πιλοτικές εγκαταστάσεις και εκπαιδευόμενους.
Ενσωμάτωση σε υπάρχουσες ροές εργασίας	Ισχυρή ενοποίηση με τον κόσμο Matlab, αλλά πιο δύσκολη άμεση σύνδεση με Python-based analytics, web apps κ.λπ.	Φυσική ενσωμάτωση με Python οικοσύστημα (API, web services, data analytics, machine learning), ευκολία σύνδεσης με βάσεις δεδομένων, dashboards κ.λπ.	Καλύτερη βάση για μελλοντική ανάπτυξη υπηρεσιών (π.χ. web dashboards, cloud simulation, AI optimizers).

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Άξονας σύγκρισης	Προσέγγιση με Simulink (υφιστάμενο μοντέλο αναφοράς)	Προσέγγιση με εργαλειοθήκη Python (νέα λύση)	Σχόλιο / Πλεονέκτημα Python
Εκπαιδευτική / ακαδημαϊκή χρήση	Ιδανικό για μαθήματα που βασίζονται ήδη σε Matlab/Simulink, αλλά περιορισμός σε φοιτητές χωρίς άδειες εκτός εργαστηρίων.	Η Python είναι ήδη ευρέως διαδεδομένη σε φοιτητές/μηχανικούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προσωπικούς υπολογιστές χωρίς κόστος.	Ενισχύεται η διάχυση σε σπουδαστές και νέους μηχανικούς, δημιουργώντας μεγαλύτερη «κρίσιμη μάζα» χρηστών.
Μαζικές προσομοιώσεις και αυτοματοποίηση	Υποστηρίζεται αλλά συνήθως με πιο «βαρύ» workflow (scripts, toolboxes, licenses) και μικρότερη ευελιξία αυτοματοποίησης εκτός Matlab.	Εύκολη αυτοματοποίηση πολλαπλών επαναλήψεων, batch runs και πειραμάτων μέσω απλών Python scripts.	Κατάλληλο για ευρείας κλίμακας πειραματισμό (πολλά σενάρια, πολλές επαναλήψεις) χωρίς επιπλέον κόστος αδειών.
Εστίαση στην ευέλικτη/ανθεκτική παραγωγή	Γενικό εργαλείο προσομοίωσης· η λογική για ευέλικτη/ανθεκτική παραγωγή «χτίζεται» μέσα στα συγκεκριμένα μοντέλα του έργου.	Η εργαλειοθήκη έχει σχεδιαστεί εξ αρχής γύρω από έννοιες WIP, buffers, βλάβες, fuzzy/heuristic control και KPIs ευελιξίας/ανθεκτικότητας.	Εξειδικευμένο «domain-oriented» εργαλείο, πιο κοντά στη γλώσσα και τις ανάγκες του τελικού χρήστη.
Αξιοποίηση αποτελεσμάτων πιλότου	Πιλοτικά μοντέλα και κώδικας παραμένουν κυρίως σε Simulink format, δύσκολα επαναχρησιμοποιήσιμα εκτός Matlab.	Τα αποτελέσματα (CSV, scripts, μοντέλα Python) μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν απευθείας ως building blocks στην εργαλειοθήκη και σε άλλα Python projects.	Καλύτερη μετατρεψιμότητα του πιλοτικού σε «παραγωγική» λύση και βάση για νέα ερευνητικά/βιομηχανικά έργα.

2.9. Κυκλικές αλυσίδες αξίας μέσω διαχείρισης και παρακολούθησης δευτερογενών υλικών με χρήση ψηφιακών διδύμων και διαβατηρίων προϊόντων

Η συγκεκριμένη τεχνική λύση στοχεύει στο σχεδιασμό, ανάπτυξη και υλοποίηση ενός διασυνδεδεμένου ψηφιακού οικοσυστήματος για την αξιολόγηση και διαχείριση κυκλικών αλυσίδων αξίας στη μεταποιητική βιομηχανία. Η λύση αναπτύσσει και ενσωματώνει τρία βασικά, διασυνδεδεμένα εργαλεία: το PSM (Process Simulation & Monitoring Tool), το C-SBSC (Circular Sustainability Balanced Scorecard) και το DPP (Digital Product Passport – Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος), τα οποία λειτουργούν συνεργατικά. Τα τρία διασυνδεδεμένα αυτά εργαλεία, ακολουθώντας τη σειρά που αναφέρονται, στοχεύουν στην μοντελοποίηση της αλυσίδας και την δημιουργία του ψηφιακού διδύμου της, στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας μέσω επιλεγμένων δεικτών και την οπτικοποίησή των αποτελεσμάτων για άμεση διάδοση της πληροφορίας προς όλα τα εμπλεκόμενα μέρη της αλυσίδας. Στόχος είναι η βελτιωμένη διαχείριση της αλυσίδας, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας της βιομηχανίας και η ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας των παραγόμενων προϊόντων.

Το PSM βασίζεται στην τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων: λειτουργεί ως μηχανή προσομοίωσης των παραγωγικών διεργασιών και υπολογίζει τις ροές υλικών και ενέργειας δημιουργώντας ένα ακριβές ψηφιακό αντίγραφο/μοντέλο της αλυσίδας. Στη συνέχεια, μέσω του C-SBSC εισάγονται και υπολογίζονται επιλεγμένοι (από τη βιομηχανία) δείκτες βιωσιμότητας και κυκλικότητας. Καταλήγοντας, το DPP ενσωματώνει όλα τα παραγόμενα αποτελέσματα σε ένα διαδικτυακό εργαλείο που έχει στόχο να προάγει την διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα, δίνοντας πρόσβαση σε πληροφορία σχετιζόμενη με το παραγόμενο προϊόν σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς ή τα ενδιαφερόμενα μέρη – από τους παραγωγούς και τους συνεργάτες της βιομηχανίας έως τους καταναλωτές και το ευρύ κοινό.

Στο πλαίσιο της Ενότητας Εργασίας 2, παρουσιάστηκε η μεθοδολογία εφαρμογής των εργαλείων καθώς και τα βήματα σχεδιασμού και υλοποίησης της λύσης και των προαναφερόμενων εργαλείων υπό ένα γενικότερο πλαίσιο. Στο πλαίσιο της Ενότητας Εργασίας 3, η τεχνική λύση εφαρμόζεται πιλοτικά σε βιομηχανικά εργαστηριακά περιβάλλοντα, για να ελεγχθεί, αξιολογηθεί και επικυρωθεί η αποτελεσματικότητά της. Το παρόν παραδοτέο εστιάζει στην εφαρμογή της λύσης σε συγκεκριμένο βιομηχανικό περιβάλλον, ενώ τα αναλυτικά αποτελέσματα, η αξιολόγηση και η επικύρωση της λύσης θα παρουσιαστούν στο επόμενο παραδοτέο της Ενότητας 3, το Π3.2.

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Εργαλείο Προσομοίωσης και Παρακολούθησης Διεργασιών (PSM)

Το εργαλείο PSM έχει σχεδιαστεί και λειτουργεί ως ένα αυτόνομο εργαλείο (stand-alone), το οποίο μοντελοποιεί και προσομοιώνει βιομηχανικά, και όχι μόνο, συστήματα και περιβάλλοντα σε τρία επίπεδα: ατομική διεργασία, γραμμή παραγωγής και αλυσίδα αξίας (Πίνακας 13). Το εργαλείο παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να μετατρέπει κάθε διεργασία σε ένα λειτουργικό δομικό στοιχείο με διασυνδέσεις υλικών και ενεργειακών ροών, δημιουργώντας τελικά ένα ψηφιακό δίδυμο του φυσικού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους και χαρακτηριστικά της κάθε διεργασίας.

Πίνακας 13 Η ιεραρχική δομή του PSM εξασφαλίζει ότι η μοντελοποίηση είναι ταυτόχρονα λεπτομερής και ολιστική

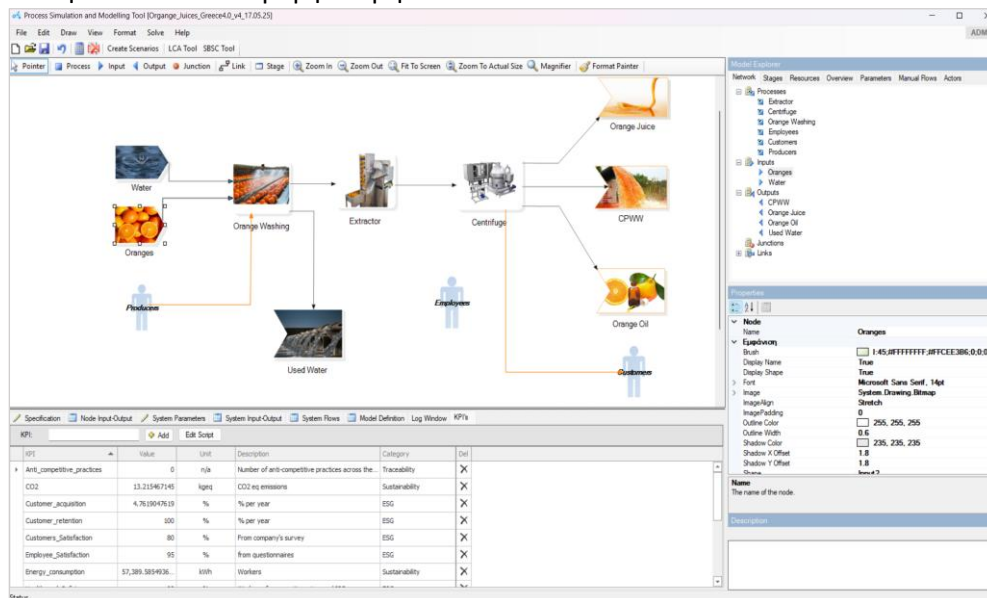
Επίπεδο Μοντελοποίησης	Περιγραφή
Μοντελοποίηση Ατομικής Διεργασίας	Ανάλυση μεμονωμένων διεργασιών παραγωγής. Ο χρήστης ορίζει τις εισροές/εκροές, κρίσιμες παραμέτρους και ροές υλικών/ενέργειας.
Μοντελοποίηση Γραμμής Παραγωγής	Ομαδοποίηση διεργασιών σε λειτουργικές μονάδες που διασυνδέονται μεταξύ τους. Ανάλυση αλληλεξαρτήσεων και δυνατότητα δοκιμής σεναρίων.
Συστημική Μοντελοποίηση Αλυσίδας Αξίας	Κάλυψη ολόκληρης της αλυσίδας αξίας με όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Ανάλυση σχέσεων, αλληλεπιδράσεων και αναδράσεων.

Συγκεκριμένα, ο χρήστης σχεδιάζει το μοντέλο οπτικά, ορίζοντας στάδια παραγωγής, τις διεργασίες που αυτές περιλαμβάνουν, εισροές/εκροές πόρων (π.χ., υλικά, ενέργεια, απόβλητα), τους εμπλεκόμενους φορείς κάθε διεργασίας, καθώς και παραμέτρους που ορίζουν το συνολικό σύστημα. Ο

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

επαναληπτικός αλγόριθμος του εργαλείου υπολογίζει τις ροές πόρων δυναμικά: μόλις οριστεί μία αναφορά ροής (manual flow), οι υπολογισμοί διαδίδονται στο δίκτυο, συμπληρώνοντας τις άγνωστες ροές μέσω σχέσεων εισόδου-εξόδου. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν πίνακες συστήματος εισόδων-εξόδων (συνολικές ροές εντός ορίων συστήματος) και αναλυτικές εκθέσεις ροών ανά διεργασία, παρουσιάζοντας επίσης καταναλώσεις και εκπομπές.

Στην Εικόνα 24 απεικονίζεται το περιβάλλον του εργαλείου PSM, με το κύριο μέρος του να είναι η περιοχή μοντελοποίησης (workspace), όπου εκεί ο χρήστης σχεδιάζει την εκάστοτε αλυσίδα παραγωγής που επιθυμεί να διερευνήσει ή δημιουργήσει το ψηφιακό της αντίγραφο, εισάγοντας τις επιμέρους διεργασίες ως δυναμικά nodes, στα οποία καθορίζει τις ροές, παραμέτρους και χαρακτηριστικά. Στο δεξιό άνω μέρος εμφανίζονται όλες οι επιμέρους διεργασίες της αλυσίδας, οι ροές εισόδου και εξόδου, οι διασυνδέσεις μεταξύ των διεργασιών που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία του φυσικού συστήματος, παρέχοντας στον χρήστη μία πλήρη εικόνα των περιεχομένων του συστήματος που εξετάζεται κάθε φορά. Στο κάτω μέρος, το πλαίσιο παραμέτρων αποτελείται από μία σειρά καρτελών όπως τα χαρακτηριστικά, τα nodes εισόδου/εξόδου, οι παράμετροι του συστήματος ή/και της εκάστοτε διεργασίας, οι ροές του συστήματος και το πεδίο εισαγωγής των KPIs. Σε κάθε μία από τις καρτέλες, η πληροφορία δύναται να εμφανίζεται είτε σε επίπεδο διεργασίας (αν ο χρήστης κάνει κλικ σε αυτήν) ή γενικότερα, σε επίπεδο συστήματος/αλυσίδας. Με αυτόν τον τρόπο, μέσω του PSM, το ακριβές μοντέλο της αλυσίδας δημιουργείται και μπορεί να παράξει πλήθος σεναρίων με την αναδιαμόρφωση/ αλλαγή/ αναπροσαρμογή παραμέτρων, δεδομένων ή χαρακτηριστικών, καθιστώντας την διαχείριση της αλυσίδας εύλικτη, προσιτή και εύκολα διαμορφώσιμη.



Εικόνα 24 Το περιβάλλον προσομοίωσης του εργαλείου PSM φιλοξενεί και το εργαλείο SBSC

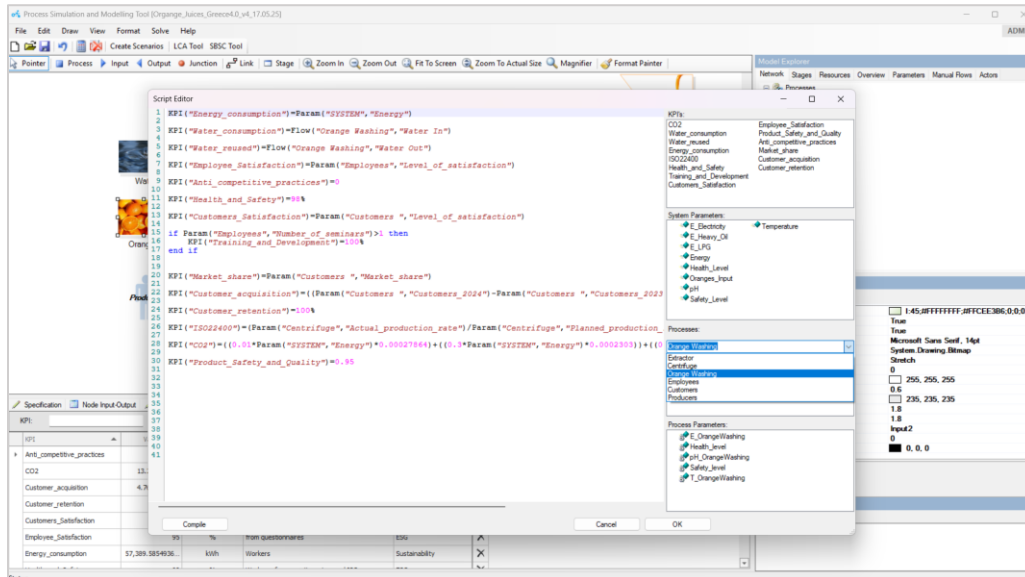
Circular Sustainability Balanced Scorecard (C-SBSC)

Το εργαλείο C-SBSC, αποτελεί ενσωματωμένο module στο PSM, καθώς ο στόχος του SBSC είναι να αξιολογήσει την κυκλικότητα της αλυσίδας μέσω επιλεγμένων KPIs, τα οποία θα έχουν προκύψει από το ακριβές ψηφιακό αντίγραφο της αλυσίδας, μέσω του μοντέλου PSM. Μία εκτενή λίστα από 72 προεπιλεγμένους δείκτες βιωσιμότητας (οικονομικούς, κοινωνικούς, περιβαλλοντικούς) και διακυβέρνησης, η ανάπτυξη της οποίας βασίζεται σε στοχευμένη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της EE2 και παρουσιάζεται στο παραδοτέο 2.1, είναι διαθέσιμη μέσω του C-SBSC.

Σε συνεργασία με την υπό εξέταση βιομηχανία, και λαμβάνοντας υπόψη τις προτεραιότητες και ανάγκες της, ο χρήστης εισάγει τα επιλεγμένα από την βιομηχανία KPI, για υπολογισμό. Το εργαλείο PSM, παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής και νέων KPIs, εάν κρίνεται απαραίτητο ή εάν η βιομηχανία το επιθυμεί, ενώ μέσω των script για τον υπολογισμό του κάθε δείκτη, μπορεί ο δείκτης αυτός να

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

υπολογιστεί μέσω μίας συγκεκριμένης διεργασίας, μέσω επιλεγμένων διεργασιών ή από το σύνολο των διεργασιών. Η ενσωμάτωση του C-SBSC στο PSM εγγυάται ότι οι δείκτες αντικατοπτρίζουν πάντα τις τρέχουσες συνθήκες λειτουργίας. Σε αντίθεση με στατικές μεθόδους, κάθε δείκτης μπορεί να συνδεθεί με συγκεκριμένες διεργασίες του PSM που ο χρήστης επιλέγει, παρουσιάζοντας στη συνέχεια τα αποτελέσματα των συντελεστών αίτιου-αποτελέσματος. Συνακόλουθα, η κατηγορία στην οποία ανήκει το κάθε KPI σημειώνεται σε αυτό το σημείο, έτσι ώστε στο Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος, το κάθε KPI, να εντάσσεται και εμφανίζεται αυτόματα στην κατηγορία του, όπως θα παρουσιαστεί στην επόμενη υποενότητα. (Εικόνα 25)



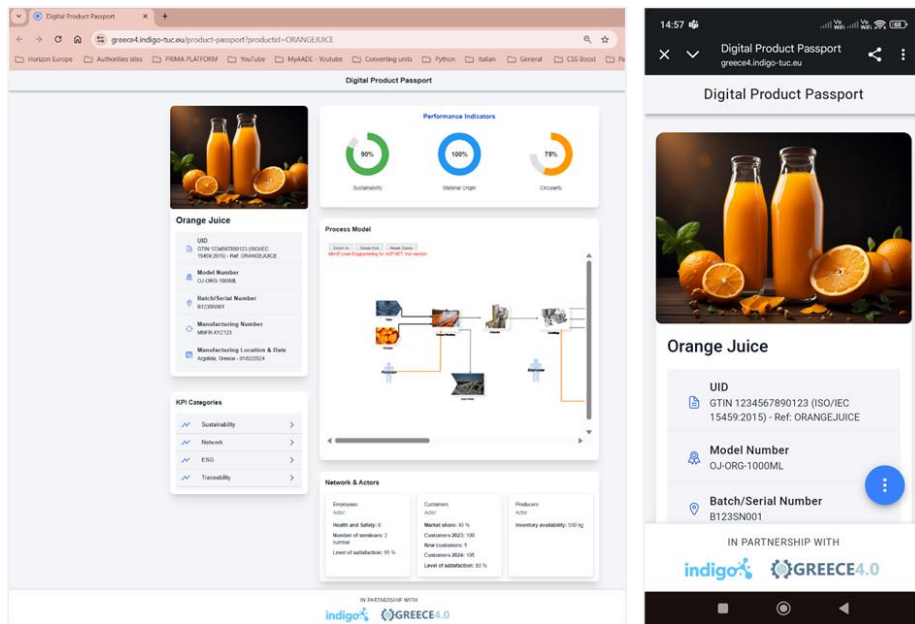
Εικόνα 25 Απεικόνιση υπολογισμού KPIs από το εργαλείο SBSC και εισαγωγή εξισώσεων στο script editor

Όλα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των δεικτών από το C-SBSC μπορούν να μεταφερθούν μέσω του PSM API στο Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος και να παρουσιαστούν με σαφή, άμεσο και εύκολο τρόπο σε κάθε ενδιαφερόμενο φορέα.

Πλατφόρμα Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP)

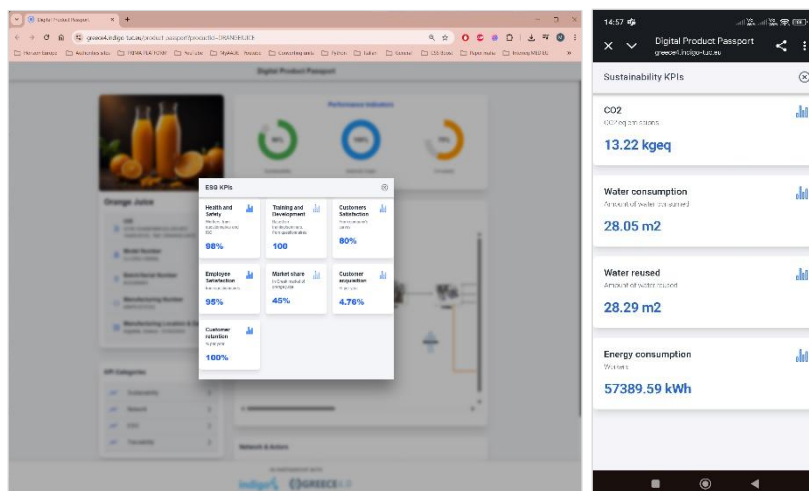
Το DPP συγκεντρώνει τα αποτελέσματα του PSM και του C-SBSC σε ένα διαδικτυακό περιβάλλον διαφάνειας και ιχνηλασιμότητας. Περιλαμβάνει στοιχεία ταυτοποίησης προϊόντος, σημαντικούς δείκτες απόδοσης, τα υπολογισμένα KPIs του C-SBSC ομαδοποιημένα ανά κατηγορία και το διάγραμμα ροών από το PSM (βλ. αναλυτικά Π2.1 & Π2.2). Τα αποτελέσματα είναι προσβάσιμα από την ψηφιακή πλατφόρμα του [DPP dashboard](#), η οποία είναι σχεδιασμένη για χρήση τόσο σε υπολογιστή όσο και σε κινητές συσκευές, που επιτρέπει ακόμα πιο εύκολη πλοήγηση στην πληροφορία. Μέσω του PSM API αντλούνται δεδομένα από το PSM σε πραγματικό χρόνο, με κάθε ενδιαφερόμενο φορέα να μπορεί να εστιάσει σε πληροφορίες που τους αφορούν. Ως τελικό στάδιο της λύσης, το DPP συνδέει την τεχνική μοντελοποίηση και αξιολόγηση με πρακτική εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο. (Εικόνα 26)

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



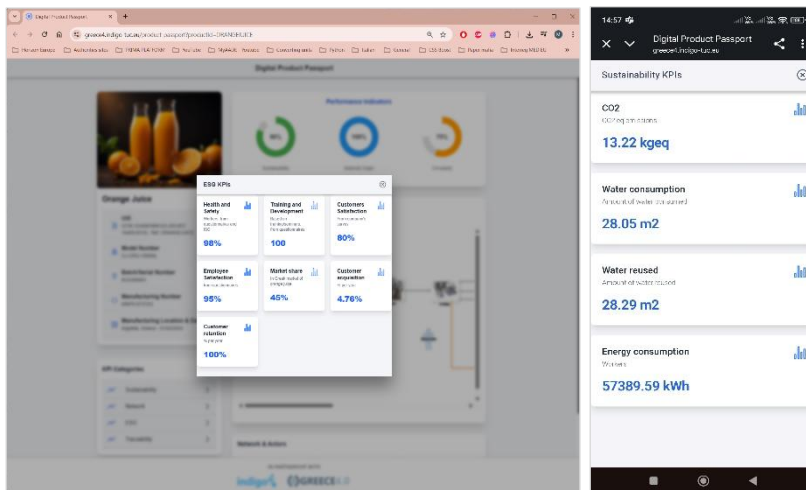
Εικόνα 26 Η πλατφόρμα Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος συνοψίζει τα αποτελέσματα της λύσης (αριστερά η απεικόνιση της πλατφόρμας σε οθόνη υπολογιστή, δεξιά η απεικόνιση σε κινητή συσκευή)

Το DPP απεικονίζει πληροφορίες για την προέλευση των πρώτων υλών του προϊόντος, βαθμολογία κυκλικότητας και βιωσιμότητας, την απεικόνιση της αλυσίδας μέσω του UI του PSM, καθώς και αποτελέσματα σε επιλεγμένους δείκτες σύμφωνα με τις προτιμήσεις της βιομηχανίας και τους στόχους της. Πιο συγκεκριμένα, στο κάτω αριστερό μέρος της Εικόνα 26 διακρίνεται ο πίνακας με τις κατηγορίες δεικτών: Βιωσιμότητα (Sustainability), ESG, Δίκτυο και Ιχνηλασιμότητα (Traceability). Ο χρήστης στην περίπτωση της εισόδου από υπολογιστή μπορεί να «κλικάρει» πάνω στην κάθε κατηγορία και να εμφανιστούν τα αποτελέσματα των κατηγοριοποιημένων δεικτών, υπολογισμένων μέσω του PSM, ενώ στην περίπτωση χρήσης από κινητό, επάνω στον μπλε κύκλο (



Εικόνα 27).

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 27 Το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος συνοψίζει και απεικονίζει τα αποτελέσματα της λύσης

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Ποιο είναι το πεδίο εφαρμογής της λύσης;

Η προτεινόμενη λύση έχει σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζει δια-τομεακή εφαρμογή, απευθυνόμενη σε κλάδους της μεταποιητικής βιομηχανίας, αλλά και γενικότερα, όπου η αποδοτικότητα πόρων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Παράλληλα, ανταποκρίνεται στις αυξανόμενες κανονιστικές απαιτήσεις που σχετίζονται με την κυκλικότητα και τη συμμόρφωση σε πρότυπα ESG, όπως η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία. Η λύση ενισχύει τη διαφάνεια στην εφοδιαστική αλυσίδα, προσφέροντας ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε τομείς όπου η ιχνηλασιμότητα δεδομένων αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία.

Σε ποιες περιπτώσεις είναι πολύτιμη η εφαρμογή της λύσης;

Η λύση αυτή αποκτά ιδιαίτερη αξία σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου η πολυπλοκότητα των διεργασιών, η πίεση για βιώσιμες/κυκλικές πρακτικές και η ανάγκη για διαφάνεια δημιουργούν αδιέξοδα:

- Όταν η παραγωγική αλυσίδα περιλαμβάνει πολλαπλά, διασυνδεδεμένα στάδια, και η παρακολούθηση των ροών υλικών ή ενέργειας γίνεται ανεξέλεγκτη. Η λύση προσφέρει μια ιεραρχική ματιά — από μεμονωμένες λειτουργίες/διεργασίες έως ολόκληρα δίκτυα — αποκαθιστώντας τον έλεγχο και εντοπισμό αδύναμων σημείων.
- Όταν οι κανονιστικές απαιτήσεις ή οι κοινωνικές προσδοκίες ωθούν προς κυκλικές πρακτικές ενός κλάδου ή βιομηχανίας, αλλά λείπουν τα εργαλεία για να μετρηθεί ή να επικοινωνηθεί αυτή η μετάβαση. Η μελέτη σεναρίων της αλυσίδας, ο υπολογισμός δεικτών και η δημιουργία ψηφιακών διαβατηρίων γίνεται κρίσιμη, τόσο για εσωτερική βελτίωση όσο και για εξωτερική νομιμοποίηση.
- Όταν η έλλειψη εμπιστοσύνης μεταξύ των διαφόρων φορέων της αλυσίδας αξίας (π.χ., προμηθευτές, παραγωγοί, καταναλωτές) εμποδίζει τη συνεργασία. Το σύστημα λειτουργεί ως αμερόληπτος διαμεσολαβητής, παρέχοντας επαληθεύσιμα δεδομένα σε όλους, μειώνοντας την άνηση πληροφόρησης και διευκολύνοντας συλλογικές πρωτοβουλίες.
- Όπου η ανάγκη για ευελιξία και πρόληψη είναι ζωτικής σημασίας, ιδιαίτερα σε περιόδους διαταραχών (π.χ., έλλειψη πρώτων υλών, αλλαγές κανονισμών). Η δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών σεναρίων και η παρακολούθηση των επιπτώσεων τους σε πραγματικό χρόνο διευκολύνει στη λήψη αποφάσεων πριν από την εφαρμογή τους.

Ποια είναι τα δυνατά σημεία των εργαλείων που ενσωματώνει η λύση?

Εργαλείο

Βασικά Πλεονεκτήματα

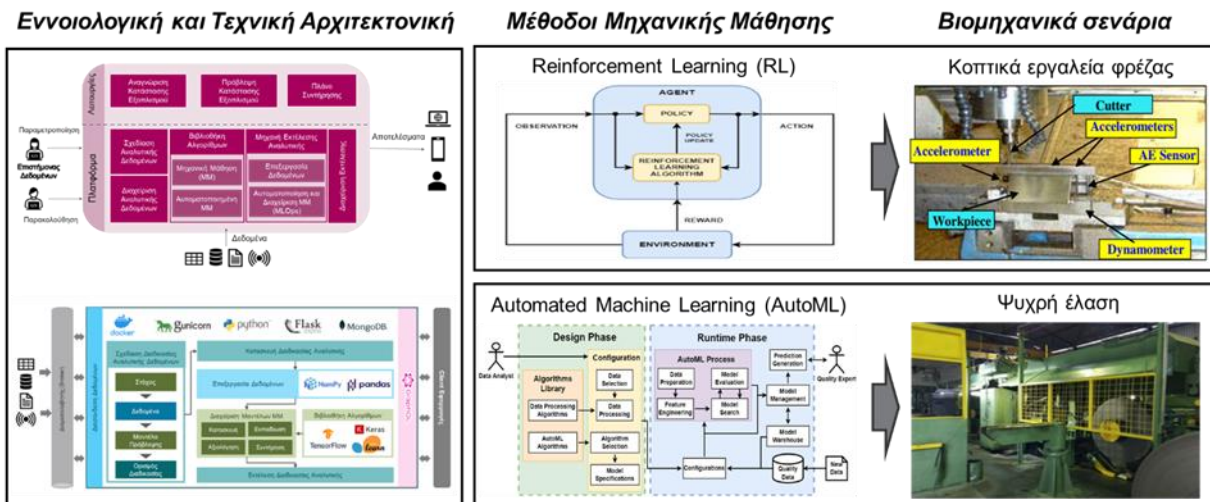
Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

PSM	<ul style="list-style-type: none">- Ιεραρχική μοντελοποίηση: Από μεμονωμένες διεργασίες έως ολόκληρες αλυσίδες αξίας, με δυνατότητα εστίασης σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας.- Πιστότητα ψηφιακού διδύμου: Το πλαίσιο Material Flow Networks (MFN) αναπαριστά πιστά τις ροές υλικών, ενέργειας και αποβλήτων, ακόμη και σε πολύπλοκα συστήματα.- Προσαρμοστικότητα: Ο αλγόριθμος επιλύει δυναμικά άγνωστες ροές όταν τα δεδομένα αναφοράς είναι ελλιπή/περιορισμένα.
C-SBSC	<ul style="list-style-type: none">- Ολοκληρωμένη ενσωμάτωση δεικτών (KPIs): 72 προκαθορισμένοι δείκτες καλύπτουν τους πυλώνες ESG, με δυνατότητα εξατομίκευσης για κάθε κλάδο.- Σύνδεση σε πραγματικό χρόνο: Άμεση ενσωμάτωση δεδομένων από το PSM εξασφαλίζει ότι οι δείκτες αντικατοπτρίζουν τις λειτουργικές μεταβολές.
DPP	<ul style="list-style-type: none">- Διαφάνεια για όλους: Συμπεριληπτική και ευανάγνωστη παρουσίαση δεδομένων που αφορούν κάθε ενδιαφερόμενο μέρος.- Διαλειτουργικότητα: Το API αντλεί δεδομένα από PSM/C-SBSC και υποστηρίζει ενσωμάτωση με τρίτα συστήματα (π.χ., ERP, IoT).

2.10^α. Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Το σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων έχει υλοποιηθεί ως μια αυτόνομη εφαρμογή που ενσωματώνει Reinforcement Learning (RL) και Automated Machine Learning (AutoML), και αξιολογείται σε δύο σενάρια χρήσης για την πρόβλεψη της κατάστασης υγείας βιομηχανικού εξοπλισμού: (1) κοπτικά εργαλεία φρέζας, (2) ψυχρή έλαση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28 Επισκόπηση της λύσης προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

Η προσφερόμενη λύση είναι containerized με Docker και docker-compose, περιλαμβάνοντας τις απαραίτητες υπηρεσίες και διευκολύνοντας την ανάπτυξη των στοιχείων. Για να αποσυνδέσουμε περαιτέρω την ανάπτυξη σε περιβάλλον ανάπτυξης από την ανάπτυξη σε περιβάλλον παραγωγής, έχουμε εξετάσει δύο διαμορφώσεις ανάπτυξης Docker. Για να είναι δυνατή η ανάπτυξη της εφαρμογής Flask σε περιβάλλον παραγωγής, η διαμόρφωση ανάπτυξης παραγωγής βασίζεται στον Gunicorn ("Green Unicorn"), έναν HTTP διακομιστή Python Web Server Gateway Interface (WSGI), ο οποίος επιτρέπει μια γρήγορη, ελαφριά και απλή υλοποίηση που υποστηρίζει πολυάριθμους εργαζόμενους. Επιπλέον, η αποθήκευση δεδομένων της προτεινόμενης υλοποίησης βασίζεται στο MongoDB και στη βιβλιοθήκη Mongoengine και pymongo. Η υπηρεσία του βασικού στοιχείου και η υπηρεσία mongoDB είναι και οι δύο παραμετροποιήσιμες (π.χ. διαπιστευτήρια βάσης δεδομένων και λεπτομέρειες σύνδεσης) μέσω μεταβλητών στη ρύθμιση του Docker compose.

Η υλοποίηση βασίζεται σε μια τεχνολογική στοίβα επικεντρωμένη στη γλώσσα Python, χρησιμοποιώντας διάφορες βιβλιοθήκες και πλαίσια για την εφαρμογή Ενισχυτικής Μάθησης και Αυτοματοποιημένης Μηχανικής Μάθησης. Οι κύριες βοηθητικές βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται για γενικές εργασίες περιλαμβάνουν τη NumPy για αριθμητικούς υπολογισμούς και διαχείριση πινάκων, την Pandas για επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε μορφή πίνακα, και τη Matplotlib για οπτικοποίηση δεδομένων. Η βιβλιοθήκη Pandas (έκδοση 2.0.3) χρησιμοποιήθηκε για το χειρισμό και την ανάλυση των δεδομένων, επιτρέποντας την αποδοτική διαχείριση μεγάλων συνόλων δεδομένων. Η βιβλιοθήκη Scikit-learn (sklearn) (έκδοση 1.3.2) διευκόλυνε εργασίες όπως η κλιμάκωση των δεδομένων, ο διαχωρισμός του συνόλου δεδομένων και ο υπολογισμός μετρικών αξιολόγησης, παρέχοντας εργαλεία για την προετοιμασία των δεδομένων και την αξιολόγηση των μοντέλων.

Για την Ενισχυτική Μάθηση χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη Stable Baselines 3. Η Stable Baselines 3 βασίζεται στη βιβλιοθήκη OpenAI Baselines και είναι χτισμένη πάνω στο πλαίσιο PyTorch, προσφέροντας ένα ευρύ φάσμα εργαλείων που διευκολύνουν την ανάπτυξη και ανάπτυξη μοντέλων Ενισχυτικής Μάθησης. Η βιβλιοθήκη διαθέτει ένα API που απλοποιεί τη ρύθμιση, εκπαίδευση και αξιολόγηση RL μοντέλων. Επιπλέον, παρέχει διάφορα βοηθητικά εργαλεία για τον έλεγχο περιβαλλόντων, τη διαχείριση περιβαλλόντων με διανυσματική μορφή, την αξιολόγηση πολιτικών και την απεικόνιση αποτελεσμάτων,

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

διευκολύνοντας τη διαδικασία ανάπτυξης RL. Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας κατασκευής, ρύθμισης και βελτιστοποίησης μοντέλων, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής πλαίσια AutoML: TPOT, AutoGluon, AutoKeras, H2O, AutoSklearn, FastAI και MLjar.

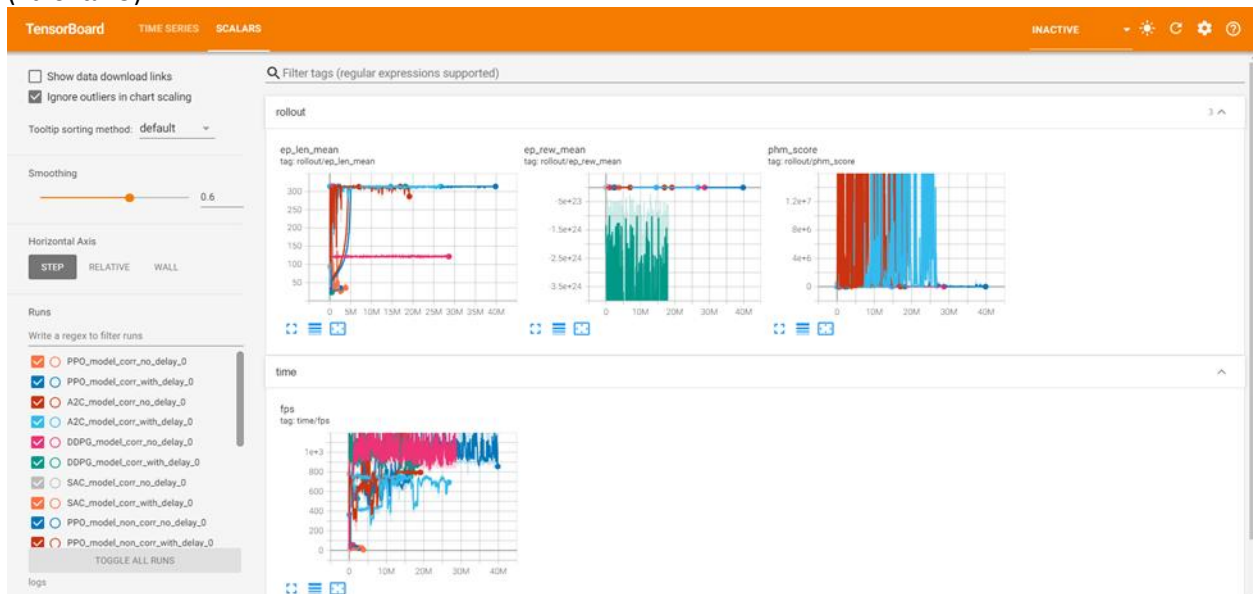
Για την υποστήριξη λειτουργιών συστήματος αρχείων, το έργο χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη os για αλληλεπίδραση με το λειτουργικό σύστημα και τη βιβλιοθήκη Pathlib για αντικειμενοστραφή διαχείριση διαδρομών αρχείων. Περιλαμβάνεται επίσης η βιβλιοθήκη time για τη διαχείριση λειτουργιών σχετικών με τον χρόνο και τη μέτρηση του χρόνου εκτέλεσης. Για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την οπτικοποίηση μετρικών εκπαίδευσης του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε το TensorBoard. Το TensorBoard είναι ένα εργαλείο οπτικοποίησης που περιλαμβάνεται στο TensorFlow και έχει σχεδιαστεί για να βοηθά τους χρήστες να κατανοούν και να εσφαλματώνουν μοντέλα μηχανικής μάθησης. Επιτρέπει την οπτικοποίηση διαφόρων μετρικών εκπαίδευσης και παρέχει πληροφορίες για την απόδοση του μοντέλου, βοηθώντας στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Το TensorBoard λειτουργεί μέσω μιας διαδικασίας καταγραφής κατά την εκπαίδευση του μοντέλου. Η διεπαφή χρήστη του TensorBoard περιλαμβάνει διάφορους πίνακες ελέγχου και εργαλεία για λεπτομερή παρακολούθηση και ανάλυση της εκπαίδευσης του μοντέλου. Ο Πίνακας Ελέγχου «Scalars» εμφανίζει γραφήματα με μετρικές όπως η μέση ανταμοιβή και το μέσο μήκος επεισοδίου σε βάθος χρόνου, χρήσιμες για την παρακολούθηση της βελτίωσης του μοντέλου σε σχέση με τις επαναλήψεις εκπαίδευσης. Η καρτέλα «Time Series» στο TensorBoard επιτρέπει πιο λεπτομερή εξέταση των μετρικών με την πάροδο του χρόνου, προσφέροντας εις βάθος εικόνα για το πώς μεταβάλλονται συγκεκριμένες τιμές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε μια Amazon EC2 C7g υπολογιστική μονάδα, η οποία βασίζεται στους επεξεργαστές AWS Graviton3 αρχιτεκτονικής Arm. Οι συγκεκριμένες μονάδες είναι βελτιστοποιημένες για υπολογιστικά εντατικά φορτία εργασίας και διαθέτουν προηγμένες προδιαγραφές. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, c7g.xlarge, προσφέρει 4 εικονικούς επεξεργαστές (vCPUs) και 8 GB μνήμης RAM. Επιπλέον, αξιοποιεί μνήμη τύπου DDR5.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Η λύση αξιολογείται σε 2 σενάρια χρήσης για την πρόβλεψη της κατάστασης υγείας του εξοπλισμού: η μέθοδος που βασίζεται στην Ενισχυτική Μάθηση αξιολογείται σε μια εφαρμογή κοπτικών εργαλείων φρέζας, ενώ η μέθοδος που βασίζεται στην Αυτοματοποιημένη Μηχανική Μάθησης σε μια εφαρμογή ψυχρής έλασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους χρήστες μέσω της διεπαφής στο Tensorboard (Εικόνα 29).

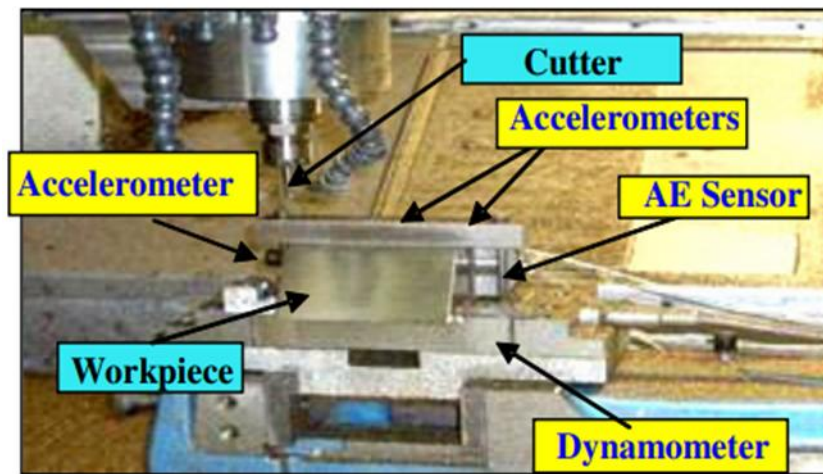


Εικόνα 29 Διεπαφή συστήματος αναλυτικής δομένων με Tensorboard

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Σενάριο χρήσης σε κοπτικά εργαλεία φρέζας

Το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των μοντέλων προέρχεται από την πρόκληση δεδομένων του Συνεδρίου της PHM Society του 2010⁸. Προήλθε από μια ταχυκίνητη CNC φρέζα, η οποία χρησιμοποιούσε κόπτες από καρβίδιο βολφραμίου με ημισφαιρική κεφαλή διαμέτρου 6mm, και στηρίχθηκε σε αισθητήρες δυναμομέτρου, επιταχυνσιόμετρου και εκπομπής ακουστικών κυμάτων (Εικόνα 30). Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει 6 μεμονωμένα αρχεία κοπτικών εργαλείων, από c1 έως c6. Τα αρχεία c1, c4 και c6 χρησιμοποιούνται για εκπαίδευση, ενώ τα c2, c3 και c5 για δοκιμή. Κάθε αρχείο εκπαίδευσης περιλαμβάνει ένα αρχείο "wear", που καταγράφει τη φθορά μετά από κάθε κοπή σε μονάδες 10^{-3} mm, καθώς και έναν φάκελο με 315 μεμονωμένα αρχεία συλλογής δεδομένων (ένα για κάθε κοπή). Τα αρχεία συλλογής δεδομένων είναι σε μορφή .csv, με επτά στήλες που αντιστοιχούν σε: Δύναμη (N) στις διαστάσεις X, Y και Z, Δόνηση (g) στις διαστάσεις X, Y και Z, και AE-RMS (V). Η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού ήταν 10400 RPM, η ταχύτητα προώθησης 1555 mm/min, το βάθος κοπής στον άξονα Y (ακτινικά) ήταν 0.125 mm, ενώ στον άξονα Z (αξονικά) ήταν 0.2 mm. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν με ρυθμό 50 KHz/κανάλι.



Εικόνα 30 Η ταχυκίνητη CNC φρέζα με τους εγκατεστημένους αισθητήρες της

Σενάριο χρήσης στην ψυχρή έλαση

Η ψυχρή έλαση είναι μια κατασκευαστική διαδικασία που περιλαμβάνει τη διαμόρφωση μετάλλου μέσω ζεύγους περιστρεφόμενων μεταλλικών κυλίνδρων, με σκοπό τη μείωση της διατομής ή τη μορφοποίηση του μεταλλικού τεμαχίου κάτω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης. Οι περιστρεφόμενες μηχανές ανήκουν σε μία από τις πιο κοινές κατηγορίες μηχανών. Τα βασικά εξαρτήματα του σταθμού έλασης περιλαμβάνουν:

1. τους κυλίνδρους εργασίας (work rolls), που εκτελούν την ίδια την έλαση έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό πλάτος,
2. τους εφεδρικούς κυλίνδρους (backup rolls), που μεταδίδουν την κίνηση στους κυλίνδρους εργασίας, και
3. τη μονάδα κινητήρα (motor unit), που υποστηρίζει την περιστροφή των εφεδρικών κυλίνδρων.

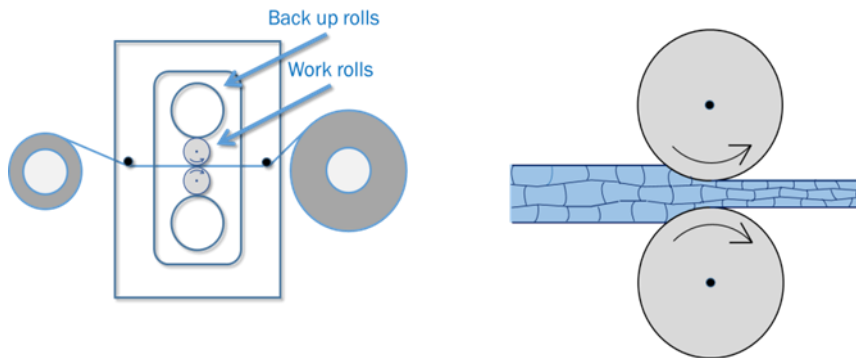
Η Εικόνα 31 απεικονίζει τη μονάδα ψυχρής έλασης υπό εξέταση από μια Ελληνική βιομηχανία, καθώς και τις εμπρόσθιες και οπίσθιες όψεις των κυλίνδρων μαζί με τους εγκατεστημένους αισθητήρες. Η Εικόνα 32 παρουσιάζει ένα διάγραμμα της διαδικασίας ψυχρής έλασης, καθώς και τη διαδικασία παραμόρφωσης και μείωσης του μεγέθους των κόκκων του μετάλλου.

⁸ Li, X. (2021). 2010 PHM Society Conference Data Challenge. IEEE Dataport. <https://dx.doi.org/10.21227/jdxd-yy51>.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 31 Η μονάδα ψυχρής έλασης, η εμπρόσθια όψη των κυλίνδρων, και η οπίσθια όψη των κυλίνδρων



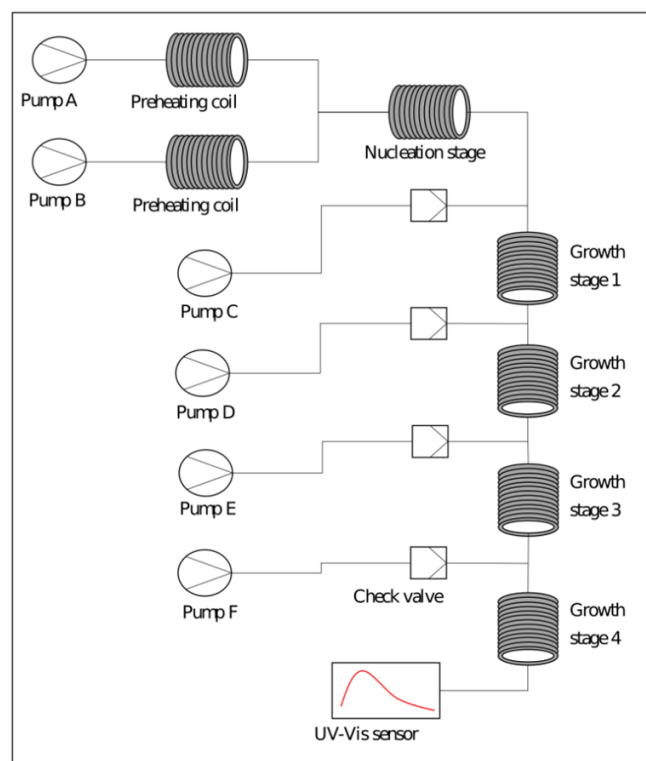
Εικόνα 32 Απεικόνιση της διαδικασίας ψυχρής έλασης στη μονάδα έλασης και της διαδικασίας παραμόρφωσης και μείωσης του μεγέθους των κόκκων

2.10^β. Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικού ελέγχου

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η προτεινόμενη λύση προσφέρει μια ολοκληρωμένη εργαλειοθήκη για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση συστημάτων αυτόματου ελέγχου με χρήση μη γραμμικού ελεγκτή προβλεπτικού μοντέλου (Model Predictive Controller, MPC) σε βιομηχανικό περιβάλλον, αξιοποιώντας δεδομένα πεδίου και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων. Η επικοινωνία με τις βιομηχανικές διατάξεις υποστηρίζεται μέσω συμβατών πρωτοκόλλων πεδίου, ενώ μέσω διεπαφής χρήστη παρέχεται η δυνατότητα παραμετροποίησης του ελεγκτή, οπτικοποίησης των μεταβλητών του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, και πρόσβασης σε ιστορικά δεδομένα λειτουργίας.

Η πιστοποίηση της λειτουργίας της πλατφόρμας πραγματοποιήθηκε σε ένα εικονικό σύστημα παραγωγής νανοσωματιδίων αργύρου (Ag), για το οποίο έχει αναπτυχθεί λεπτομερές δυναμικό μοντέλο διαφορικών εξισώσεων σε περιβάλλον MATLAB. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 33, το σύστημα παραγωγής αποτελείται από πέντε αντιδραστήρες εμβολικής ροής (plug flow reactor, PFR), συνδεδεμένων σε σειρά, με τον καθένα βυθισμένο σε λουτρό σταθερής θερμοκρασίας. Στον πρώτο αντιδραστήρα τροφοδοτούνται διαλύματα AgNO_3 και των αναγωγικών μέσων, κιτρικού νατρίου (sodium citrate, SC) και ταννικού οξέος (tannic acid, TA), ώστε να ξεκινήσει η πυρηνογένεση των νανοσωματιδίων και στους επόμενους αντιδραστήρες, προστίθεται επιπλέον διάλυμα AgNO_3 , επιτρέποντας την ανάπτυξη του κρυσταλλικού πλέγματος. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ποιότητας της παραγωγής, το σύστημα ελέγχου επιχειρεί να ρυθμίσει τη μέση διάμετρο των παραγόμενων νανοσωματιδίων χρησιμοποιώντας τις ροές τροφοδοσίας των εισερχόμενων διαλυμάτων στους πέντε αντιδραστήρες ως μεταβλητές εκ χειρισμού. Οι συγκεντρώσεις των αντίστοιχων διαλυμάτων λαμβάνονται υπόψη στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ως μη μετρήσιμες διαταραχές, τις οποίες ο ελεγκτής δεν μπορεί να προβλέψει, αλλά δύναται να ανιχνεύσει την επίδραση τους μέσω μη αναμενόμενων αλλαγών στην ανατροφοδότηση των σημάτων από τη διεργασία.



Εικόνα 33 Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής νανοσωματιδίων

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14) συγκεντρώνονται οι μεταβλητές του συστήματος, η κατηγοριοποίηση τους ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος αυτόματου ελέγχου και η ονομασία τους στα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν κατά την επίδειξη λειτουργίας της λύσης.

Πίνακας 14 Κατηγοριοποίηση μεταβλητών συστήματος με βάση τον ρόλο τους στο σχήμα ελέγχου

	Μεταβλητές εκ χειρισμού	Ρυθμιζόμενη Μεταβλητή	Μη μετρήσιμες διαταραχές
Περιγραφή Ρόλου στο Σχήμα Ελέγχου	Ο ελεγκτής τις χειρίζεται μέσω των σημάτων ελέγχου, έχοντας γνώση της επίδρασης τους μέσω του προβλεπτικού μοντέλου.	Ο ελεγκτής προσπαθεί να την οδηγήσει στην επιθυμητή τιμή στόχο με βάση την προβλεπτική του ικανότητα και το σήμα ανατροφοδότησης.	Ο ελεγκτής προσπαθεί να απορρίψει την επίδραση τους στο σύστημα, χωρίς να γνωρίζει με ποιον τρόπο επηρεάζουν την έξοδο.
Χαρακτηρισμός μεταβλητών στο Σύστημα	Ογκομετρικές ροές διαλυμάτων τροφοδοσίας	Μέση διάμετρος παραγόμενων νανοσωματιδίων	Συγκεντρώσεις διαλυμάτων τροφοδοσίας
Ονόματα μεταβλητών στα Γραφήματα	<ul style="list-style-type: none"> - Flow Rate of AgNO₃ in PFR#1 - Flow Rate of AgNO₃ in PFR #2 - Flow Rate of AgNO₃ in PFR #3 - Flow Rate of AgNO₃ in PFR #4 - Flow Rate of AgNO₃ in PFR #5 - Flow Rate of SC/TA in PFR #1 	<ul style="list-style-type: none"> Mean Diameter of Produced Ag NPs 	<ul style="list-style-type: none"> - SC concentration in PFR #1 - TA concentration in PFR #1

Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων:

Η πιλοτική εγκατάσταση της εν λόγω τεχνολογικής λύσης προϋποθέτει σε πρώτο στάδιο τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων πεδίου (raw data) με στόχο την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου ακτινικής βάσης (Radial Basis Function Neural Network, RBFNN) που θα αποτελέσει το προβλεπτικό μοντέλο του ελεγκτή MPC. Με βάση την επιλεγμένη αρχιτεκτονική του δικτύου, τα δεδομένα εκπαίδευσης (training data) θα πρέπει να εμπεριέχουν παρελθοντική πληροφορία με τη μορφή χρονοσειρών, και το προβλεπτικό μοντέλο θα πρέπει να αποτυπώνει την επίδραση των μεταβλητών εκ χειρισμού (ροές τροφοδοσίας) στη ρυθμιζόμενη μεταβλητή (μέση διάμετρος παραγόμενων νανοσωματιδίων Ag). Καθώς οι διαταραχές είναι μη μετρήσιμες, η επιρροή των συγκεντρώσεων στη μέση διάμετρο δεν ενσωματώνεται σαν πληροφορία στο προβλεπτικό μοντέλο.

Στη συγκεκριμένη πιλοτική εφαρμογή τα δεδομένα πεδίου συλλέγονται από το μοντέλο προσομοίωσης στο MATLAB, διενεργώντας ταυτόχρονες βηματικές επιβολές στις μεταβλητές εκ χειρισμού, σταθερής χρονικής διάρκειας, και καταγράφοντας την απόκριση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής συναρτήσει του χρόνου. Τα δεδομένα πεδίου που προκύπτουν από το περιβάλλον της προσομοίωσης στη συνέχεια αποθηκεύονται σε αρχείο με προεκτάσεις .xls, .xlsx, ή .csv, φροντίζοντας έτσι ώστε η πρώτη στήλη να αφορά τον χρόνο και οι επόμενες στήλες να παρουσιάζουν κατά σειρά τις εισόδους (μεταβλητές εκ χειρισμού) και τις εξόδους (ρυθμιζόμενες μεταβλητές) του συστήματος κλειστού βρόχου. Στην Εικόνα 34 φαίνεται η απαιτούμενη ονομασία των στηλών με τη μορφή «Είσοδος/Έξοδος (αριθμός): Ονομασία μεταβλητής (μονάδες μέτρησης)».

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Time (min)	Input 1: Ag Flow Rate in PFR #1 (uL/min)	Input 2: Ag Flow Rate in PFR #2 (uL/min)	Input 3: Ag Flow Rate in PFR #3 (uL/min)	Input 4: Ag Flow Rate in PFR #4 (uL/min)	Input 5: Ag Flow Rate in PFR #5 (uL/min)	Input 6: SC/TA Flow Rate in PFR #1 (uL/min)	Output 1: Mean Diameter of produced Ag NPs (nm)
2	0	1020	1020	1020	1020	1020	1020	62.98050017
3	1	697.7563764	855.0832367	1120.636977	401.3780912	624.7897499	1598.922246	62.9803998
4	2	697.7563764	855.0832367	1120.636977	401.3780912	624.7897499	1598.922246	61.44986125
5	3	697.7563764	855.0832367	1120.636977	401.3780912	624.7897499	1598.922246	60.80386599
6	4	697.7563764	855.0832367	1120.636977	401.3780912	624.7897499	1598.922246	57.94007845
7	5	697.7563764	855.0832367	1120.636977	401.3780912	624.7897499	1598.922246	58.10877659

Εικόνα 34 Προεπισκόπηση αρχείου .xlsx με την κατάλληλη αναπαράσταση των δεδομένων πεδίου

Εκπαίδευση προβλεπτικού μοντέλου:

Αφού ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων πεδίου, ακολουθεί η εκπαίδευση του προβλεπτικού μοντέλου. Στα πλαίσια της τεχνολογικής λύσης έχει αναπτυχθεί κώδικας σε περιβάλλον Google Colab με

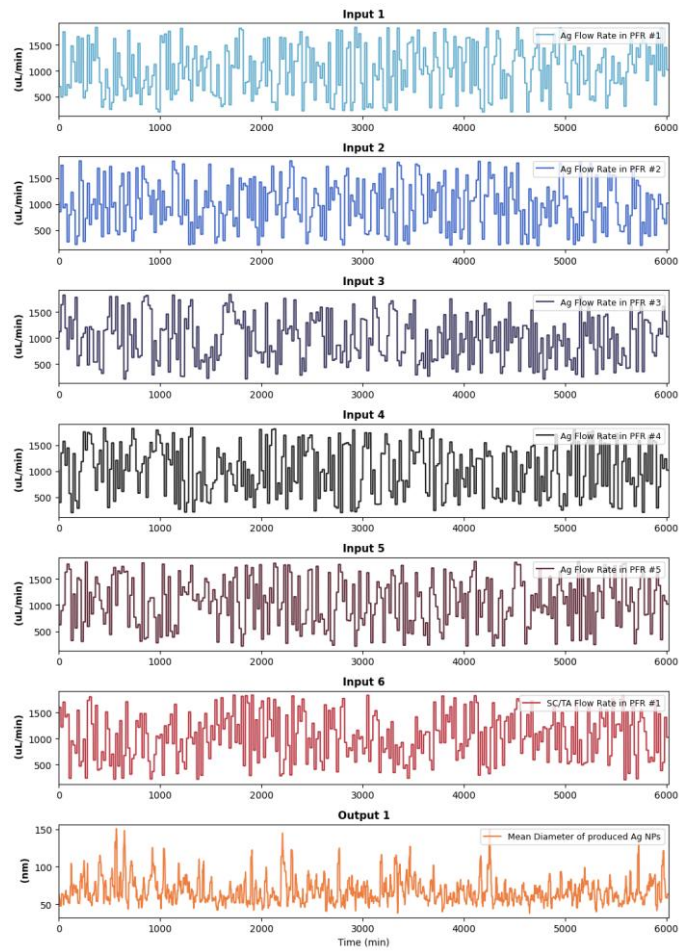
Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

γλώσσα προγραμματισμού Python που επιτρέπει την εκπαίδευση δικτύων RBFNN, την οπτικοποίηση των προβλέψεων και την παραμετροποίηση του ελεγκτή MPC μέσω ενός τεχνητού περιβάλλοντος προσομοίωσης. Το περιβάλλον του κώδικα είναι ιδιαίτερα φιλικό προς τον χρήστη αφού το αρχείο notebook εκτελείται μια φορά στην αρχή, και όλες οι εντολές πραγματοποιούνται μέσω διαδραστικών κομβίων και πεδίων εισόδου, χωρίς να απαιτείται καμία παρέμβαση στη συγγραφή του κώδικα.

Κατά την εκτέλεση, εισάγεται το αρχείο .xlsx και παρέχονται διαγράμματα για την οπτικοποίηση των δεδομένων εκπαίδευσης (όπως αυτό στην Εικόνα 35), ενώ ο χρήστης καθορίζει τρεις βασικές παραμέτρους: (α) το ποσοστό επιμερισμού των δεδομένων σε σύνολο εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου, (β) το μήκος του χρονικού ορίζοντα (past values) που ορίζει τον αριθμό παρελθοντικών τιμών στις εισόδους, και (γ) τον αριθμό ασαφών υποσυνόλων του αλγορίθμου Fuzzy Means (FM), ο οποίος καθορίζει πλήθος και συντεταγμένες των κέντρων των νευρώνων της κρυφής στοιβάδας με μία προσπέλαση των δεδομένων. Το σύνολο εκπαίδευσης χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των παραμέτρων του δικτύου (συντεταγμένες κέντρων και τιμές συναπτικών βαρών), το σύνολο επικύρωσης για την εξαγωγή μετρικών και την επιλογή των υπερπαραμέτρων (αριθμός ασαφών υποσυνόλων), ενώ το σύνολο ελέγχου για την τελική αξιολόγηση σε δεδομένα που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την εκπαίδευση. Η υπερπαραμέτρος των υποσυνόλων δοκιμάζεται σε πολλαπλές τιμές ώστε, μέσω μετρικών όπως ο συντελεστής συσχέτισης R^2 , να προκύψει το βέλτιστο RBFNN, το οποίο επικυρώνεται και τελικά αποθηκεύεται ως 'RBF_mpc.mat' για ενσωμάτωση στον αλγόριθμο MPC.

Βαθμονόμηση παραμέτρων MPC:

Το περιβάλλον του κώδικα δίνει και τη δυνατότητα προσομοίωσης σε σενάρια κλειστού βρόχου μέσω της ανάθεσης του ρόλου του συστήματος (plant) σε ένα διαφορετικό RBF. Συγκεκριμένα, προτείνεται η επιλογή ενός μικρού δικτύου για τον MPC – καθώς ο αλγόριθμος επιτρέπει διόρθωση των εκάστοτε προβλέψεων με βάση την τρέχουσα ανατροφοδότηση από το σύστημα – και ενός πιο σύνθετου, μεγαλύτερου δικτύου για το ρόλο του plant. Στην Εικόνα 36(α) πατώντας το κομβίο "Load Tuning Parameters" ο κώδικας παρουσιάζει στον χρήστη όλες τις παραμέτρους του ελεγκτή, μαζί με σχετικά μηνύματα για το πλήθος των απαραίτητων τιμών σε κάθε κελί. Αφού οριστούν οι παράμετροι του MPC, το πεδίο στην Εικόνα 36(β) επιτρέπει τη διενέργεια προσομοιώσεων κλειστού βρόχου με συγκεκριμένες προδιαγραφές που καθορίζονται από τον χρήστη.



Εικόνα 35 Δεδομένα πεδίου για την εκπαίδευση του δικτύου RBFNN του MPC

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Load Tuning Parameters

Q elements for SP tracking:

R elements for MV suppression:

Penalty weights for LB soft constraints:

Penalty weights for UB soft constraints:

Control Horizon:

Prediction Horizon:

(α) Πεδίο κώδικα για βαθμονόμηση παραμέτρων MPC

Initialize Case Study Configuration

Simulation Time (min):

Sampling Time (min):

Set-point (SP) values:

Time Step to Apply SP:

Output Lower Bounds (LB):

Output Upper Bounds (UB):

MV Lower Bounds:

MV Upper Bounds:

Toggle SP 1: Toggle LB 1: Toggle UB 1:

(β) Πεδίο κώδικα για περιγραφή προσομοίωσης κλειστού βρόχου

Εικόνα 36 Πεδία κώδικα για διενέργεια προσομοιώσεων κλειστού βρόχου

Στο τελευταίο πεδίο του κώδικα, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει την εξέλιξη της προσομοίωσης και να τυπώσει διαγράμματα με τις ρυθμιζόμενες μεταβλητές και τις μεταβλητές εκ χειρισμού ανάλογα με τις προτιμήσεις και τις ανάγκες του συστήματος. Σε όλα τα πεδία κώδικα εμφανίζονται μηνύματα σφαλμάτων σε περίπτωση όπου η εισαγωγή κάποιας τιμής έχει παραλειφθεί ή έχει γίνει λανθασμένα ενώ, επιπλέον, ο κώδικας έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί για οποιοδήποτε πλήθος ρυθμιζόμενων μεταβλητών και μεταβλητών εκ χειρισμού, χωρίς να απαιτούνται επεμβάσεις.

Εφαρμογή Εποπτικού Ελέγχου (Human Machine Interface, HMI):

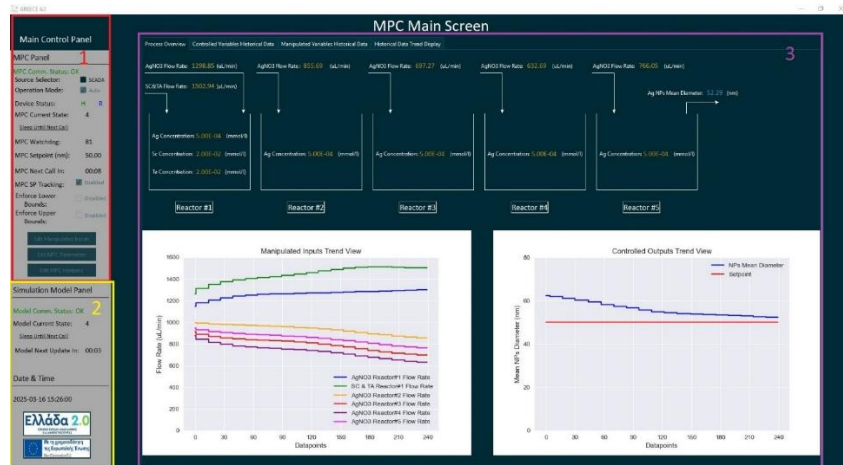
Για την αλληλεπίδραση του χρήστη τόσο με τον ελεγκτή όσο και με τη διεργασία αναπτύχθηκε εφαρμογή εποπτικού ελέγχου HMI. Η αλληλεπίδραση αυτή γίνεται μέσω εικονικών κομβίων (virtual push-buttons) αλλά και πεδίων εισαγωγής/ανάγνωσης τιμών (Input/output fields). Οι λειτουργίες που προσφέρονται είναι οι βασικές λειτουργίες ενός εποπτικού συστήματος όπως:

1. Εποπτεία του συστήματος ελέγχου.
2. Έλεγχος του συστήματος ελέγχου.
3. Διάγνωση βλαβών και σφαλμάτων μέσω κατάλληλου χρωματικού κώδικα των υπό έλεγχο διατάξεων αλλά και μηνυμάτων.
4. Πλοήγηση στις οθόνες του συστήματος.
5. Δυνατότητα παραμετροποίησης βασικών μεγεθών του συστήματος ελέγχου.
6. Καταγραφή των μεγεθών του συστήματος ελέγχου σε βάση δεδομένων και πρόσβαση σε αυτή μέσω του γραφικού περιβάλλοντος.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 37) φαίνεται η κεντρική οθόνη της εφαρμογής εποπτικού ελέγχου. Η κεντρική οθόνη μπορεί να χωριστεί σε τρία πλαίσια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 37. Τα πλαίσια 1 και 2 παραμένουν σταθερά και ορατά στο χρήστη της εφαρμογής κάθε χρονική στιγμή, για οποιαδήποτε επιλογή επιμέρους οθόνης έχει γίνει στο πλαίσιο 3, και δίνουν την απαραίτητη πληροφορία σχετικά με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο MPC (MPC Panel, πλαίσιο 1) αλλά και την κατάσταση του μοντέλου προσομοίωσης (Simulation Model Panel, πλαίσιο 2). Στο πλαίσιο 3 (MPC Main Screen) αποτελεί το μέρος της οθόνης του HMI στο οποίο ο χρήστης μπορεί να «πλοηγηθεί» στις επιμέρους οθόνες της εφαρμογής.

MPC_Panel:

Το πεδίο «MPC Panel» είναι ορατό πάντα και από



Εικόνα 37 Κεντρική οθόνη εφαρμογής εποπτικού ελέγχου HMI

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

εδώ ο χρήστης της εφαρμογής είναι σε θέση να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την κατάσταση λειτουργίας του προβλεπτικού ελεγκτή MPC αλλά και μέσω εικονικών κομβίων να αλληλοεπιδρά με αυτόν. Οι δυνατότητες και οι πληροφορίες που παρέχονται στον πίνακα ελέγχου του MPC συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 15 Λειτουργίες και Παρεχόμενες Πληροφορίες του Πίνακα Ελέγχου MPC

Κατηγορία	Περιγραφή	Λεπτομέρειες / Επιλογές
Κατάσταση επικοινωνίας MPC	HMI– Εμφανίζει την τρέχουσα κατάσταση σύνδεσης	«Καλή επικοινωνία/OK» ή «Απώλεια επικοινωνίας/Timeout»
Διακόπτης «Source Selector»	«Source» Επιλογή πηγής χειρισμού	<ul style="list-style-type: none"> - HMI: αποκλειστικό δικαίωμα αλλαγής μεταβλητών, προτεραιότητα έναντι SCADA. - SCADA: χειρισμός από κεντρικό σύστημα - Auto: έλεγχος διεργασίας από MPC.
Διακόπτης «Operation Mode»	«Operation» Επιλογή τρόπου λειτουργίας	<ul style="list-style-type: none"> - Manual: ορισμός τιμών στις μεταβλητές εκ χειρισμού (διαθέσιμο μόνο όταν το Source Selector είναι σε HMI) - H: όλες οι συσκευές σε καλή κατάσταση. - F: έστω και μία σε σφάλμα. - R: όλοι οι τοπικοί διακόπτες των επενεργητών σε απομακρυσμένο (Remote) έλεγχο. - L: έστω ένας διακόπτης σε τοπικό (Local) έλεγχο. - Σε περίπτωση σφάλματος (ενδείξεις F ή L) γίνεται αυτόματη μετάβαση σε Manual και επιστροφή σε Auto μόνο μετά την αποκατάσταση και επιλογή του χρήστη. - MPC Current State: τρέχον βήμα εκτέλεσης. - MPC Watchdog: μετρητής στον αλγόριθμο MPC 0–100 που ενημερώνει για την κατάσταση επικοινωνίας με τον MPC. - MPC Setpoint: τιμή αναφοράς. - MPC Next Call: χρόνος μέχρι επόμενη εκτέλεση - MPC Setpoint Tracking: για εφαρμογή ή μη τιμής αναφοράς στη μεταβλητή ελέγχου - Enforce Lower Bounds: για την επιβολή ή μη κατωτέρων ορίων λειτουργίας σε μεταβλητές ελέγχου - Enforce Upper Bounds: για επιβολή ή μη ανώτερων ορίων λειτουργίας σε μεταβλητές ελέγχου
Κατάσταση πεδίου συσκευών	Ενημέρωση για επενεργητές (actuators) και μεταδότες (transmitters)	
Διαγνωστικές πληροφορίες (Diagnostics)	MPC Ενημέρωση σχετικά με την κατάσταση εκτέλεσης του αλγορίθμου MPC	
Ρυθμίσεις λειτουργίας MPC (Operating Settings)	Επιλογικοί διακόπτες	
Επεξεργασία μεταβλητών χειρισμού (Edit Manipulated Variables)	Επιλογή τιμών σε κατάσταση χειροκίνητου ελέγχου (Manual) και ελέγχου από HMI	Αναδυόμενο παράθυρο Εικόνα 38α → καταχώριση τιμών → Apply Values → εφαρμογή στην επόμενη εκτέλεση
Επεξεργασία παραμέτρων MPC (Edit MPC Parameters)	Αλλαγή παραμέτρων MPC σε κατάσταση ελέγχου HMI	Αναδυόμενο παράθυρο Εικόνα 38β → καταχώριση τιμών → Apply Control Parameters → εφαρμογή στην επόμενη εκτέλεση

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Επεξεργασία χρονικών Αλλαγή χρονικών
οριζόντων MPC (Edit οριζόντων λειτουργίας Παρόμοια διαδικασία με παραμέτρους MPC
MPC Horizons) του MPC

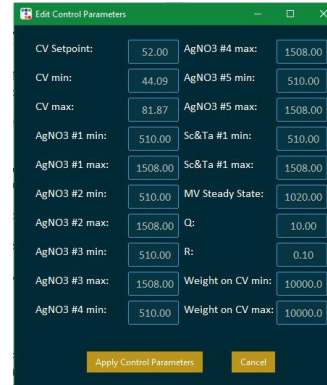
Simulation_Model_Panel:

Τρεις βασικές πληροφορίες σχετικές με το σύστημα της προσομοίωσης παρέχονται σε αυτό πεδίο:

1. Κατάσταση επικοινωνίας του MPC με την εφαρμογή της προσομοίωσης.
2. Βήμα εκτέλεσης της προσομοίωσης.
3. Χρόνος που απομένει μέχρι την επόμενη εκτέλεση του μοντέλου.



(α) Αναδυόμενο παράθυρο μετά την επιλογή του κομβίου 'Edit Manipulated Variables'



(β) Αναδυόμενο παράθυρο μετά την επιλογή του κομβίου 'Edit MPC Parameters'

Εικόνα 38 Αναδυόμενα παράθυρα για χειροκίνητο έλεγχο μεταβλητών εκ χειρισμού και προσδιορισμό παραμέτρων προβλήματος βελτιστοποίησης

MPC Main Screen:

Η κύρια οθόνη της εφαρμογής περιλαμβάνει τέσσερις καρτέλες:

1. **Process Overview** – Παρέχει οπτικοποίηση της διεργασίας και διαγράμματα σε πραγματικό χρόνο για τις μεταβλητές χειρισμού και ελέγχου, μαζί με την τιμή αναφοράς (*setpoint*). Για όλες τις μεταβλητές εφαρμόζεται χρωματικός κώδικας, ώστε ο χρήστης να ενημερώνεται για την κατάσταση όλων των στοιχείων του συστήματος ελέγχου (απομακρυσμένος ή τοπικός έλεγχος, σφάλμα ή ομαλή λειτουργία).
2. **Controlled Variables Historical Data & Manipulated Variables Historical Data** – Παρέχουν πίνακες με ιστορικές καταγραφές από τη βάση δεδομένων, με κοινό γραφικό περιβάλλον. Ο χρήστης επιλέγει χρονικό διάστημα μέσω πεδίων εισαγωγής και, πατώντας το κουμπί **Execute**, εμφανίζει τις τιμές των μεταβλητών για το διάστημα αυτό. Για κάθε μεταβλητή εμφανίζονται:
 - **ID**: αύξων αριθμός καταχώρησης
 - **Timestamp**: ημερομηνία/ώρα καταγραφής
 - **Value**: τιμή μεταβλητής
 - **Tag Quality**: ποιότητα καταχώρησης (0 = καλή, 100 = κακή, π.χ. λόγω απώλειας επικοινωνίας HMI με MPC ή μοντέλο προσομοίωσης).

Διατίθενται επίσης κομβία για εμφάνιση όλων των καταχωρήσεων, εκκαθάριση του πίνακα (**Clear**), καθώς και εξαγωγή των εμφανιζόμενων δεδομένων σε μορφή Excel spreadsheet, CSV ή PDF μέσω drop-down menu (βλ. Εικόνα 39).

3. **Historical Data Trend Display** (βλ. Εικόνα 40) – Παρέχει την ίδια πληροφορία με τις προηγούμενες καρτέλες, αλλά υπό τη μορφή γραφήματος (trend display). Ο χρήστης επιλέγει χρονικό διάστημα και μεταβλητές, είτε μεμονωμένα μέσω **Check Boxes**, είτε όλες με το κουμπί **Show All Trends**. Η εντολή **Update All Trends** μεταφέρει τις ήδη απεικονιζόμενες μεταβλητές σε νέο χρονικό διάστημα και το κομβίο **Export Trend View** εξάγει το γράφημα σε μορφή PDF.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Process Overview | Controlled Variables Historical Data | Manipulated Variables Historical Data | Historical Data Trend Display

Specify the desired time interval:

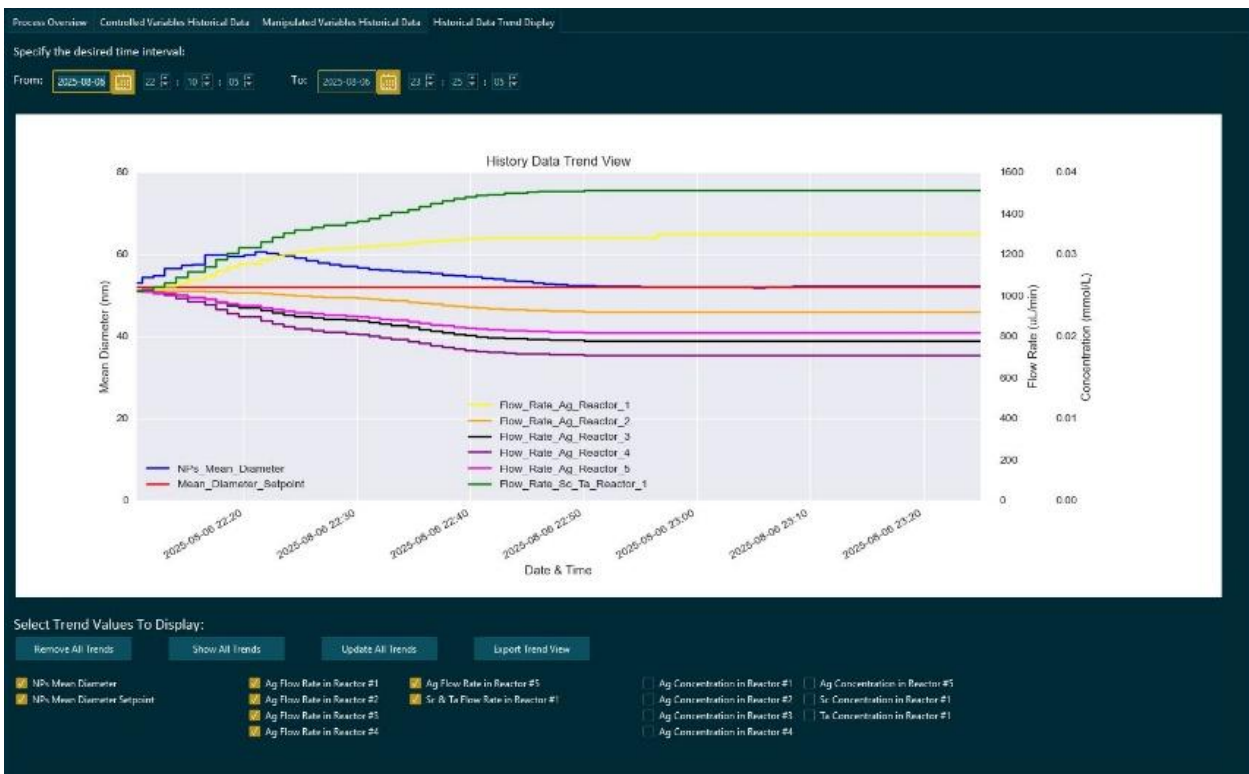
From: 2025-08-06 18:05 To: 2025-08-06 23:05

Execute Fetch All Values Clear All Values

Export to File EXCEL

ID	Timestamp	NPs Mean Diameter	Mean Diameter Setpoint	Tag Quality
10882	2025-08-06 19:25:15	0.0	52.0	0
10883	2025-08-06 19:25:32	0.0	52.0	0
10884	2025-08-06 19:26:02	0.0	52.0	0
10885	2025-08-06 19:26:32	62.980499267578125	52.0	0
10886	2025-08-06 19:27:02	62.980499267578125	52.0	0
10887	2025-08-06 19:27:32	62.980499267578125	52.0	0
10888	2025-08-06 19:28:02	62.980499267578125	52.0	0
10889	2025-08-06 19:28:32	62.980499267578125	52.0	0
10890	2025-08-06 19:29:02	62.97974395751953	52.0	0
10891	2025-08-06 19:29:32	62.97974395751953	52.0	0
10892	2025-08-06 19:30:02	62.85260473202461	52.0	0
10893	2025-08-06 19:30:32	62.85260473202461	52.0	0
10894	2025-08-06 19:31:02	62.475955963134766	52.0	0
10895	2025-08-06 19:31:32	62.475955963134766	52.0	0
10896	2025-08-06 19:32:02	62.047386169433594	52.0	0
10897	2025-08-06 19:32:32	62.047386169433594	52.0	0
10898	2025-08-06 19:33:02	62.047386169433594	52.0	0
10899	2025-08-06 19:33:32	61.83891296386719	52.0	0
10900	2025-08-06 19:34:02	61.83891296386719	52.0	0
10901	2025-08-06 19:34:32	60.84383316040039	52.0	0
10902	2025-08-06 19:35:02	60.84383316040039	52.0	0
10903	2025-08-06 19:35:32	59.89954376220703	52.0	0
10904	2025-08-06 19:36:02	59.89954376220703	52.0	0
10905	2025-08-06 19:36:32	58.8971972338867	52.0	0
10906	2025-08-06 19:37:02	58.8971972338867	52.0	0
10907	2025-08-06 19:37:32	58.8971972338867	52.0	0
10908	2025-08-06 19:38:02	58.07683563232422	52.0	0
10909	2025-08-06 19:38:32	58.07683563232422	52.0	0
10910	2025-08-06 19:39:02	57.40296936035156	52.0	0
10911	2025-08-06 19:39:32	57.40296936035156	52.0	0
10912	2025-08-06 19:40:02	56.4775104880469	52.0	0
10913	2025-08-06 19:40:32	56.4775104880469	52.0	0
10914	2025-08-06 19:41:02	55.77543258666992	52.0	0
10915	2025-08-06 19:41:32	55.77543258666992	52.0	0
10916	2025-08-06 19:42:02	55.260623931884766	52.0	0
10917	2025-08-06 19:42:32	55.260623931884766	52.0	0
10918	2025-08-06 19:43:02	55.260623931884766	52.0	0
10919	2025-08-06 19:43:32	54.9589445800781	52.0	0
10920	2025-08-06 19:44:02	54.9589445800781	52.0	0
10921	2025-08-06 19:44:32	54.756317138671875	52.0	0
10922	2025-08-06 19:45:02	54.756317138671875	52.0	0
10923	2025-08-06 19:45:32	54.564170837402344	52.0	0
10924	2025-08-06 19:46:02	54.564170837402344	52.0	0
10925	2025-08-06 19:46:32	54.3667106629418	52.0	0
10926	2025-08-06 19:47:02	54.3667106629418	52.0	0
10927	2025-08-06 19:47:32	54.161048889160156	52.0	0
10928	2025-08-06 19:48:02	54.161048889160156	52.0	0
10929	2025-08-06 19:48:32	54.161048889160156	52.0	0
10930	2025-08-06 19:49:02	53.93674850463867	52.0	0
10931	2025-08-06 19:49:32	53.93674850463867	52.0	0

Εικόνα 39 Οθόνη ιστορικών δεδομένων των μεταβλητών ελέγχου



Εικόνα 40 Οθόνη ιστορικών δεδομένων σε μορφή γραφήματος (Trend View Display)

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Για την πιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος κλειστού βρόχου με τον προτεινόμενο ελεγκτή MPC έχουν οριστεί τα σενάρια επίδειξης του Πίνακα 16, τα οποία θα εκτελεστούν σε εργαστηριακό περιβάλλον με τη βοήθεια του μοντέλου προσομοίωσης για τη διεργασία των νανοσωματιδίων Ag. Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ελεγκτή βασίζεται σε τέσσερις δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), οι οποίοι αποτυπώνουν τόσο την ποιότητα παρακολούθησης των σημείων αναφοράς όσο και την ικανότητα απόρριψης διαταραχών:

1. KPI1 - Τελική απόκλιση από το σημείο αναφοράς (Offset): Εκφράζει το τελικό μόνιμο σφάλμα μεταξύ της πραγματικής τιμής της ρυθμιζόμενης μεταβλητής και της επιθυμητής τιμής αναφοράς (setpoint).
2. KPI2 - Τυπική απόκλιση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής (Standard Deviation, SD): Αξιολογεί τη διασπορά της μεταβλητής γύρω από τη μέση τιμή, ως μέτρο ευστάθειας και ομαλότητας της διεργασίας.
3. KPI3 - Χρόνος αποκατάστασης (Settling Time): Ο χρόνος που απαιτείται ώστε η απόκριση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής να παραμείνει εντός προκαθορισμένης ζώνης σφάλματος γύρω από το σημείο αναφοράς μετά από μεταβολή ή διαταραχή (επιλέγεται ζώνη σφάλματος 2%).
4. KPI4 - Υπερύψωση/Υποβύθιση (%) (Overshoot/Undershoot, O/U): Εκφράζει τη μέγιστη θετική ή αρνητική απόκλιση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής κατά τη μετάβαση στη νέα κατάσταση ισορροπίας, ως ποσοστό του νέου σημείου αναφοράς.

Με βάση τα παραπάνω, ορίστηκαν τρία σενάρια δοκιμών στο σύστημα κλειστού βρόχου:

Πίνακας 16 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας για την λύση 108

Σενάριο	Στόχος	Μέσα επαλήθευσης
Παρακολούθηση σημείου αναφοράς (Set-point Tracking)	Αξιολόγηση της ικανότητας του ελεγκτή να ακολουθεί με ακρίβεια και ταχύτητα τις μεταβολές του σημείου αναφοράς της διεργασίας.	1) Διαγράμματα αποκρίσεων ρυθμιζόμενης μεταβλητής και μεταβλητών εκ χειρισμού από την πλατφόρμα διεπαφής με χρήση.
Παρακολούθηση σημείου αναφοράς με θόρυβο μέτρησης	Αξιολόγηση της ευρωστίας του ελεγκτή σε συνθήκες αβεβαιότητας με παρουσία θορύβου στις μετρήσεις.	2) Εξαγωγή τιμών για τους δείκτες KPI1, KPI2, KPI3, KPI4 και σύγκριση με εναλλακτική μεθοδολογία ελέγχου.
Παρακολούθηση σημείου αναφοράς με σφάλμα μοντέλου	Αξιολόγηση της ικανότητας του ελεγκτή να αποδίδει κατά το μέγιστον ακόμα κι όταν το μοντέλο δεν αναπαριστά πλήρως τη διεργασία.	

2.11. Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής

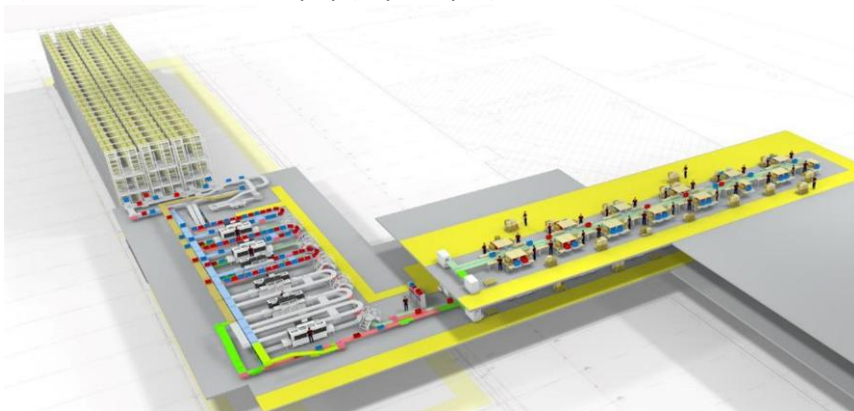
Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η προσφερόμενη τεχνολογική λύση αναπτύχθηκε βασιζόμενη στη λειτουργία ενός συγχρόνου κέντρου διανομής που βρίσκεται στην Ελλάδα και εξυπηρετεί αποκλειστικά τις ανάγκες δύο επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στον κλάδο του λιανεμπορίου στην Ελλάδα, την Κύπρο και τα Βαλκάνια. Για αυτό το κέντρο διανομής, αναπτύχθηκε πλατφόρμα νέφους η οποία αντλεί δεδομένα από τους αυτοματισμούς διακίνησης υλικών και τα πληροφοριακά συστήματα της αποθήκης με στόχο την ανάλυση τους και την παροχή οπτικοποιημένων αναφορών προς τη διοίκηση. Ταυτόχρονα αναπτύχθηκε ψηφιακό δίδυμο συγκεκριμένης αποθηκευτικής διάταξης το οποίο σε συνδυασμό με τη χρήση της πλατφόρμας νέφους υποστηρίζει διοικητικές αποφάσεις που σχετίζονται με τον εξοπλισμό διακίνησης της διάταξης και το ανθρώπινο δυναμικό που την υποστηρίζει.

Περιγραφή της αποθηκευτικής διάταξης

Το τμήμα της εγκατάστασης που περιλαμβάνει η λύση αποτελείται από:

1. Τον αυτοματισμό αποθήκευσης κιβωτίων, ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 41. Ειδικότερα, ο αυτοματισμός συνίσταται σε ένα σύστημα αυτόματης αποθήκευσης και ανάκτησης (AS/RS) και ειδικούς σταθμούς συλλογής (picking), κατατάσσοντας το στην κατηγορία αυτοματισμών 'Good to Picker'. Τα προϊόντα αποθηκεύονται μέσα σε κιβώτια, τα οποία διακινούνται με shuttle και lifts και αποθηκεύονται σε ειδικά διαμορφωμένα ράφια.



Εικόνα 41 Αυτοματισμός Αποθήκευσης Κιβωτίων

2. Τον αυτοματισμό αποθήκευσης παλετών, ο οποίος αποτελείται από ράφια παλετών, μη επανδρωμένα περνοφόρα οχήματα (AGVs), σταθμούς εισαγωγής και εξόδου, δίκτυο ραουλοδρόμων, καθώς και σημεία ελέγχου, απόθεσης και συλλογής, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 42 Αυτοματισμός Αποθήκευσης Παλετών

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

3. Εκτός από την αυτοματοποιημένη υποδομή, το σύστημα περιλαμβάνει και χειροκίνητες διαδικασίες που εκτελούνται από το προσωπικό της αποθήκης. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι διαδικασίες παραλαβής και αποστολής, που αφορούν τη φόρτωση και την εκφόρτωση των φορτηγών, τον έλεγχο και τη σάρωση των παλετών με barcode κατά την παραλαβή ή την αποστολή, τις εσωτερικές μετακινήσεις παλετών μεταξύ διαφορετικών λειτουργικών περιοχών της αποθήκης, τη συλλογή παραγγελιών, καθώς και την αναπλήρωση των αποθεμάτων των αυτοματισμών. Ο συνδυασμός αυτών των χειροκίνητων και αυτοματοποιημένων λειτουργιών υποστηρίζει μια ολοκληρωμένη, end-to-end ροή διακίνησης υλικών, εντός της εγκατάστασης.

Πιλοτική Εγκατάσταση σε Εργαστηριακό Περιβάλλον

Για την υλοποίηση της πιλοτικής εγκατάστασης, η λύση αναπτύχθηκε και εγκαταστάθηκε σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον. Το Ψηφιακό Δίδυμο, το οποίο περιλαμβάνει το μοντέλο προσομοίωσης FlexSim, τη βάση δεδομένων PostgreSQL και τον κώδικα της Python εγκαταστάθηκε και εκτελείται τοπικά σε υπολογιστή του εργαστηρίου Επιχειρησιακής Έρευνας και Εφοδιαστικής του ΕΜΠ. Παράλληλα, η πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων φιλοξενείται σε έναν εικονικό server, κάτω από το cloud service oceanos υπό την αιγίδα του grnet, προσφέροντας δυνατότητες απομακρυσμένης πρόσβασης, υψηλής διαθεσιμότητας και ασφαλούς διαχείρισης δεδομένων. Ο συνδυασμός αυτών των δύο περιβαλλόντων, δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης, συμβατό με τις απαιτήσεις TR15, στο οποίο η λύση μπορεί να δοκιμαστεί χωρίς την ανάγκη παρεμβάσεων στο επιχειρησιακό περιβάλλον της αποθήκης.

Η ολοκλήρωση της πιλοτικής εγκατάστασης περιλαμβάνει τη διασύνδεση του ψηφιακού διδύμου με την πλατφόρμα μέσω REST API, την υλοποίηση των μηχανισμών ETL και των διαδικασιών μεταφοράς δεδομένων, καθώς και τη διαμόρφωση των υπηρεσιών αυτόματης εκκίνησης προσομοιώσεων. Το τοπικό μοντέλο FlexSim, σε συνδυασμό με τη PostgreSQL βάση δεδομένων, προσαρμόστηκε ώστε να λαμβάνει εισερχόμενα δεδομένα μέσω προσομοιωμένων HTTP POST αιτημάτων που αναπαράγουν τη δομή και τις ροές δεδομένων του WMS και των αυτοματισμών της αποθήκης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μεταφέρονται αυτόματα στη cloud πλατφόρμα, όπου αναλύονται και οπτικοποιούνται σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκε μια πλήρως λειτουργική και αυτοματοποιημένη αλυσίδα δεδομένων, η οποία επέτρεψε την εκτέλεση ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας, την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος και την επίδειξη των δυνατοτήτων της λύσης σε ένα εργαστηριακό περιβάλλον.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Για την επίδειξη της λειτουργικότητας της προτεινόμενης λύσης στο πλαίσιο της πιλοτικής εγκατάστασης, σχεδιάστηκαν και ορίστηκαν αντιπροσωπευτικά σενάρια χρήσης, με στόχο την επίδειξη των βασικών λειτουργιών της πλατφόρμας και του Ψηφιακού Διδύμου, καθώς και την προκαταρκτική διερεύνηση των Δεικτών Απόδοσης (KPIs) που έχουν τεθεί ως στόχοι της λύσης. Συγκεκριμένα, τα σενάρια χρήσης σχεδιάστηκαν ώστε τα αποτελέσματα της εκτέλεσής τους να υποστηρίζουν τον υπολογισμό των αρχικά ορισμένων δεικτών απόδοσης της λύσης, όπως αυτοί έχουν οριστεί στο Παραδοτέο 1.1.:

- KPI1 – Μέσος χρόνος επίλυσης σφάλματος αυτοματισμού, τόσο σε οριζόντιο επίπεδο όσο και ανά κατηγορία αυτοματισμού (π.χ. AGVs, ραουλόδρομοι κ.α.).
- KPI2 – Αύξηση της παραγωγικότητας συλλογής παραγγελιών, μέσω της ανάλυσης του αριθμού γραμμών παραγγελίας ανά χρονική περίοδο, ζώνη συλλογής και χειριστή.
- KPI3 – Βελτίωση της διαφάνειας των εργασιών εντός του αποθηκευτικού κέντρου, με στόχο την υποστήριξη και την επιτάχυνση της λήψης τεκμηριωμένων διοικητικών αποφάσεων.

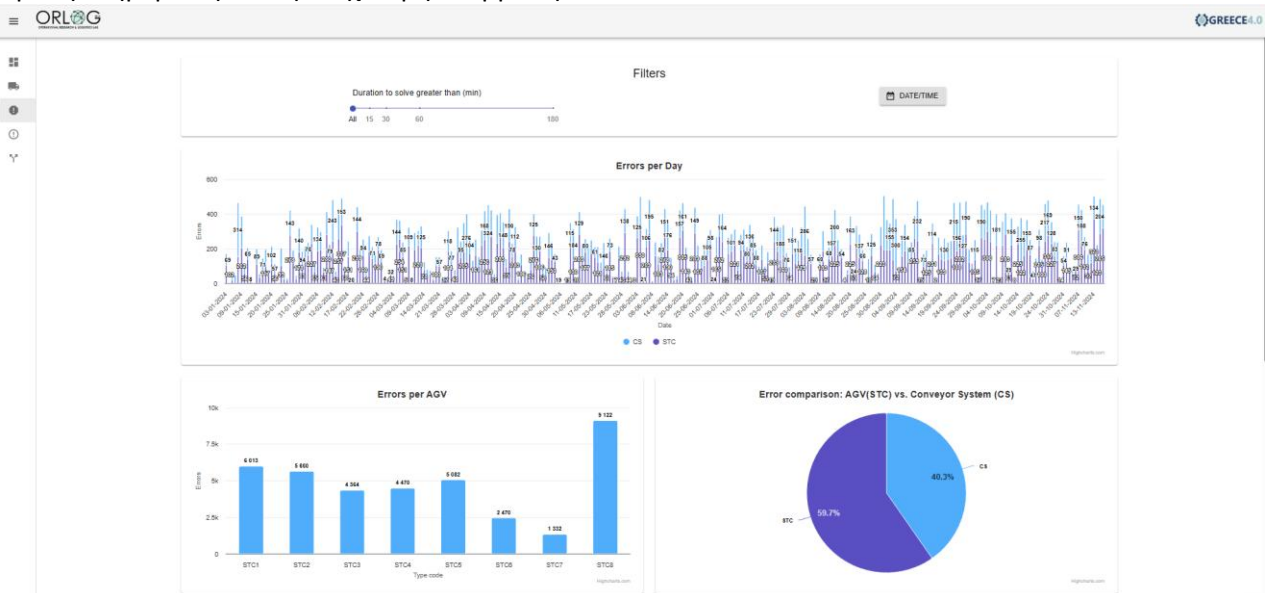
Σενάριο Χρήσης Α: Διαχείριση και ανάλυση σφαλμάτων αυτοματισμού

Το Σενάριο Χρήσης Α αφορά τη λειτουργία παρακολούθησης και ανάλυσης των σφαλμάτων που παράγουν οι δύο αυτοματισμοί της αποθηκευτικής διάταξης, με στόχο τη μείωση του μέσου χρόνου επίλυσης των σφαλμάτων τους (KPI1). Στο πλαίσιο του σεναρίου, ο χρήστης συνδέεται στη διαδικτυακή πλατφόρμα και μεταβαίνει στις δύο ειδικά διαμορφωμένες σελίδες, μία για κάθε αυτοματισμό. Οι

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

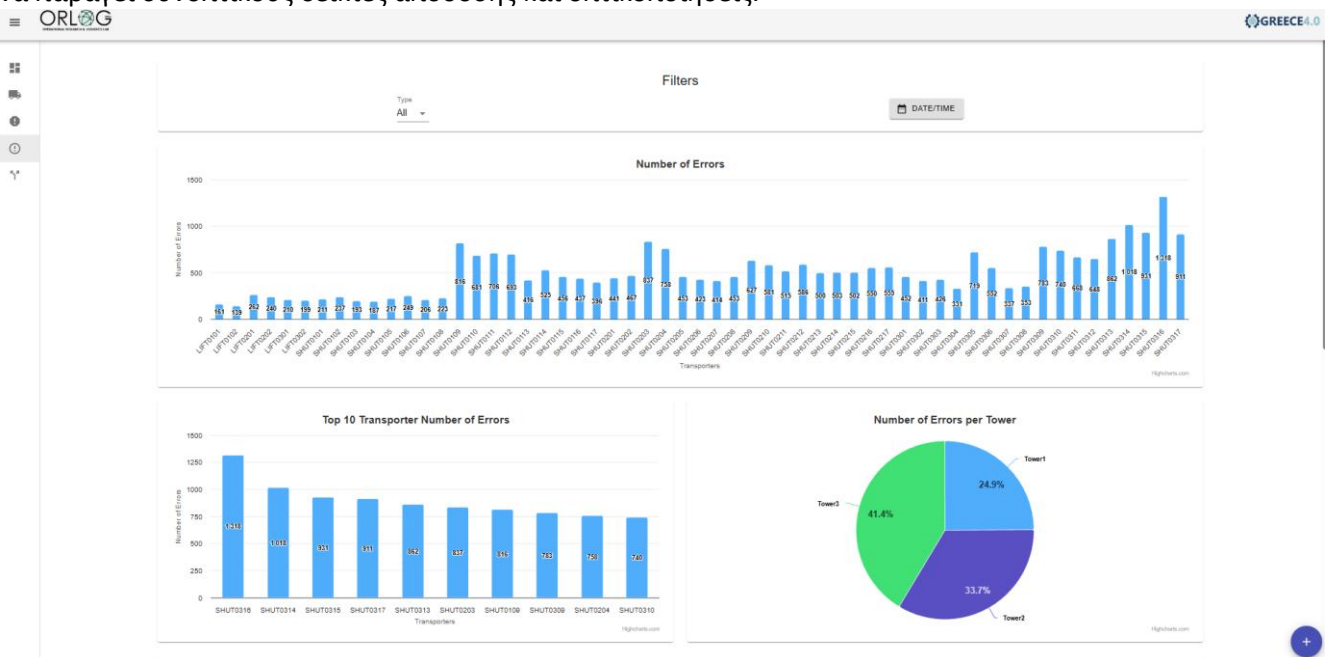
σελίδες αυτές παρουσιάζουν διαδραστικά dashboards, μέσω των οποίων ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τη συχνότητα, τη διάρκεια, την κατανομή και τη θέση των σφαλμάτων. Τα δεδομένα σφαλμάτων προέρχονται από τα πληροφοριακά συστήματα των αυτοματισμών.

Η σελίδα που αφορά τον αυτοματισμό αποθήκευσης παλετών, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 43, προβλέπεται να υποστηρίζει, πέρα από την ανάλυση ιστορικών δεδομένων, και τη διαχείριση δεδομένων πραγματικού χρόνου. Στο πλαίσιο του σεναρίου ορίζεται η δυνατότητα αυτόματης αποστολής ειδοποιήσεων, όταν ανιχνεύονται σφάλματα που απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση. Οι ειδοποιήσεις αποστέλλονται στον μηχανικό συντήρησης που έχει βάρδια τη δεδομένη χρονική στιγμή, με στόχο την άμεση ενημέρωση και την ταχύτερη επέμβαση.



Εικόνα 43 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης σφαλμάτων αυτοματισμού αποθήκευσης παλετών

Αντίστοιχα, η σελίδα που αφορά τον αυτοματισμό αποθήκευσης κιβωτιών σχεδιάστηκε ώστε να επεξεργάζεται πολλαπλές αναφορές σφαλμάτων από το πληροφοριακό σύστημα του αυτοματισμού και να παράγει συνοπτικούς δείκτες απόδοσης και οπτικοποιήσεις.



Εικόνα 44 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης σφαλμάτων αυτοματισμού αποθήκευσης κιβωτιών

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Μέσω των dashboards, ο χρήστης αποκτά σαφή εικόνα της λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος, διευκολύνοντας την αναγνώριση επαναλαμβανόμενων βλαβών και την υποστήριξη αποφάσεων συντήρησης. Επίσης, μέσω των ειδοποιήσεων ελαχιστοποιείται ο χρόνος ενημέρωσης του μηχανικού συντήρησης. Επιπρόσθετα, οι πληροφορίες επίλυσης των σφαλμάτων που συνοδεύουν την push ειδοποίηση, συμβάλουν στην ταχύτερη επίλυση των πιο πολύπλοκων σφαλμάτων (που δεν απαιτούν για παράδειγμα, απλά μια επανεκκίνηση του αυτοματισμού). Το σενάριο αυτό ορίστηκε με στόχο την υποστήριξη της συντήρησης και της επιδιορθώσεως σφαλμάτων, συμβάλλοντας στη μείωση του μέσου χρόνου επίλυσης σφαλμάτων, όπως αποτυπώνεται στον δείκτη KPI1.

Σενάριο Χρήσης Β: Αύξηση παραγωγικότητας εργασιών

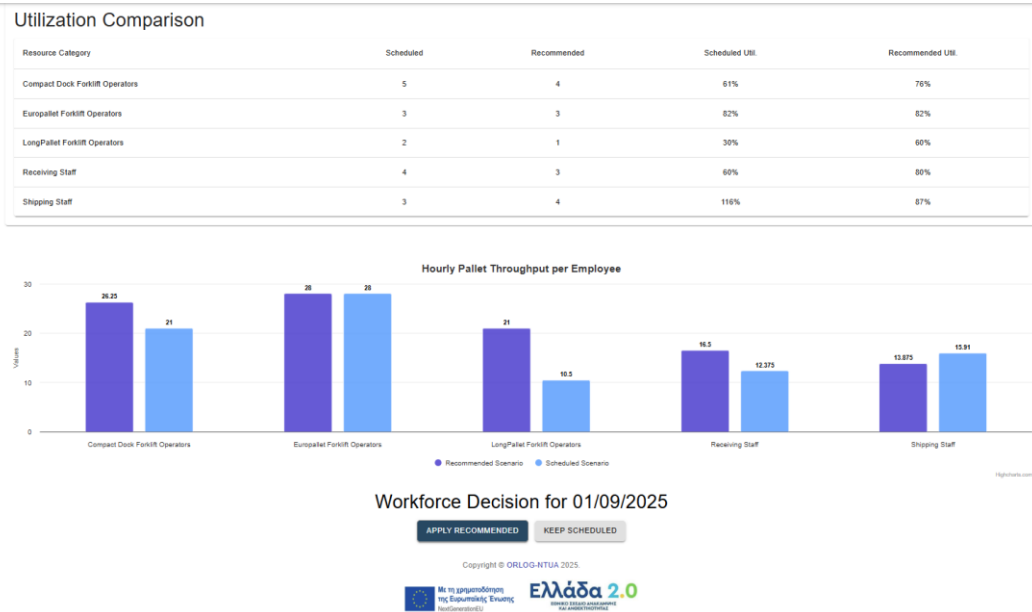
Το Σενάριο Χρήσης Β σχεδιάστηκε με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας των χειροκίνητων διαδικασιών που αλληλοεπιδρούν με τον αυτοματισμό αποθήκευσης παλετών, μέσω της αξιοποίησης των προτάσεων που παράγονται από το Ψηφιακό Δίδυμο και της παρακολούθησης των σχετικών λειτουργικών δεδομένων στην πλατφόρμα. Το σενάριο εστιάζει στη βελτιστοποίηση της κατανομής του ανθρώπινου δυναμικού και των περνοφόρων οχημάτων, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας των εργασιών και την αύξηση της παραγωγικότητας, όπως αποτυπώνεται στον δείκτη KPI2.

Στο πλαίσιο του σεναρίου, ο χρήστης συνδέεται στη διαδικτυακή πλατφόρμα και μεταβαίνει στη σελίδα του Ψηφιακού Διδύμου, όπου καλείται αρχικά να επιλέξει την ημερομηνία για την οποία ενδιαφέρεται να προβεί σε υπολογισμούς. Με βάση την επιλογή αυτή, το σύστημα συγκεντρώνει και παρουσιάζει τα βασικά λειτουργικά δεδομένα που προβλέπει το μοντέλο προσομοίωσης, καθώς και την προτεινόμενη στελέχωση ανά επιμέρους διαδικασία. Παράλληλα, εμφανίζεται το ποσοστό αξιοποίησης των εργαζομένων και των περνοφόρων, όπως αυτό εκτιμάται από το Ψηφιακό Δίδυμο. Η Σελίδα του Ψηφιακού Διδύμου φαίνεται στην Εικόνα 45 και στην Εικόνα 46.



Εικόνα 45 Σελίδα Ψηφιακού Διδύμου μέρος 1

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 46 Σελίδα Ψηφιακού Δίδυμου μέρος 2

Στην ενότητα Suggested Action, το σύστημα παρουσιάζει συνοπτικές και επιχειρησιακά αξιοποιήσιμες προτάσεις σχετικά με τον βέλτιστο αριθμό εργαζομένων και περνοφόρων, με στόχο τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας και την αποφυγή συμφόρησης ή χαμηλής αξιοποίησης πόρων.

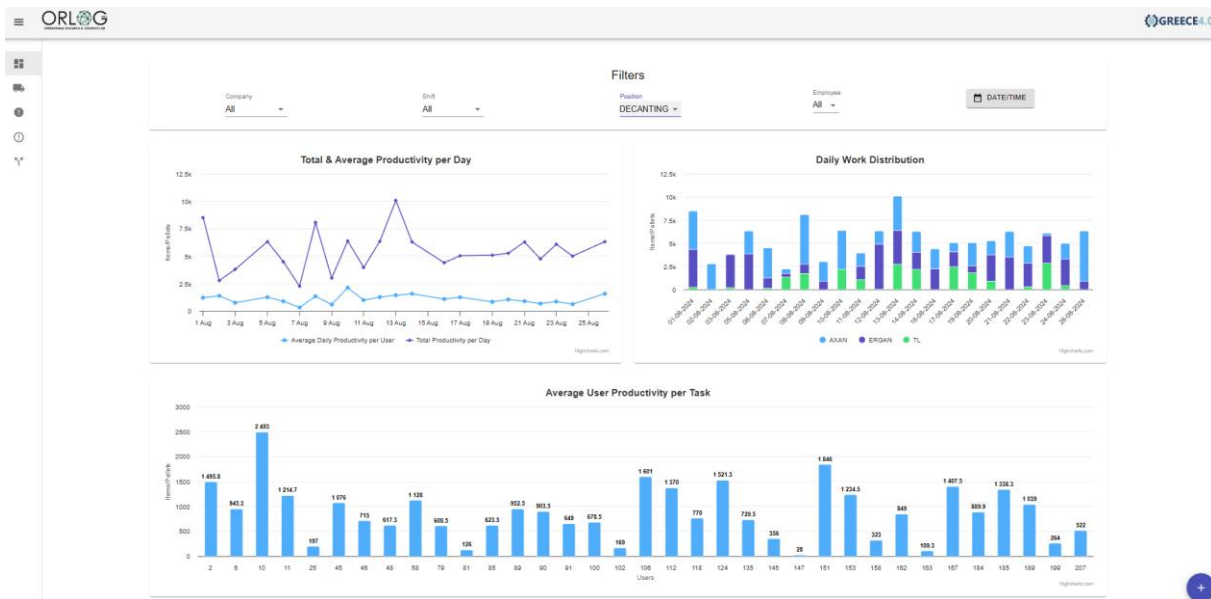
Το σενάριο δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να εφαρμόσει τις προτεινόμενες συστάσεις (apply recommendations), ενσωματώνοντάς τες στον επιχειρησιακό σχεδιασμό της ημέρας. Μέσω αυτής της λειτουργικότητας, το Ψηφιακό Δίδυμο λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, διευκολύνοντας τον προγραμματισμό βαρδιών, την ανακατανομή διαθέσιμου προσωπικού και την καλύτερη προετοιμασία της αποθήκης για την αντιμετώπιση αυξημένων ή και μειωμένων φόρτων εργασίας, αυξάνοντας έτσι την παραγωγικότητα και την απόδοση της διαδικασίας παραλαβών, συμβάλλοντας άμεσα στην επίτευξη του δείκτη KPI2.

Σενάριο Χρήσης Γ: Βελτίωση διαφάνειας των εργασιών μέσω ανάλυσης ιστορικών δεδομένων

Το Σενάριο Χρήσης Γ σχεδιάστηκε με στόχο την αύξηση της διαφάνειας των εργασιών εντός του αποθηκευτικού κέντρου και την υποστήριξη της διοίκησης του μέσω της κατανόησης και ανάλυσης των ιστορικών δεδομένων που προκύπτουν από τις καθημερινές δραστηριότητες του προσωπικού. Το σενάριο εστιάζει στη συγκεντρωτική αποτύπωση και οπτικοποίηση δεδομένων που αφορούν χειροκίνητες διαδικασίες, παρέχοντας μια σαφή και τεκμηριωμένη εικόνα της λειτουργικής συμπεριφοράς της αποθήκης σε βάθος χρόνου, όπως αποτυπώνεται στον ποιοτικό δείκτη KPI3.

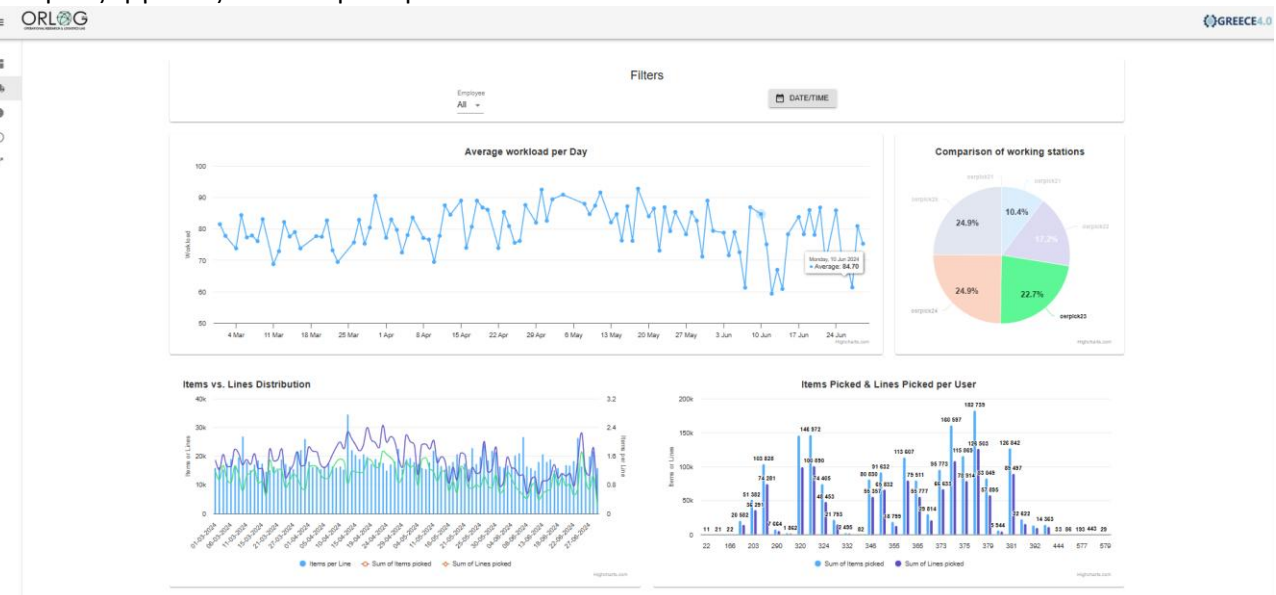
Στο πλαίσιο του σεναρίου, ο χρήστης συνδέεται στη διαδικτυακή πλατφόρμα και μεταβαίνει στις δύο πρώτες σελίδες της πλατφόρμας, οι οποίες αφορούν την ανάλυση δεδομένων χειροκίνητων διαδικασιών. Η πρώτη σελίδα, (βλ. Εικόνα 47), λαμβάνει δεδομένα από το κεντρικό πληροφοριακό σύστημα της αποθήκης (WMS) που σχετίζονται με δραστηριότητες όπως η συλλογή προϊόντων, η παραλαβή εμπορευμάτων, οι εσωτερικές μετακινήσεις παλετών και λοιπές χειροκίνητες εργασίες.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 47 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων από το WMS

Η δεύτερη σελίδα, (βλ. Εικόνα 48), του σεναρίου αφορά την ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από το πληροφοριακό σύστημα του αυτοματισμού αποθήκευσης κιβωτίων και σχετίζονται με τη διαδικασία συλλογής παραγγελιών με τη μέθοδο *goods-to-person*, η οποία εκτελείται σε ειδικούς σταθμούς εργασίας του αυτοματισμού.



Εικόνα 48 Σελίδα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων συλλογής παραγγελιών

Μέσω των δύο αυτών dashboards, ο χρήστης αποκτά μια ενιαία και διαχρονική εικόνα της απόδοσης των χειροκίνητων διαδικασιών και της συμμετοχής του ανθρώπινου δυναμικού στη λειτουργία της αποθήκης. Το σενάριο αυτό ορίστηκε με στόχο την ενίσχυση της διαφάνειας, τη βελτίωση της κατανόησης των επιχειρησιακών δεδομένων και την υποστήριξη ταχύτερων και τεκμηριωμένων διοικητικών αποφάσεων, συμβάλλοντας άμεσα στην επίτευξη του δείκτη KPI3.

2.12. Βιομηχανικό μετασύμπαν με την χρήση επεξηγηματικής τεχνητής νοημοσύνης για εφαρμογές επιχειρηματικής νοημοσύνης

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Ολοκλήρωση Εικονικού Περιβάλλοντος (VR)

Η τρέχουσα εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τη συσκευή Meta Quest 3 headset. Χρησιμοποιήθηκε το Meta XR All-in-One SDK (έκδοση 69.0.1), ένα ολοκληρωμένο πακέτο που ενσωματώνει τις τελευταίες εκδόσεις όλων των Meta XR SDKs. Αυτό το SDK παρέχει βασικά εργαλεία για την ανάπτυξη εφαρμογών Μικτής Πραγματικότητας, δηλαδή (Εικονικής και Επαυξημένης Πραγματικότητας), σε συνδυασμό με την πλατφόρμα Unity Real-Time Development (έκδοση 2022.3.23f1). Η εφαρμογή Meta Quest Link χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση του headset Meta Quest 3 με τον προσωπικό υπολογιστή που τρέχει τη πλατφόρμα Unity 3D. Ο συνδυασμός του παραπάνω υλικού και λογισμικού επιλέχθηκε για την κατασκευή του εικονικού περιβάλλοντος και την υλοποίηση των λειτουργιών VR λόγω της συμβατότητας, ευελιξίας, του ανοιχτού κώδικα υλικού και της δυνατότητας εξαγωγής εκτελέσιμων αρχείων εφαρμογής συμβατών με τα περισσότερα λειτουργικά συστήματα.

Η εφαρμογή αναπτύχθηκε ως αυτόνομη εκτελέσιμη εφαρμογή Android μέσα στη συσκευή Meta Quest 3. Το χτίσιμο της εφαρμογής έγινε δυνατό μέσω της σύνδεσης της συσκευής Head Mounted Display (HMD) με τον υπολογιστή μέσω καλωδίου Usb3.0 τύπου-C. Μετά τη σύνδεση, η εφαρμογή που δημιουργήθηκε από το περιβάλλον του Unity 3D, χτίστηκε και εξήχθη στον τοπικό SSD σκληρό δίσκο της συσκευής. Ωστόσο, λόγω των περιορισμών στην επεξεργαστική ισχύ και τη χαμηλή διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής Meta Quest 3, καθώς και της υπερθέρμανσης που προκαλείται κατά τη φόρτιση της συσκευής ενώ εκτελείται η εφαρμογή στη φάση της επιτόπιας μελέτης, τόσο οι δοκιμές εργαστηρίου όσο και πεδίου πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή να εκτελείται σε προσωπικό υπολογιστή και να μεταδίδεται η έξοδος της οθόνης στο HMD.

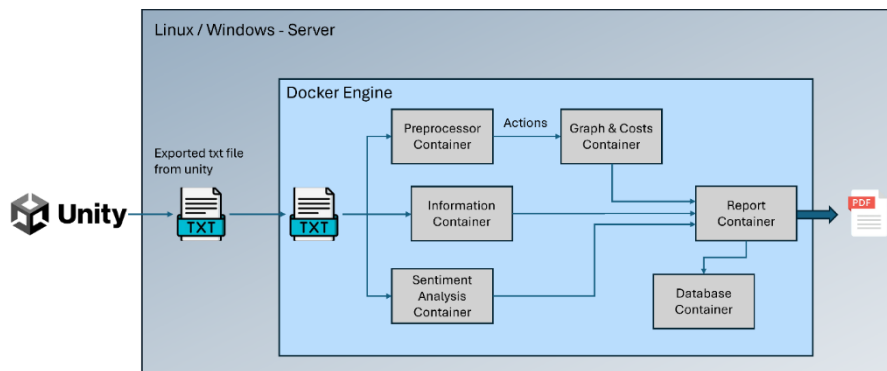
Συμπερασματικά, το σύστημα VR που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και αναπτύχθηκε για τη φάση δοκιμών, μπορεί να εκτελεστεί τόσο σε προσωπικούς υπολογιστές όσο και σε αυτόνομες συσκευές Meta Quest 3. Τέλος, η επιτόπια μελέτη έδειξε ότι το σύστημα VR μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί και να ενσωματωθεί στον βιομηχανικό χώρο.

Ολοκλήρωση Πυρήνα (CORE)

Το σύστημα του Core αποτελείται από επιμέρους υπό-συστήματα, κυρίως Python scripts, τα οποία λειτουργούν σε αλληλουχία ώστε να δημιουργηθεί η τελική έκδοση της ανάλυσης του εκπαιδευόμενου. Το περιβάλλον της Unity 3D δημιουργεί, και παρέχει στο σύστημα του Core, ένα αρχείο τύπου txt το οποίο περιέχει κωδικοποιημένα της ερωτήσεις και τις απαντήσεις του εκπαιδευόμενου, σχετικά με την εμπειρία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, σε αυτό περιέχονται πληροφορίες σχετικά με την ακολουθία των κινήσεων που πραγματοποίησε ο χρήστης κατά το σενάριο εκπαίδευσης.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 49 το αρχείο txt της Unity δίνεται στον server που εκτελείται το σύστημα μας. Συγκεκριμένα, το Core έχει σχεδιαστεί σε μηχανή Docker ώστε να μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικού τύπου λογισμικά χωρίς περιορισμούς. Ταυτόχρονα, με αυτό τον τρόπο η εγκατάσταση του συγκεκριμένου μέρους αποτελεί πλέον μία εύκολη διαδικασία, με μόνα προ-απαιτούμενα την εγκατάσταση του Docker στον εκάστοτε server αλλά και την πρόσβαση στα αντίστοιχα αρχεία (π.χ. αρχεία docker και python).

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 49 Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής της Τελικής Έκδοσης του Core

Αφού εκτελεστεί το Core, πρώτα ανοίγει ο container “information”, ο οποίος λαμβάνει από την χρήση (χρήστη του Core όχι του εκπαιδευόμενου) δεδομένα σχετικά με των εκπαιδευόμενο, ώστε να γνωρίζει το σύστημα σε ποιον αντιστοιχεί το συγκεκριμένο αρχείο της Unity. Το συγκεκριμένο, όπως και όλα τα μέρη του Core, δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον και ο χρήστης πληκτρολογεί τα δεδομένα που του ζητούνται στον terminal. Οι πληροφορίες που παρέχονται είναι το ID του εργαζόμενου, ημερομηνία, η ώρα έναρξης και λήξης της εκπαίδευσης.

Στον container “preprocessor” επιτελείται η διαδικασία αναγνώρισης των ενεργειών του εργαζόμενου. Αξιοποιώντας την πληροφορία από το αρχείο txt, τα συνβάντα στο εικονικό περιβάλλον μεταφράζονται σε ενέργειες. Παράγεται τελικά μια ακολουθία με τις ενέργειες που έκανε ο χρήστης κατά τη διάρκεια του σεναρίου εκπαίδευσης.

Η ακολουθία ενεργειών που έχει παραχθεί από τον preprocessor τροφοδοτείται στον container “Graphs and Costs”. Εκεί πραγματοποιείται η ανάλυση της απόδοσης του χρήστη, χρησιμοποιώντας το γράφο και τη συνάρτηση κόστους και παράγεται το κόστος της ακολουθίας ενεργειών. Στη συνέχεια παράγεται το συνολικό σκορ του εργαζόμενου συγκρίνοντας το χρόνο εκτέλεσης του σεναρίου και το κόστος με τις βέλτιστες τιμές τους, καθώς και τα επιμέρους σκορ για τις διαφορετικές κατηγορίες ενεργειών.

Τέλος στον container “Report” συνδυάζονται τα αποτελέσματα που παράχθηκαν από τον Graphs and Costs Container και τον Sentiment Analysis Container με τα στοιχεία του χρήστη από τον Information Container και παράγεται η τελική αναφορά. Η αναφορά περιέχει τις μετρικές αξιολόγησης και το συνοδευτικό κείμενο που παράγεται αυτόματα από Μεγάλο Γλωσσικό Μοντέλο (LLM).

Τέλος τα αποτελέσματα από κάθε εκτέλεση του σεναρίου εκπαίδευσης, καθώς και τα στοιχεία του χρήστη αποθηκεύονται στον container “Database”. Όταν εκτελείται το σενάριο εκπαίδευσης από χρήστη για τον οποίο υπάρχει ιστορικό στο database, παρέχεται στην αναφορά σύγκριση των μετρικών αξιολόγησής του με τις καλύτερες που έχει πετύχει.

```
Grab: Relay position (0.17, 0.01, 0.20) # Relay : Τοποθετώ
Grab: Safety position (-0.08, 0.04, 0.30) # Safety : Παίρνω
Drop: Safety position (0.13, 0.03, 0.19)
Grab: Safety position (0.13, 0.03, 0.19) # Safety : Τοποθετώ
Grab: Led position (-0.12, 0.00, 0.30) # Led : Παίρνω
Drop: Led position (0.09, 0.02, 0.20)
Grab: Led position (0.09, 0.02, 0.20) # Led : Τοποθετώ
Grab: ScrewDriver position (1.29, -6.28, 41.61) # ScrewDriver : Παίρνω
Drop: Switch position (0.23, 0.04, 0.22)
Screwed : Switch # Switch , ScrewDriver : Βιδώνω
Drop: Relay position (0.19, 0.02, 0.22)
Screwed : Relay # Relay , ScrewDriver : Βιδώνω
Drop: Safety position (0.14, 0.04, 0.22)
Screwed : Safety # Safety , ScrewDriver : Βιδώνω
Drop: Led position (0.10, 0.00, 0.22)
Screwed : Led # Led , ScrewDriver : Βιδώνω
Drop: ScrewDriver position (1.29, -6.28, 41.61)
Grab: ScrewDriver position (1.29, -6.28, 41.61) # ScrewDriver : Αφήνω
Grab: WireStripper position (-0.24, 0.00, 0.70) # WireStripper : Παίρνω
Cut cable neutral # neutral , WireStripper : Κόβω
Cut cable phase # phase , WireStripper : Κόβω
Strip cable phase # phase , WireStripper : Απογυμνώνω
Grab: WireStripper position (-0.24, 0.00, 0.70) # WireStripper : Παίρνω
Strip cable neutral # neutral , WireStripper : Απογυμνώνω
Grab: WireStripper position (-0.24, 0.00, 0.70) # WireStripper : Παίρνω
```

Εικόνα 50 Απόσπασμα από αρχείο txt που έχει παραχθεί από τη Unity μετά από εκτέλεση του σεναρίου εκπαίδευσης. Φαίνονται οι κινήσεις που εκτέλεσε ο εκπαιδευόμενος στο εικονικό περιβάλλον.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

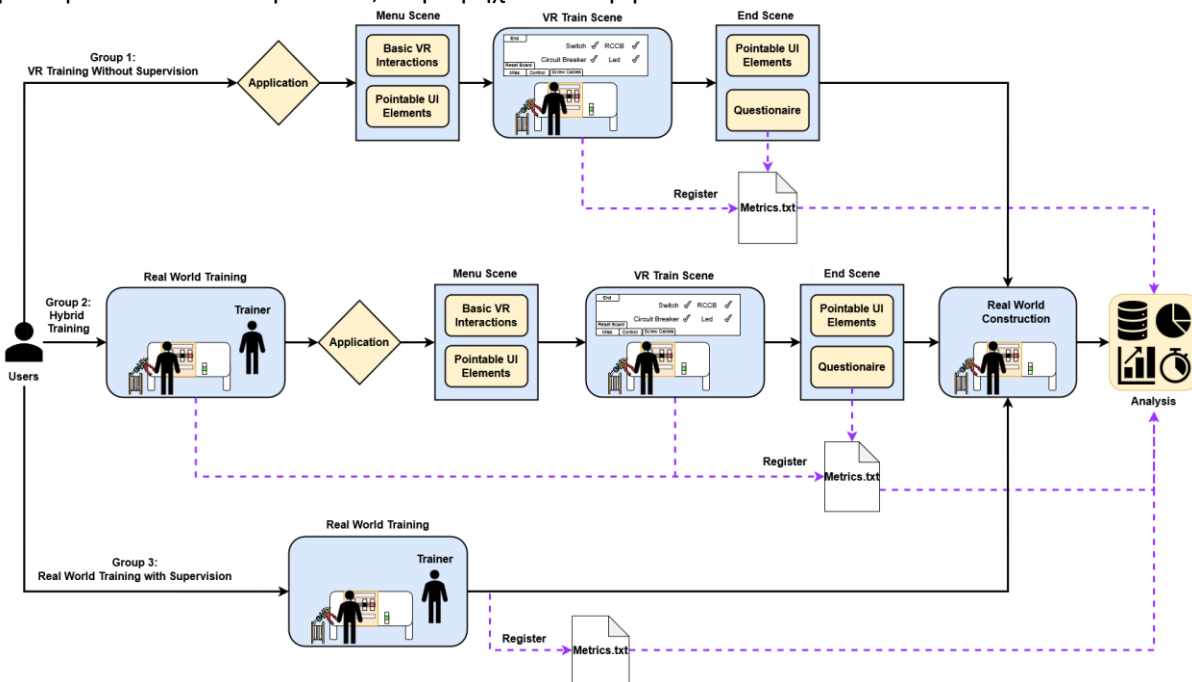
Σενάριο 1: Δοκιμή στο εργαστήριο

Η εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας αξιολογήθηκε ως προς τη χρηστικότητα και τη δυνατότητα αξιοποίησής της ως επικουρικό εργαλείο εκπαίδευσης, μέσα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου. Στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές στρατηγικές εκπαίδευσης, με τη συμμετοχή συνολικά 60 τελικών χρηστών, ηλικίας 19 έως 60 ετών. Οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν ισόποσα σε τρεις ομάδες των 20 ατόμων, καθεμία από τις οποίες εκπαιδεύτηκε με διαφορετική προσέγγιση:

1. Η πρώτη ομάδα εκπαιδεύτηκε αποκλειστικά μέσω της εφαρμογής εικονικής πραγματικότητας.
2. Η δεύτερη ομάδα ακολούθησε την υβριδική μέθοδο, κατά την οποία ένας εκπαιδευτής παρέχει αρχικά καθοδήγηση, ενώ η εμπάθυνση και ολοκλήρωση της εκπαίδευσης πραγματοποιήθηκε με χρήση της εφαρμογής.
3. Η τρίτη ομάδα εκπαιδεύτηκε με τον παραδοσιακό τρόπο, αποκλειστικά από τον εκπαιδευτή.

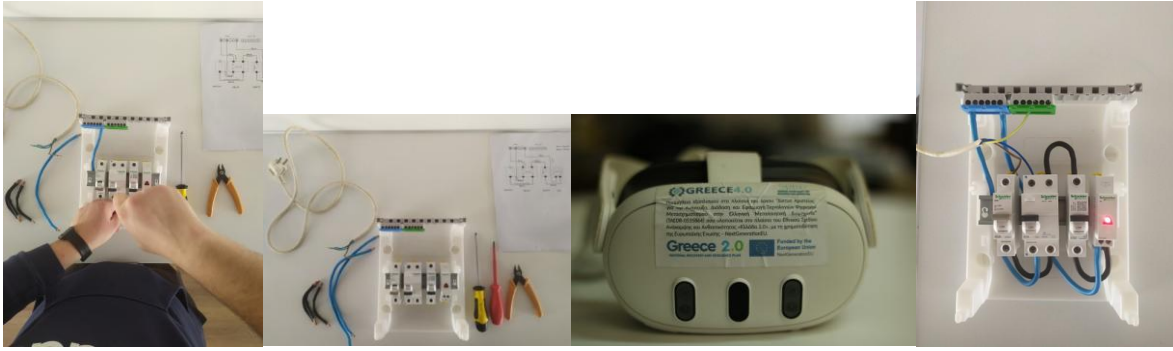
Στόχος της εκπαιδευτικής διαδικασίας και της πειραματικής μελέτης ήταν οι εκπαιδευόμενοι να αποκτήσουν τις δεξιότητες για την κατασκευή ενός εργοστασιακού ηλεκτρικού πίνακα γενικού τύπου, αποτελούμενου από τέσσερα ηλεκτρονικά στοιχεία. Μέσω των μετρικών που καταγράφηκαν τόσο κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης όσο και κατά την κατασκευή του πίνακα στον πραγματικό κόσμο, διαπιστώθηκαν σημαντικά ευρήματα.

Η υβριδική μέθοδος οδήγησε σε μειωμένα λάθη από τους συμμετέχοντες και ταυτόχρονα περιορίσε αισθητά τον χρόνο που απαιτήθηκε από τον εκπαιδευτή. Παρότι η μελέτη διεξήχθη σε εργαστηριακό περιβάλλον, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ενσωμάτωση εκπαιδευτικών εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας, όπως το υπό εξέταση σύστημα, μπορεί να συμβάλει σε πιο αποτελεσματικά και βιώσιμα εκπαιδευτικά μοντέλα, σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.



Εικόνα 51 Οι τρεις μέθοδοι δοκιμής της λύσης

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

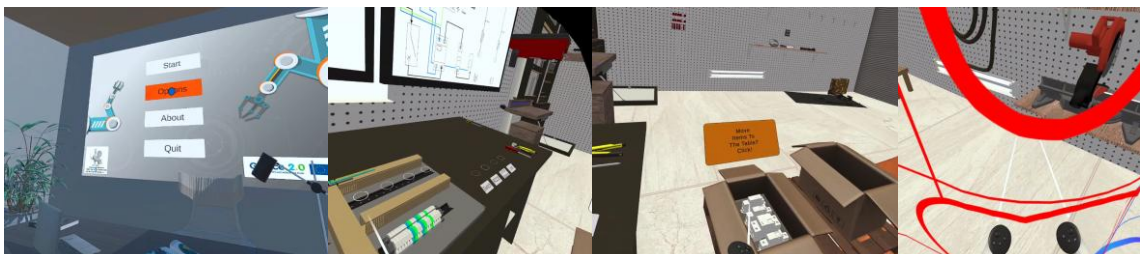
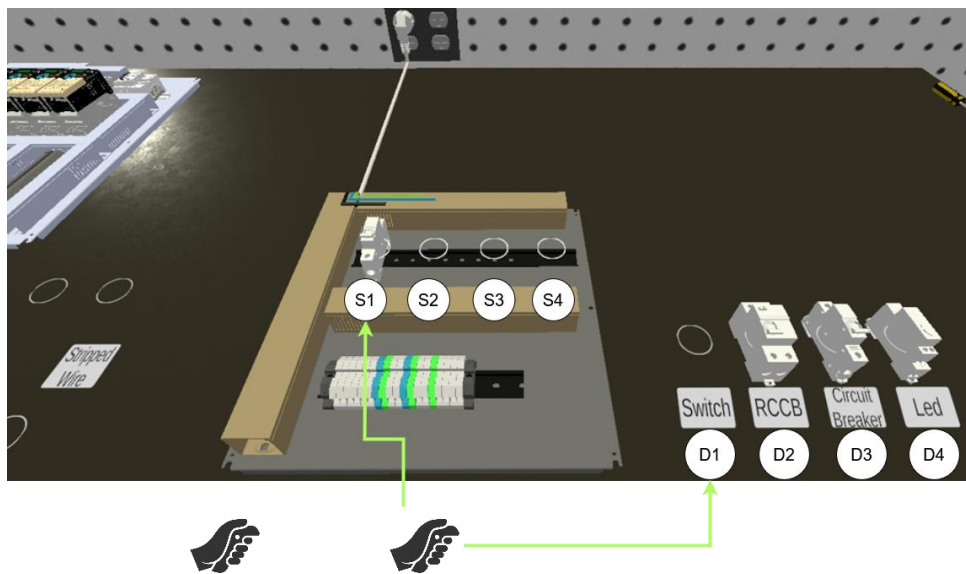


Εικόνα 52 Εικόνες από τα στάδια εφαρμογής του σεναρίου δοκιμής

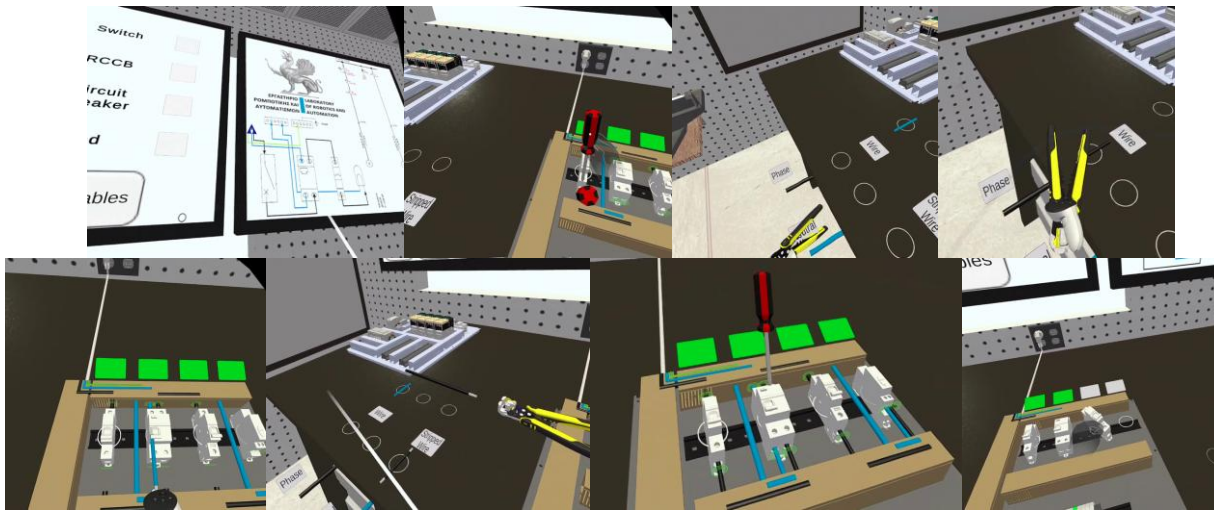
Η πειραματική εργαστηριακή μελέτη περιλάμβανε ανθρώπους στην έρευνα. Η έγκριση όλων των ηθικών και πειραματικών διαδικασιών και πρωτοκόλλων χορηγήθηκε από την Επιτροπή Ηθικής και Δεοντολογίας της Έρευνας.

Στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής του έργου, πραγματοποιήθηκε εκπαιδευτική παρέμβαση με χρήση Εικονικής Πραγματικότητας (VR) σε πραγματικό εργασιακό περιβάλλον, συγκεκριμένα σε μονάδα παραγωγής μικρού βιομηχανικού χαρακτήρα. Στόχος ήταν να εξεταστεί η δυνατότητα αξιοποίησης του VR για την ενίσχυση της κατανόησης και της εκτέλεσης τεχνικών καθηκόντων από τους εργαζόμενους, με επίκεντρο την ασφάλεια, τη διαδικασία και τη λειτουργικότητα.

Η επιλεγμένη θεματική για το σενάριο χρήσης αφορούσε τη συνδεσμολογία ηλεκτρολογικού πίνακα γενικού τύπου. Η επιλογή έγινε με βάση τη σχετική τεχνική πολυπλοκότητα της διαδικασίας, την ανάγκη ακρίβειας, καθώς και την ύπαρξη σαφούς σειράς ενεργειών που είναι δυνατό να αποδοθούν σε εικονικό περιβάλλον.



Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 53 Εικόνες από την ολοκλήρωση του σεναρίου στο VR

Σενάριο 2: Δοκιμή στην βιομηχανία

Οι συμμετέχοντες-εργαζόμενοι παρακολούθησαν αρχικά μια εισαγωγική ενημέρωση σχετικά με το VR, τη χρήση του εξοπλισμού (γυαλιά και χειριστήρια) και τους στόχους της εκπαιδευτικής εμπειρίας. Κατόπιν, οδηγήθηκαν στο σενάριο, όπου μέσω της εφαρμογής είχαν τη δυνατότητα να εκτελέσουν βήμα προς βήμα τις απαιτούμενες ενέργειες συνδεσμολογίας ακολουθώντας τις οδηγίες.

Η διαδικασία υποστηριζόταν από ενσωματωμένες επεξηγήσεις, οπτική καθοδήγηση και διαδοχικά βήματα που ενεργοποιούνταν δυναμικά ανάλογα με την πρόοδο του χρήστη. Η εφαρμογή περιλάμβανε επίσης διαγνωστικό έλεγχο λαθών, επιτρέποντας στον χρήστη να επαναλάβει συγκεκριμένα σημεία εφόσον απαιτούνταν. Η εκπαιδευτική εμπειρία συνοδεύτηκε από παρατήρηση της χρήσης, καταγραφή απόδοσης και συνεντεύξεις, ώστε να κατανοηθεί πλήρως η αλληλεπίδραση των εργαζομένων με την τεχνολογία, τα οφέλη, οι προκλήσεις και οι προτάσεις βελτίωσης.

Κάθε συμμετέχων που ολοκληρώνει την εκπαιδευτική διαδικασία, μεταφέρεται σε διαφορετικό εικονικό περιβάλλον (δωμάτιο ανατροφοδότησης) όπου καλείται να απαντήσει σύντομες ερωτήσεις με 5-βάθμια κλίμακα Likert. Μετά το πέρας αυτού του σταδίου κάθε συμμετέχων συνοδεύεται από τον υπεύθυνο των συνεντεύξεων, όπου και ακολουθεί μια συνέντευξη με στόχο την καταγραφή της εμπειρίας χρήσης.



Εικόνα 54 Εικόνες από το πόστο στη βιομηχανία

2.13. Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Το παρόν παραδοτέο αφορά την ολοκλήρωση και εγκατάσταση πιλοτικού συστήματος φορητής καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθηκευτικούς χώρους, βασισμένου στη χρήση μη επανδρωμένης εναέριας πλατφόρμας και τεχνικών υπολογιστικής όρασης. Ο κύριος στόχος του πιλοτικού συστήματος είναι η διερεύνηση της τεχνικής εφικτότητας και της λειτουργικής αξίας μιας εναέριας προσέγγισης για την υποστήριξη διαδικασιών απογραφής και καταμέτρησης αποθεμάτων σε περιβάλλοντα αποθήκης.

Το σύστημα σχεδιάστηκε ως proof-of-concept και όχι ως πλήρως βιομηχανικό προϊόν. Η έμφαση δόθηκε στη λειτουργική ολοκλήρωση, στη φορητότητα και στη δυνατότητα ταχείας εγκατάστασης, αποφεύγοντας πολύπλοκες ή μόνιμες παρεμβάσεις στον χώρο. Παράλληλα, υιοθετήθηκε σταδιακή προσέγγιση ανάπτυξης, με σαφή διάκριση μεταξύ φάσης προσομοίωσης και φάσης πιλοτικής εφαρμογής.

Η ανάπτυξη των βασικών αλγορίθμων του συστήματος πραγματοποιήθηκε αρχικά σε περιβάλλον προσομοίωσης. Η επιλογή της προσομοίωσης ως πρώτου σταδίου ανάπτυξης επέτρεψε την απομόνωση και ανάλυση κρίσιμων παραμέτρων, όπως η ακρίβεια ανίχνευσης αντικειμένων, η ροή οπτικών δεδομένων και η συμπεριφορά του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού και χωρικής διάταξης. Στο στάδιο αυτό, αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν αλγόριθμοι υπολογιστικής όρασης για την ανίχνευση και αναγνώριση αντικειμένων αποθέματος. Η προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση και ρύθμιση των μοντέλων, καθώς και για την αξιολόγηση της γενικής αρχιτεκτονικής του συστήματος πριν τη μετάβασή του σε πραγματικές συνθήκες.

Η χρήση προσομοίωσης μείωσε σημαντικά το κόστος και τον κίνδυνο δοκιμών, ενώ παρείχε τη δυνατότητα επαναληψιμότητας των πειραμάτων και συστηματικής σύγκρισης διαφορετικών ρυθμίσεων και σεναρίων λειτουργίας. Μετά την ολοκλήρωση της φάσης προσομοίωσης, το σύστημα μεταφέρθηκε σε πιλοτική υλοποίηση σε πραγματικό περιβάλλον. Η μετάβαση αυτή πραγματοποιήθηκε με στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των αλγορίθμων σε πραγματικά δεδομένα εικόνες, καθώς και τη διερεύνηση πρακτικών περιορισμών που δεν μπορούν να αναπαραχθούν πλήρως σε προσομοίωση.

Η πιλοτική υλοποίηση σχεδιάστηκε ώστε να αποτελεί ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ αμιγώς θεωρητικής ανάπτυξης και πλήρους αυτοματοποίησης. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε αρχιτεκτονική όπου η εναέρια πλατφόρμα λειτουργεί κυρίως ως φορέας συλλογής δεδομένων, ενώ η κύρια επεξεργασία πραγματοποιείται σε εξωτερικό υπολογιστικό σύστημα.

Ως εναέρια πλατφόρμα του πιλοτικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε το DJI Mini 2, ένα εμπορικά διαθέσιμο drone μικρού μεγέθους και βάρους. Η επιλογή της συγκεκριμένης πλατφόρμας βασίστηκε σε κριτήρια όπως:

- μικρό φυσικό αποτύπωμα και περιορισμένο βάρος,
- σταθερότητα πτήσης,
- καταλληλότητα για πτήσεις σε εσωτερικούς χώρους,
- ευκολία χειρισμού και ασφάλεια λειτουργίας.

Το DJI Mini 2 χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ως μέσο λήψης και μετάδοσης οπτικών δεδομένων, χωρίς τροποποίηση του υλικού του. Η ενσωματωμένη κάμερα παρείχε ζωντανή ροή εικόνας, η οποία μεταφερόταν σε εξωτερικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 55 Το DJI Mini 2 χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των καταμετρήσεων

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Η επεξεργασία των οπτικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικό υπολογιστικό σύστημα, όπου εκτελούνταν αλγόριθμοι ανίχνευσης αντικειμένων βασισμένοι σε βαθιά νευρωνικά δίκτυα τύπου YOLO. Η επιλογή εξωτερικής επεξεργασίας επέτρεψε τη χρήση ισχυρότερων υπολογιστικών πόρων και διευκόλυνε την ταχεία πειραματική αξιολόγηση διαφορετικών μοντέλων και παραμέτρων. Οι αλγόριθμοι εκπαιδεύτηκαν ώστε να αναγνωρίζουν αντικείμενα που απαντώνται σε τεχνικές αποθήκες, όπως πένσες, γερμανικά κλειδιά και καρούλια συγκόλλησης (solder spools). Η επιλογή αυτών των κατηγοριών έγινε ώστε να καλύπτεται εύρος σχημάτων, μεγεθών και υλικών, επιτρέποντας την αξιολόγηση της προσαρμοστικότητας του συστήματος σε ετερογενή αποθέματα.

Ο έλεγχος του drone πραγματοποιήθηκε με χειροκίνητο ή ημι-χειροκίνητο τρόπο, από χειριστή, ακολουθώντας προκαθορισμένες διαδρομές πτήσης εντός του χώρου. Ο άνθρωπος παρέμεινε συνεχώς στον βρόχο ελέγχου (human-in-the-loop), διασφαλίζοντας την ασφάλεια της λειτουργίας και τη συμμόρφωση με τους περιορισμούς του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η επιλογή αυτή επέτρεψε τη συγκέντρωση της αξιολόγησης στους αλγορίθμους αντίληψης και καταμέτρησης, χωρίς την πρόσθετη πολυπλοκότητα πλήρως αυτόνομων μηχανισμών πλοήγησης, οι οποίοι αποτελούν αντικείμενο μελλοντικής εξέλιξης.

Οι δοκιμές του πιλοτικού συστήματος πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον, το οποίο προσομοίωνε βασικά χαρακτηριστικά αποθηκευτικού χώρου. Το περιβάλλον αυτό παρείχε τη δυνατότητα ελεγχόμενης διαμόρφωσης της χωρικής διάταξης και των συνθηκών λειτουργίας. Ιδιαίτερη σημασία είχε η δυνατότητα μεταβλητού φωτισμού, η οποία αξιοποιήθηκε για τη δοκιμή του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες φωτεινότητας. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με ομοιόμορφο φωτισμό, μειωμένο φωτισμό και συνθήκες με τοπικές σκιές, προσομοιώνοντας καταστάσεις που συναντώνται συχνά σε πραγματικές αποθήκες. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης σε μεταβολές φωτισμού.

Η εγκατάσταση του πιλοτικού συστήματος δεν απαιτήσε μόνιμες παρεμβάσεις στον χώρο. Η λειτουργία βασίστηκε αποκλειστικά στη φορητή εναέρια πλατφόρμα και στον εξωτερικό υπολογιστή, επιτρέποντας ταχεία ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του συστήματος. Η διαδικασία αυτή ενισχύει τη φορητότητα και καθιστά το σύστημα κατάλληλο για περιστασιακή χρήση σε διαφορετικούς χώρους.

Το ολοκληρωμένο πιλοτικό σύστημα αποδεικνύει την τεχνική εφικτότητα χρήσης εναέριων πλατφορμών σε συνδυασμό με υπολογιστική όραση για την υποστήριξη διαδικασιών καταμέτρησης αποθεμάτων. Παράλληλα, αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα της φορητότητας και της ευελιξίας, καθώς και τους περιορισμούς που σχετίζονται με τον βαθμό αυτονομίας και την εξάρτηση από τον χειριστή.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τα προβλεπόμενα σενάρια χρήσης του πιλοτικού συστήματος, καθώς και τον σχεδιασμό της επίδειξης της λειτουργίας του σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Τα σενάρια αυτά ορίζονται στο πλαίσιο της πιλοτικής φάσης του έργου και αποσκοπούν στην αξιολόγηση της λειτουργικότητας, της ευχρηστίας και της επιχειρησιακής αξίας του συστήματος σε συνθήκες που προσεγγίζουν πραγματικά περιβάλλοντα αποθήκης.

Τα σενάρια χρήσης σχεδιάζονται έτσι ώστε να καλύπτουν βασικές και επεκτάσιμες λειτουργίες καταμέτρησης αποθεμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της πιλοτικής υλοποίησης και τη διατήρηση του ανθρώπου στον βρόχο ελέγχου.

Σενάριο βασικής καταμέτρησης αποθέματος

Στο σενάριο βασικής καταμέτρησης προβλέπεται η καθοδήγηση της εναέριας πλατφόρμας κατά μήκος προκαθορισμένων διαδρομών εντός του αποθηκευτικού χώρου, με στόχο τη συλλογή οπτικών δεδομένων από συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος. Η ζωντανή ροή εικόνας από την κάμερα του drone θα μεταφέρεται σε εξωτερικό υπολογιστικό σύστημα, όπου θα εφαρμόζονται αλγόριθμοι υπολογιστικής όρασης για την ανίχνευση και καταμέτρηση αντικειμένων αποθέματος. Το σενάριο αυτό αποσκοπεί στην επίδειξη της βασικής λειτουργικότητας του συστήματος ως εργαλείου υποστήριξης της διαδικασίας απογραφής.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Σενάριο λειτουργίας υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού

Στο συγκεκριμένο σενάριο προβλέπεται η αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος υπό διαφορετικά επίπεδα φωτισμού. Το εργαστηριακό περιβάλλον θα διαμορφώνεται ώστε να παρέχει μεταβλητές συνθήκες φωτεινότητας, συμπεριλαμβανομένου ομοιόμορφου φωτισμού, μειωμένου φωτισμού και περιοχών με σκίαση. Το σενάριο αυτό αποσκοπεί στην εκτίμηση της ανθεκτικότητας των αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης σε συνθήκες που απαντώνται συχνά σε πραγματικές αποθήκες και στην ανάδειξη των περιορισμών που σχετίζονται με την ποιότητα του φωτισμού.

Σενάριο εστιασμένης καταμέτρησης επιλεγμένων κατηγοριών

Στο σενάριο αυτό προβλέπεται η χρήση του συστήματος για την καταμέτρηση συγκεκριμένων κατηγοριών αντικειμένων, όπως εργαλεία χειρός ή αναλώσιμα υλικά. Ο χειριστής θα κατευθύνει το drone σε επιλεγμένες περιοχές του χώρου, όπου βρίσκονται αποκλειστικά αντικείμενα της ίδιας κατηγορίας. Το σενάριο αποσκοπεί στην αξιολόγηση της δυνατότητας προσαρμογής του συστήματος σε στοχευμένες ανάγκες απογραφής και στη διερεύνηση της ακρίβειας ανίχνευσης όταν το οπτικό πεδίο περιλαμβάνει περιορισμένο αριθμό κατηγοριών.

Σενάριο λειτουργίας με ανθρώπινη καθοδήγηση (human-in-the-loop)

Το συγκεκριμένο σενάριο προβλέπει τη λειτουργία του συστήματος με τον άνθρωπο στον βρόχο ελέγχου. Ο χειριστής θα διατηρεί τον έλεγχο της πτήσης του drone και θα προσαρμόζει τη διαδρομή του σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την οπτική πληροφορία όσο και τα αποτελέσματα της ανίχνευσης. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος και στην ανάδειξη του ρόλου του ως υποστηρικτικού εργαλείου για τον άνθρωπο, και όχι ως πλήρως αυτόνομη λύση.

Σενάριο επίδειξης λειτουργίας και παρουσίασης αποτελεσμάτων

Για την επίδειξη της λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος προβλέπεται η εκτέλεση επιλεγμένων σεναρίων χρήσης σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Τα αποτελέσματα της ανίχνευσης και καταμέτρησης θα παρουσιάζονται σε μορφή οπτικών επισημάνσεων επί της εικόνας, καθώς και συνοπτικών μετρήσεων ανά κατηγορία αντικειμένων.

Στο πλαίσιο της επίδειξης λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος προβλέπεται, πέραν της τεχνικής παρουσίασης των σεναρίων χρήσης, η διεξαγωγή ημι-δομημένων συνεντεύξεων με άτομα που διαθέτουν εμπειρία σε διαδικασίες αποθήκευσης και διαχείρισης αποθεμάτων. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η συλλογή ποιοτικής ανατροφοδότησης σχετικά με τη χρησιμότητα, τη λειτουργικότητα και τη δυνητική ενσωμάτωση του συστήματος σε πραγματικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα. Οι συνεντεύξεις προβλέπεται να πραγματοποιηθούν με επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται σε αποθήκες ή σχετικούς τομείς, όπως υπεύθυνους αποθηκών, τεχνικούς συντήρησης, προσωπικό logistics ή άτομα με εμπειρία σε συστήματα διαχείρισης αποθεμάτων. Η επιλογή των συμμετεχόντων αποσκοπεί στη συλλογή απόψεων από διαφορετικούς ρόλους, ώστε να αποτυπωθεί ένα ευρύ φάσμα αναγκών και προσδοκιών.

Κατά τη διάρκεια των συνεντεύξεων αναμένεται να συζητηθούν ζητήματα που αφορούν τις υφιστάμενες διαδικασίες καταμέτρησης και απογραφής, τα προβλήματα και τους περιορισμούς που αντιμετωπίζουν οι χρήστες στην καθημερινή τους εργασία, καθώς και ο βαθμός στον οποίο ένα σύστημα εναέριας καταμέτρησης θα μπορούσε να προσφέρει προστιθέμενη αξία. Ιδιαίτερη έμφαση αναμένεται να δοθεί σε θέματα όπως ο απαιτούμενος χρόνος για την απογραφή, η ακρίβεια των υφιστάμενων μεθόδων, η ανθρώπινη κόπωση και η διακοπή της κανονικής λειτουργίας της αποθήκης.

Επιπλέον, οι συζητήσεις προβλέπεται να εστιάσουν στον τρόπο με τον οποίο το πιλοτικό σύστημα θα μπορούσε να ενσωματωθεί στις υπάρχουσες ροές εργασίας, στη σχέση του με υφιστάμενα συστήματα διαχείρισης αποθήκης (WMS), καθώς και στις απαιτήσεις εκπαίδευσης και αποδοχής από το προσωπικό.

Τα ποιοτικά δεδομένα που θα προκύψουν από τις συνεντεύξεις αναμένεται να αξιοποιηθούν για τη διαμόρφωση συμπερασμάτων σχετικά με τη δυνητική υιοθέτηση του συστήματος, καθώς και για τον εντοπισμό σημείων βελτίωσης σε επίπεδο λειτουργικότητας, διεπαφής χρήστη και βαθμού αυτοματοποίησης. Παράλληλα, τα ευρήματα θα τροφοδοτήσουν τον σχεδιασμό μελλοντικών εκδόσεων του συστήματος, με έμφαση σε πιο ανθρωποκεντρικές και επιχειρησιακά βιώσιμες λύσεις.

2.14. Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Οι μηχανισμοί προστασίας δεδομένων ολοκληρώθηκαν και δοκιμάστηκαν σε μια τυπική δικτυακή τοπολογία η οποία περιλαμβάνει ένα κεντρικό εξυπηρετητή βασισμένο σε περιβάλλον Linux, δύο κόμβους αιχμής στο αμέσως κατώτερο ιεραρχικά επίπεδο, επίσης βασισμένους σε Linux, αξιοποιώντας ενσωματωμένες διατάξεις Raspberry PI και Kria K24 για την υποστήριξη προγραμματιζόμενου υλικού, καθώς και μια σειρά ενσωματωμένων διατάξεων κόμβων αιχμής περιορισμένων πόρων βασισμένων στο nRF52840 SoC της Nordic. Το Kria K24 τροφοδοτείται από ένα Zynq™ UltraScale+ MPSoC, το οποίο ενσωματώνει επεξεργαστές εφαρμογών διπλού πυρήνα ARM Cortex-A53, πυρήνες ARM Cortex-R5F σε πραγματικό χρόνο και προγραμματιζόμενη λογική FPGA, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο για υπολογιστές αιχμής και βιομηχανικές περιπτώσεις χρήσης IIoT που απαιτούν τόσο ευελιξία όσο και υπολογιστική απόδοση.

Στις ενσωματωμένες διατάξεις που υποστηρίζονται από linux (Raspberry PI, Kria K24) έχουν ολοκληρωθεί όλα τα υποσυστήματα της αρχιτεκτονικής του κόμβου αιχμής, τα οποία επιτρέπουν στον κόμβο να λειτουργήσει με πολλαπλούς ρόλους, υποστηρίζοντας λειτουργίες συλλογής δεδομένων από ετερογενή δίκτυα και πρωτόκολλα, όπως MODBUS, OPC UA, KNX, BACNet, MQTT, CoAP, 6LoWPAN, BLE, τοπική επεξεργασία, αποθήκευση, προώθηση αλλά και πρόσβαση στα δεδομένα αυτά μέσω web τεχνολογιών. Οι δυνατότητες αυτές ολοκληρώνονται μέσω των υποσυστημάτων InfluxDB, nodered και Grafana και εξυπηρετούνται συμβατικά μέσω ενός nginx https server.

Η πιλοτική εφαρμογή του πρωτοκόλλου PQ-EDHOC αξιοποιεί τα δύο κατώτερα επίπεδα της τοπολογίας, με τον κάθε Linux κόμβο αιχμής να λειτουργεί ως σταθμός onboarding και ως PQ-EDHOC Responder, υπεύθυνος για τον έλεγχο ταυτότητας πρόσφατα συνδεδεμένων συσκευών περιορισμένων πόρων μέσω της χειραψίας EDHOC που υλοποιείται με μετακβαντικούς (PQ) κρυπτογραφικούς αλγόριθμους, με στόχο τη δημιουργία ενός αμοιβαία πιστοποιημένου και ασφαλούς καναλιού επικοινωνίας, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση των συσκευών στο αξιόπιστο δίκτυο.

Οι PQ-EDHOC clients υλοποιούνται στο nRF52840 Development Kit (DK) της Nordic Semiconductor, που διαθέτει το nRF52840 SoC. Αυτός ο μικροελεγκτής είναι βελτιστοποιημένος για εφαρμογές εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης και υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα ασύρματων πρωτοκόλλων, συμπεριλαμβανομένων Bluetooth LE, Bluetooth Mesh, Thread, Zigbee, IEEE 802.15.4, ANT και ιδιόκτητες στοιβές 2,4 GHz. Βασίζεται σε επεξεργαστή ARM Cortex-M4 που λειτουργεί στα 64 MHz, με 1 MB Flash και 256 kB μνήμης RAM. Η πλατφόρμα περιλαμβάνει επίσης ειδικά σημεία μέτρησης για την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Αυτοί οι πελάτες ξεκινούν τη χειραψία EDHOC και εκτελούν μετακβαντικές κρυπτογραφικές λειτουργίες εντός των περιορισμών των πόρων επεξεργασίας και μνήμης. Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, όλοι οι υπολογιστές-πελάτες, ανεξάρτητα από τη διεπαφή επικοινωνίας τους, εκτελούν το λειτουργικό σύστημα Zephyr RTOS, υποστηρίζοντας σενάρια ανάπτυξης που αντικατοπτρίζουν πραγματικές βιομηχανικές υλοποιήσεις.

Η στοιβή δικτύου αποτελείται από PQ-EDHOC μέσω CoAP με μεταφορά κατά μπλοκ σε επίπεδο εφαρμογής, πρωτόκολλο User Datagram Protocol (UDP) στο επίπεδο μεταφοράς και Internet Protocol Support Profile (IPSP) στον ρόλο Node, χρησιμοποιώντας το 6LoWPAN που παρέχει συνδεσιμότητα IPv6 μέσω BLE. Για μεγαλύτερα μηνύματα, κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής EDHOC, το CoAP Block-Wise Transfer χρησιμοποιείται για τον κατακερματισμό και την επανασυναρμολόγηση μηνυμάτων αποτελεσματικά σε συνδέσεις χαμηλού εύρους ζώνης.



Εικόνα 56 Dashboard παρακολούθησης θερμοκρασίας και υγρασίας σε ασφαλή υποδομή edge computing

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Η στοίβα 6LoWPAN, αξιοποιεί είτε το Bluetooth Low Energy (BLE) είτε το OpenThread, επιτρέποντας την επίδειξη και αξιολόγηση του PQ-EDHOC σε δύο εξέχοντα σενάρια συνδεσιμότητας που σχετίζονται με βιομηχανικά περιβάλλοντα IoT (IIoT).

1. Bluetooth χαμηλής ενέργειας:

- Χρησιμοποιεί την εγγενή στοίβα BLE του Zephyr με 6LoWPAN πάνω από BLE.
- Προσφέρει επικοινωνία από σημείο σε σημείο με συνδεσιμότητα χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας.

2. Δίκτυο OpenThread:

- Χρησιμοποιεί OpenThread μέσω IEEE 802.15.4 με 6LoWPAN/UDP.
- Επιτρέπει multihop επικοινωνίες και δικτύωση πλέγματος (mesh).

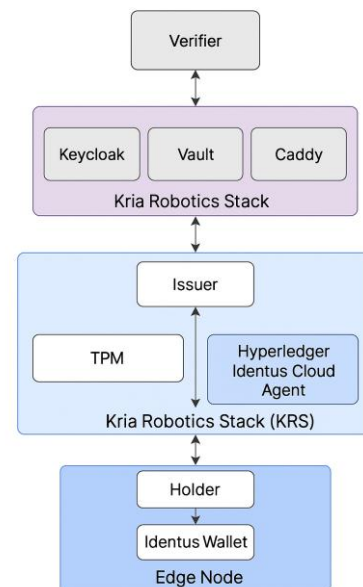
Η στοίβα του PQ-EDHOC έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει επιταχυντές υλικού για τη μετεκβαντική κρυπτογραφία ψηφιακών υπογραφών. Για το σκοπό αυτό η στοίβα είναι μεταφέρσιμη και σε ενσωματωμένο σύστημα MPSoC που περιλαμβάνει FPGA υποδομή για επιτάχυνση. Ποιο συγκεκριμένα, παρέχεται MLDSA (Dilithium Digital Signature) επιταχυντής υλικού ως περιφερειακό πάνω στο δίαυλο επικοινωνίας AXI για Zynq UltraScale+ MPSoC. Πρόκειται για επιταχυντή συσχεδίασης υλικού/λογισμικού όπου κρίσιμες αριθμητικές πράξεις πραγματοποιούνται αποκλειστικά σε υλικό. Πειραματική η δομή αυτή (στοίβα PQ-EDHOC και υποστήριξη MLDSA επιταχυντή) υποστηρίζεται για AMD/Xilinx ZCU 104 evaluation board και για AMD/Xilinx Kria Robotics starter kit board (με Kria Robotics Stack).

Ο Κόμβος αιχμής υποστηρίζει και μια σειρά από μηχανισμούς αυτοπροστασίας οι οποίοι αναλαμβάνουν να προστατέψουν τον κόμβο σε διαφορετικά επίπεδα εστιάζοντας σε κυβερνοεπιθέσεις εγκαθίδρυσης εντός του κόμβου κάποιου κακόβουλου λογισμικού. Εφαρμόζοντας προσέγγιση defense-in-depth η προστασία περιλαμβάνει:

- Αισθητήρα ανίχνευσης κακόβουλα τροποποιημένου λογισμικού firmware/update μέσω ανίχνευσης μη επαληθεύσιμων ψηφιακών υπογραφών του λογισμικού αυτού.
- Αισθητήρα ανίχνευσης κακόβουλων/ανώμαλων ενεργειών εντός του κόμβου (μετά την ολοκλήρωση εγκατάστασης λογισμικού firmware).

Όσον αφορά το πιλοτικό σύστημα αποκεντρωμένης διαχείρισης ταυτότητας αυτό υλοποιήθηκε με γνώμονα την προστασία δεδομένων στον κόμβο αιχμής, λαμβάνοντας υπόψη τις βέλτιστες πρακτικές για το βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT) και τη διαλειτουργικότητα με υπάρχουσες βιομηχανικές υποδομές. Η αρχιτεκτονική του συστήματος διαρθρώνεται σε τρία διακριτά επίπεδα — τον κόμβο αιχμής (Edge Node), το Kria Robotics Stack (KRS) και την υποδομή cloud — με κάθε επίπεδο να έχει σαφώς προσδιορισμένους ρόλους, λειτουργίες και τεχνολογικές υλοποιήσεις. Η ολοκληρωμένη αυτή διάταξη απεικονίζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα αρχιτεκτονικής, το οποίο διευκολύνει την κατανόηση της ροής πληροφορίας και των μηχανισμών ασφαλείας που εφαρμόζονται.

Στο κατώτατο επίπεδο, ο κόμβος αιχμής αποτελεί το σημείο συλλογής και διαχείρισης των διαπιστευτηρίων (VCs) από τη συσκευή χρήστη ή IoT gateway. Η υλοποίηση περιλαμβάνει έναν πράκτορα Holder, υλοποιημένο σε Python, ο οποίος διαχειρίζεται το τοπικό “Identus Wallet” (αποθήκευση VCs σε JSON μορφή). Ο Holder είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία αποδείξεων μηδενικής γνώσης (ZKPs) με βάση τα Selective Disclosure JWT-VCs, απαντώντας σε αιτήματα επαλήθευσης από εξωτερικούς Verifiers, χωρίς αποκάλυψη ευαίσθητων δεδομένων. Η επικοινωνία προστατεύεται με πρωτόκολλα DIDComm v2, ενώ



Εικόνα 57 Αρχιτεκτονικό Διάγραμμα ασφαλούς αποκεντρωμένης διαχείρισης ταυτότητας σε IIoT

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

όλη η ροή δεδομένων περνά από SSH tunnels (Paramiko), ώστε τα διαπιστευτήρια και τα στοιχεία ταυτότητας να μην αποκαλύπτονται ή διαρρέουν στο διαδίκτυο.

Στο ενδιάμεσο επίπεδο, το Kria Robotics Stack (KR260 με TPM) δρα ως ο πυρήνας έκδοσης και ασφαλούς αρχικοποίησης ταυτότητας για κάθε συσκευή. Η χρήση του ενσωματωμένου Trusted Platform Module (TPM) εγγυάται τη δέσμευση των κρυπτογραφικών κλειδιών στο hardware της συσκευής, προσφέροντας hardware root of trust ήδη από το στάδιο onboard της συσκευής. Εδώ εκτελείται ο Issuer Agent, επίσης σε Python, ο οποίος καταχωρεί DID schemas στη Verifiable Data Registry (π.χ. Prism/Cardano), εκδίδει VCs και διασφαλίζει τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις για ακεραιότητα, αδιαβλητότητα και μη αποποίηση ταυτότητας. Το λειτουργικό περιβάλλον βασίζεται στο Ubuntu 22.04 με KRS, εξασφαλίζοντας υποστήριξη για ROS2 και TPM APIs.

Το ανώτατο επίπεδο αποτελείται από την υποδομή cloud, όπου υλοποιούνται οι βασικοί μηχανισμοί αυθεντικοποίησης, εξουσιοδότησης και επαλήθευσης ταυτοτήτων. Το σύστημα βασίζεται σε containerized υπηρεσίες μέσω Docker Compose. Ο Hyperledger Indentus Cloud Agent προσφέρει πλήρως RESTful διεπαφές για την εγγραφή DID, την παρουσίαση και διαχείριση διαπιστευτηρίων, ενώ το Keycloak λειτουργεί ως identity & access management πλατφόρμα, παρέχοντας εκχώρηση JWT tokens, OAuth2/OIDC συμβατότητα και διαχείριση ρόλων/χρηστών. Τα μυστικά των πρακτόρων και τα διαπιστευτήρια διατηρούνται στο HashiCorp Vault, ενώ η ασφαλής πρόσβαση στα endpoints διασφαλίζεται μέσω του Caddy reverse proxy (HTTPS). Ο Verifier Agent επαληθεύει ZKPs, ελέγχει signatures και το revocation status των credentials μέσω Indentus.

Η ροή πληροφορίας μεταξύ των επιπέδων διαμορφώνεται ως εξής: Ο Holder Agent στον κόμβο αιχμής επικοινωνεί με τον Verifier μέσω DIDComm και SSH tunnels, παρουσιάζοντας μόνο τα απολύτως αναγκαία αποδεικτικά στοιχεία. Ο Issuer Agent του Kria δημιουργεί και εκδίδει διαπιστευτήρια με TPM-bound κλειδιά, ενώ ενημερώνει τη Verifiable Data Registry στο cloud για κάθε έκδοση. Όλοι οι agents χρησιμοποιούν socket-based και RESTful επικοινωνία, με υποχρεωτική αυθεντικοποίηση μέσω JWT tokens από το Keycloak. Η τοπική διαχείριση και επεξεργασία των credentials στον κόμβο αιχμής, σε συνδυασμό με το hardware-level security στο Kria, εγγυώνται ότι τα προσωπικά δεδομένα παραμένουν υπό τον έλεγχο του χρήστη και δεν μεταφέρονται σε τρίτους ή το cloud.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Το βασικό σενάριο επίδειξης του πως το πρωτόκολλο PQ-EDHOC υποστηρίζει μια κβαντικά ασφαλή διαδικασία ενσωμάτωσης της συσκευής σε περιβάλλοντα IIoT περιορισμένων πόρων έχει ως εξής:

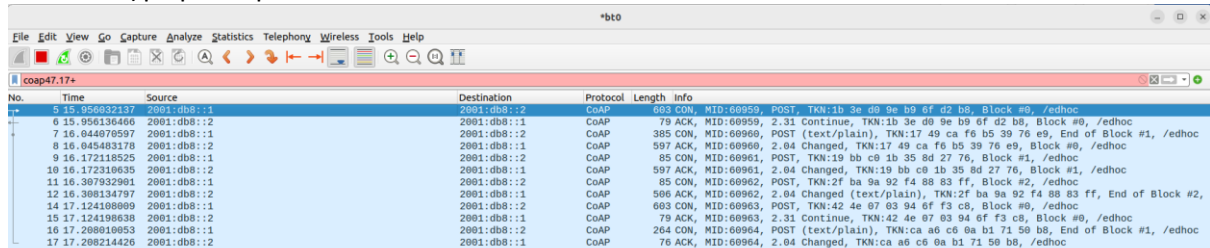
1. **Έλεγχος ταυτότητας συσκευής και ανταλλαγή κλειδιών:** Μια νέα συσκευή συνδέεται στον κόμβο αιχμής (είτε μέσω BLE είτε μέσω OpenThread, ανάλογα με το δίκτυο) και ξεκινά τη διαδικασία ελέγχου ταυτότητας. Το πρωτόκολλο PQ-EDHOC χειρίζεται τη διαδικασία ελέγχου ταυτότητας και ανταλλαγής κλειδιών επαληθεύοντας με ασφάλεια την ταυτότητα της συσκευής και του σταθμού επιβίβασης, χρησιμοποιώντας πιστοποιητικά PQ X509 ή αναγνωριστικά διαπιστευτηρίων για τη μείωση του μεγέθους των μηνυμάτων. Αυτό δημιουργεί ένα κανάλι επικοινωνίας με αμοιβαίο έλεγχο ταυτότητας μεταξύ των δύο κόμβων αιχμής.
2. **Δημιουργία ασφαλούς καναλιού:** Μόλις ολοκληρωθεί η ανταλλαγή κλειδιών, δημιουργείται ένα ασφαλές κανάλι μεταξύ της συσκευής και του σταθμού επιβίβασης μέσω ενός περιβάλλοντος ασφαλείας OSCORE. Αυτό το κανάλι θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για περαιτέρω αλληλεπιδράσεις μεταξύ της συσκευής και του δικτύου (π.χ. μετάδοση δεδομένων αισθητήρα, λήψη ενημερώσεων διαμόρφωσης κ.λπ.).

Η λειτουργία επικυρώθηκε μέσω δοκιμών από άκρο σε άκρο, καλύπτοντας την πλήρη χειραψία PQ-EDHOC, από την ανταλλαγή κλειδιών και την εξαγωγή κλειδιών συνεδρίας έως την ασφαλή μετάδοση μηνυμάτων. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε διάφορες σουίτες κρυπτογράφησης PQ-EDHOC που συνδυάζουν διαφορετικούς μηχανισμούς ενθυλάκωσης κλειδιών ML-KEM με μετακβαντικά σχήματα ψηφιακής υπογραφής, όπως τα ML-KEM-512 και FALCON, αξιολογώντας τόσο τη λειτουργική ορθότητα όσο και την ενεργειακή απόδοση.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

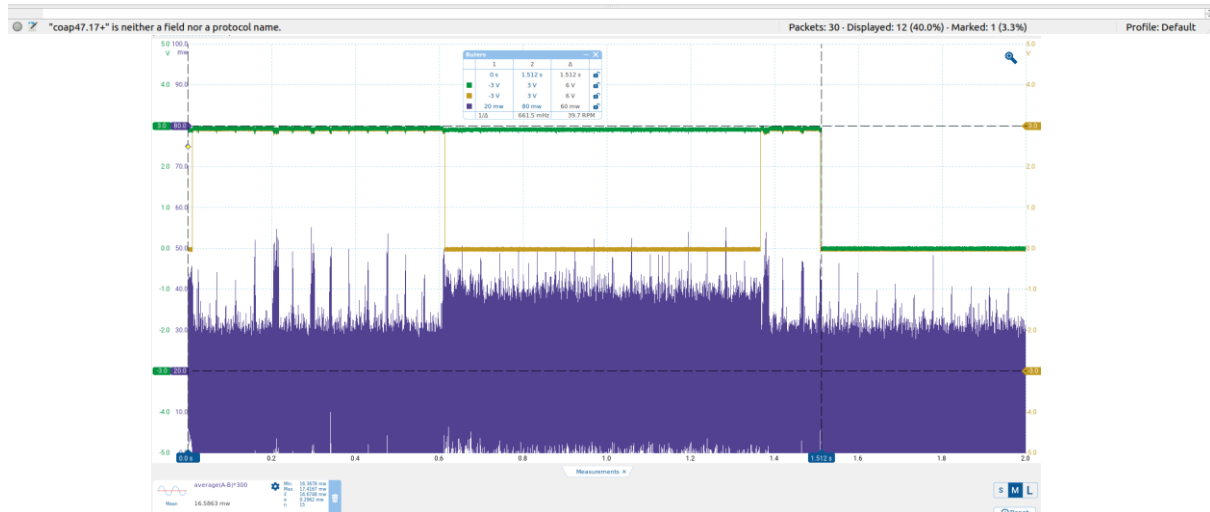
Το σχήμα 2 δείχνει μια πλήρη χειραψία PQ-EDHOC μεταξύ ενός πελάτη που υλοποιείται στο nRF52840 DK και ενός διακομιστή που εκτελείται σε πλατφόρμα βασισμένη σε Linux, επικοινωνώντας μέσω 6LoWPAN πάνω από BLE. Το ίχνος δείχνει τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου σε ένα πραγματικό περιβάλλον περιορισμένης πόρων και επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία του CoAP μηχανισμού μεταφοράς μπλοκ, ο οποίος είναι απαραίτητος για το χειρισμό του κατακερματισμού μηνυμάτων σε IIoT δίκτυα συσκευών περιορισμένων πόρων.

Παράλληλα, το Σχήμα 3 παρουσιάζει το προφίλ ισχύος του πελάτη PQ-EDHOC κατά τη διάρκεια της ίδιας χειραψίας, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με το ενεργειακό αποτύπωμα της διαδικασίας μετακβαντικού ελέγχου ταυτότητας και ανταλλαγής κλειδιών σε συσκευές με περιορισμένους πόρους. Αυτή η ενεργειακή αξιολόγηση είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της πρακτικότητας του PQ-EDHOC σε IIoT συσκευές με μπαταρία.



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
5	15.954932157	2001:db8::1	2001:db8::2	CoAP	603	CON, MID:69950, POST, TKN:1d 3e d9 9e b9 cf d2 b9, Block #0, /edhoc
6	15.956130466	2001:db8::2	2001:db8::1	CoAP	79	ACK, MID:69950, 2.31 Continue, TKN:1b 3e d9 9e b9 cf d2 b9, Block #0, /edhoc
7	16.044970597	2001:db8::1	2001:db8::2	CoAP	385	CON, MID:69960, POST (text/plain), TKN:17 49 ca f6 b5 39 76 e9, End of Block #1, /edhoc
8	16.045483178	2001:db8::1	2001:db8::1	CoAP	597	ACK, MID:69960, 2.04 Changed, TKN:17 49 ca f6 b5 39 76 e9, Block #0, /edhoc
9	16.172118525	2001:db8::1	2001:db8::2	CoAP	85	CON, MID:69961, POST, TKN:19 bb c8 1b 35 8d 27 76, Block #1, /edhoc
10	16.172310635	2001:db8::1	2001:db8::1	CoAP	597	ACK, MID:69961, 2.04 Changed, TKN:19 bb c8 1b 35 8d 27 76, Block #1, /edhoc
11	16.307932981	2001:db8::1	2001:db8::2	CoAP	85	CON, MID:69962, POST, TKN:2f ba 9a 92 f4 88 83 ff, Block #2, /edhoc
12	16.308134797	2001:db8::1	2001:db8::1	CoAP	596	ACK, MID:69962, 2.04 Changed (text/plain), TKN:2f ba 9a 92 f4 88 83 ff, End of Block #2, /edhoc
14	17.124109809	2001:db8::1	2001:db8::2	CoAP	603	CON, MID:69963, POST, TKN:42 4e 07 03 94 0f f3 c8, Block #0, /edhoc
15	17.124109830	2001:db8::1	2001:db8::1	CoAP	79	ACK, MID:69963, 2.31 Continue, TKN:42 4e 07 03 94 0f f3 c8, Block #0, /edhoc
16	17.208010953	2001:db8::1	2001:db8::2	CoAP	264	CON, MID:69964, POST (text/plain), TKN:ca a6 c6 0a b1 71 50 b8, End of Block #1, /edhoc
17	17.208214426	2001:db8::1	2001:db8::1	CoAP	76	ACK, MID:69964, 2.04 Changed, TKN:ca a6 c6 0a b1 71 50 b8, /edhoc

Frame 5: 603 bytes on wire (4824 bits), 603 bytes captured (4824 bits) on interface bt0, id 0
Linux cooked capture v1
Internet Protocol Version 6, Src: 2001:db8::1, Dst: 2001:db8::2
User Datagram Protocol, Src Port: 47138, Dst Port: 5683
Constrained Application Protocol, Confirmable, POST, MID:69959

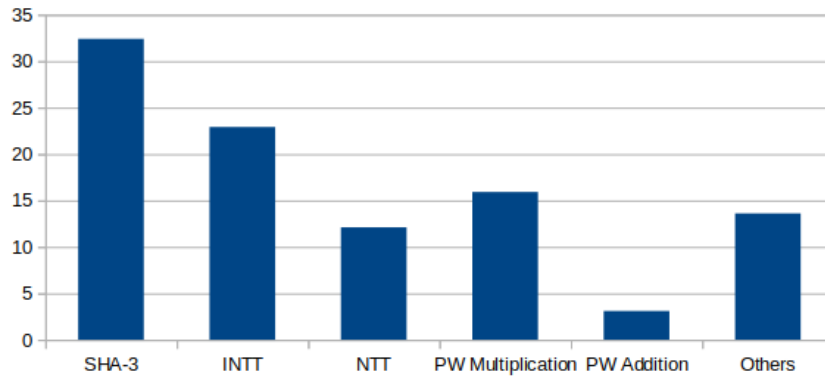


Επιταχυντής Υλικού για Μετακβαντικές Ψηφιακές Υπογραφές MLDSA.

Πραγματοποιώντας το προφίλ απόδοσης του αλγορίθμου μετακβαντικών ψηφιακών υπογραφών MLDSA μπορούμε να διακρίνουμε τα μέρη αριθμητικών πράξεων του αλγορίθμου που χρειάζεται να επιταχυνθούν σε υλικό. Για το σκοπό αυτό κάνουμε το προφίλ του MLDSA στο επίπεδο ασφάλειας V, που είναι το πιο απαιτητικό επίπεδο ασφάλειας ως προς τις πράξεις, και μπορούμε να δούμε τα πιο χρονοβόρα μέρη του αλγορίθμου στο Σχήμα. Η στήλη «Others» αναφέρεται σε επιμέρους συνιστώσες όπως Sampler, Expansion, κ.λπ. Παρότι η συνάρτηση κατακερματισμού Keccak (ως μέρος του SHAKE256 που χρησιμοποιείται στο MLDSA) είναι το πιο συχνά εκτελούμενο τμήμα του αλγορίθμου με 32%, ο χρόνος εκτέλεσης του πολλαπλασιασμού πινάκων με NTT (Number Theoretic Transform)—που είναι περίπου το άθροισμα των χρόνων INTT (αντίστροφου NTT), NTT, Pointwise-Multiplication (PWM) και PW-Addition (PWA)—είναι περίπου 54%, ποσοστό σημαντικά μεγαλύτερο από τη χρήση του Keccak.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Επομένως, η προσπάθειά μας επικεντρώνεται στην επιτάχυνση σε υλικό αυτού του μέρους του αλγορίθμου, καθώς εμφανίζεται σε όλες τις λειτουργίες του MLDSA σχήματος δλδ στη Γέννηση κλειδιών, στην ψηφιακή υπογραφή και στην επιβεβαίωση της ψηφιακής υπογραφής.



Εικόνα 58 Το ψηφιακό προφίλ ταχύτητας του MLDSA security-level 5 μέσω του Vitis-profiler

Ως εκ τούτου, ο επιταχυντής υλικού που υλοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου πραγματοποιεί την πράξη του πολλαπλασιασμού πινάκων πολυωνύμων με τη χρήση NTT (NTT πολλαπλασιαστής πολυωνύμων) καλύπτοντας έτσι τις συναρτήσεις του πίνακα προφίλ: NTT, INTT, PW Multiplication (Pointwise Multiplication Montgomery).

Για την υλοποίηση του πολλαπλασιαστή σε υλικό, επανασχεδιάζουμε τους αλγορίθμους μετατροπής πολυωνύμων στην NTT αναπαράστασή τους και της μετατροπής από την NTT αναπαράσταση στην κανονική τους αναπαράσταση ώστε να είναι εύκολα υλοποιήσιμοι σε υλικό FPGA με στόχο την τροφοδότηση τους σε εργαλεία High Level Synthesis (όπως το AMD/Xilinx Vitis HLS) τα οποία από κώδικα C/C++ και OpenCL παράγουν περιγραφές υλικού που μπορούν να κατέβουν σε FPGA. Ο Αλγόριθμος του NTT πολλαπλασιαστή πολυωνύμων όπως υλοποιήθηκε παρουσιάζεται παρακάτω. Έχουμε μια εισόδο πίνακα μιας διάστασης L με πολυώνυμα βαθμού N (που παρουσιάζονται σαν διάνυσματα N συντεταγμένων) καθώς και μια δεύτερη εισόδο με δυδιάστατο $K \times L$ πίνακα N βαθμού πολυωνύμων. Η πράξη που πραγματοποιείται είναι ο πολλαπλασιασμός πίνακα $K \times L$ με διάνυσμα L modulo X^n+1 .

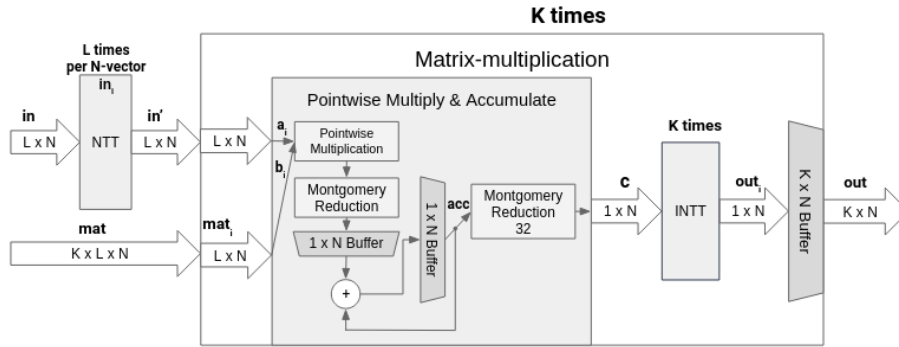
```
Input  $L \times N$  polynomial  $in(x) \in \mathbb{Z}_q[X]/\langle X^n + 1 \rangle$   
Input  $K \times L \times N$  polynomial  $mat(x) \in \mathbb{Z}_q[X]/\langle X^n + 1 \rangle$   
Output  $K \times N$  polynomial  $out(x) \in \mathbb{Z}_q[X]/\langle X^n + 1 \rangle$   
#pragma HLS dataflow  
NTT:  
for ( $i = 0; i < L; i ++$ ) do  
     $in'_i \leftarrow NTT(in_i)$   
end for  
PWM_INTT:  
for ( $i = 0; i < K; i ++$ ) do  
     $c \leftarrow Pointwise\_acc(mat_i, in')$   
     $out_i \leftarrow INTT(c)$   
end for  
return  $out(x)$ 
```

Ο κώδικας του παραπάνω πολλαπλασιαστή αναδιατάσσεται σε δύο ενότητες για τον μεταγλωττιστή HLS: την ενότητα NTT και την ενότητα PWM_INTT, η οποία περιλαμβάνει όλους τους υπόλοιπους υπολογισμούς. Αυτός ο τύπος ιεραρχίας βοηθά τον μεταγλωττιστή HLS να ελαχιστοποιήσει τη μνήμη που απαιτείται από το INTT και τη μείωση Montgomery πολλαπλασιαστή (που πραγματοποιεί τον πολλαπλασιασμό μεταξύ 2 συντεταγμένων των εμπλεκόμενων πολυωνύμων modulo q). Στη συνάρτηση ανώτερης ιεραρχίας μας εφαρμόζεται το pragma dataflow, το οποίο ενεργοποιεί pipelining σε επίπεδο εργασιών (task-level), επιτρέποντας σε συναρτήσεις και βρόχους να επικαλύπτουν τη λειτουργία τους, αυξάνοντας την ταυτόχρονη εκτέλεση (concurrency) της υλοποίησης RTL σε υλικό και βελτιώνοντας τον συνολικό ρυθμό throughput του σχεδιασμού.

Αρχικά, η πράξη NTT εφαρμόζεται L φορές στο εισερχόμενο L διάνυσμα, για κάθε διάνυσμα. Τα NTT και INTT λαμβάνουν ως είσοδο ένα διάνυσμα N συντελεστών και παράγουν ως έξοδο ένα διάνυσμα N

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

συντελεστών στο πεδίο NTT και στο πεδίο της κανονικής αριθμητικής, αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες μονάδες έχουν υλοποιηθεί για αρχιτεκτονική Radix-2 και έχουν αναλυθεί και βελτιστοποιηθεί για τις παραμέτρους του MLDSA, με χρήση του εργαλείου Vitis-HLS. Για να γίνει pipelining ο σχεδιασμός και να επιτραπεί η πλήρης αξιοποίηση των βελτιστοποιήσεων του μεταγλωττιστή HLS, εισάγουμε BRAMs σε μεταβλητές μεταξύ των ενοτήτων διασύνδεσης των NTT, PWM_INTT και I/O. Επομένως, οι μεταβλητές in και in' τοποθετούνται σε BRAMs χωρισμένες σε τμήματα (chunks), ίσα με τη διάσταση του διανύσματος L. Το αποτέλεσμα του εργαλείου/μεταγλωττιστή HLS παρουσιάζεται σαν αρχιτεκτονική υλικού στο σχήμα X



Εικόνα 59 Η αρχιτεκτονική του NTT πολλαπλασιαστή πολυωνύμων σε υλικό.

Ο παραγόμενος πολλαπλασιαστής της παραπάνω αρχιτεκτονικής πακετάρεται από τα εργαλεία του AMD Vitis σαν πυρήνας υλικού (hardware kernel) και ως Vitis kernel, ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε μια εφαρμογή χρησιμοποιώντας το περιβάλλον ανάπτυξης Vitis. Η εφαρμογή μπορεί κατόπιν να μεταγλωττιστεί και να εκτελεστεί σε μια CPU host, με το runtime σύστημα υποστήριξης του Vitis να διαχειρίζεται το offloading των υπολογισμών πολλαπλασιασμού που κάνει το MLDSA στον πυρήνα πολλαπλασιαστή που υλοποιείται στην συσκευή FPGA.

Ο μεταγλωττιστής Vitis αναλαμβάνει να δημιουργήσει τα απαραίτητα στοιχεία για την επικοινωνία της CPU με τον πυρήνα που υλοποιείται στην FPGA υποδομή του συστήματός μας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το πλαίσιο OpenCL (OpenCL Framework) ώστε να «κατεβάσει» (download) ο συγκεκριμένος σχεδιασμός/πυρήνας στη συσκευή που έχει οριστεί.

Για να δημιουργήσουμε μια πλήρη εφαρμογή MLDSA, χρησιμοποιούμε το εργαλείο Vitis Unified Software Platform, το οποίο μεταγλωττίζει και συνδέει (links) τους κώδικες HLS σε μια πλατφόρμα Vitis της Xilinx και παράγει ένα τελικό εκτελέσιμο για τον συν-σχεδιασμό υλικού/λογισμικού (HW/SW co-design). Μια πλατφόρμα υλικού Vitis (Vitis hardware platform) είναι ένας προ-διαμορφωμένος σχεδιασμός για μια συγκεκριμένη συσκευή FPGA, που ορίζει τις συνδέσεις μεταξύ PL και PS, συμπεριλαμβάνοντας διάφορα περιφερειακά της συσκευής και συνδέσεις AXI, ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξη (deployment) Vitis kernels, λειτουργώντας απρόσκοπτα με τον μεταγλωττιστή και τον linker V++.

Τα σενάρια χρήσης που αφορούν τον υλοποιημένο επιταχυντή/NTT πολλαπλασιαστή και του συνολικού MLDSA που τον χρησιμοποιεί, σχετίζονται με την λειτουργική ικανότητα του επιταχυντή να διαχειριστεί με ενιαίο τρόπο και τα 3 διαφορετικά επίπεδα ασφαλείας που παρέχει το πρότυπο MLDSA καθώς και με την επιβεβαίωση του βαθμού επιτάχυνσης που επιτυγχάνεται στο υλικό σε σχέση με την υπογραφή και έλεγχο ψηφιακών υπογραφών μόνο με λογισμικό.

Ποιο συγκεκριμένα, δύο σενάρια επιβεβαίωσης διακρίνονται. Το πρώτο αφορά τον NTT πολυωνυμικό πολλαπλασιαστή υλοποιημένο σε υλικό και την συνολική του απόδοση σε σχέση με την ταχύτητά του και με τους καταναλισκόμενους πόρους που χρησιμοποιεί και το δεύτερο σενάριο αφορά την πλήρη υλοποίηση του MLDSA με τη χρήση του επιταχυντή/NTT πολλαπλασιαστή υλοποιημένου σε υλικό.

Ανιχνευτές κακόβουλων δράσεων και αυτοπροστασία του κόμβου αιχμής.

Στα πλαίσια του έργου υλοποιήθηκαν 2 ανιχνευτές κακόβουλων δράσεων εντός του κόμβου αιχμής. Ο πρώτος ανιχνευτής ασφαλείας στοχεύει στην ανίχνευση κακόβουλα τροποποιημένων firmware updates που έρχονται από εξωτερικό του κόμβου αιχμής εξυπηρετητή. Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί τον

μηχανισμό MLDSA που έχει υλοποιηθεί για να επαληθεύσει την ψηφιακή υπογραφή που έρχεται μαζί με ένα firmware update. Σε περίπτωση που η επαλήθευση αποτύχει ενεργοποιείται ο μηχανισμός καταγραφής γεγονότων ασφαλείας του κόμβου αιχμής και καταγράφεται το γεγονός. Για την επιβεβαίωση του συγκεκριμένου αισθητήρα προσδιορίζονται 2 σενάρια επίθεσεων. Στο πρώτο σενάριο θεωρούμε ότι ένα firmware update τροποποιήθηκε κατά την μετάδοσή του από τον εξυπηρετητή όπου γεννήθηκε προς τον κόμβο αιχμής υποθέτοντας ένα επιτιθέμενο ο οποίος κάνει μια man-in-the-middle επίθεση. Στο δεύτερο σενάριο χρήσης θεωρούμε ότι ο εξυπηρετητής είναι κακόβουλος και ότι το firmware update έχει τροποποιηθεί στην πηγή του (στον εξυπηρετητή) δηλαδή πραγματοποιείται μια man-at-the-source επίθεση. Στόχος της επιβεβαίωσης και στα 2 σενάρια επίθεσης είναι ο ανιχνευτής να μπορεί να διακρίνει την ύπαρξη κακόβουλου firmware update.

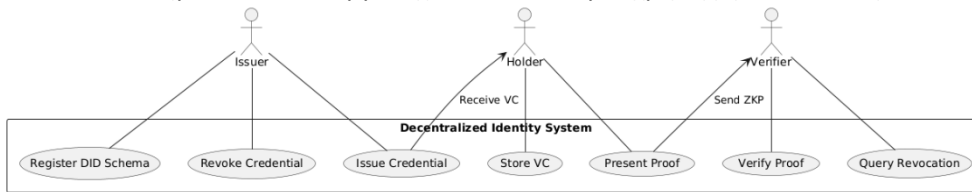
Ο δεύτερος ανιχνευτής που υλοποιήθηκε στο κόμβο αιχμής εστιάζει στην ανίχνευση ανώμαλων δραστηριοτήτων (κακόβουλων δραστηριοτήτων) εντός του κόμβου αιχμής. Παρόμοια με τον προηγούμενο αισθητήρα σε περίπτωση που η επαλήθευση αποτύχει ενεργοποιείται ο μηχανισμός καταγραφής γεγονότων ασφαλείας του κόμβου αιχμής και καταγράφεται το γεγονός. Ο αισθητήρας υλοποιείται σε 2 παραλλαγές, μια με στατιστική ανάλυση των δεδομένων εισόδου που δίνει γενικά αποτελέσματα και μια με τη χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης που εστιάζει σε συγκεκριμένα κακόβουλα λογισμικά και είναι σχεδιασμένη για να ανιχνεύει μόνο αυτά (αναλογικά με τα διαθέσιμα dataset που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των μοντέλων μηχανικής/βαθιάς μάθησης). Και στις δύο παραλλαγές αυτές, δεδομένα εισόδου αποτελούν πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον επεξεργασίας του κόμβου αιχμής όπως κατανάλωση ενέργειας, χρήση CPU, χρήση μνήμης, χρήση δικτύου κτλ. Η παραλλαγή βασισμένη στην στατιστική ανάλυση χρησιμοποιεί interleaved παράθυρα χρόνου και πραγματοποιεί βασικές στατιστικές πράξεις σε αυτά όπως standard deviation, averaging, correlation τα οποία συνδυάζονται ώστε να οδηγήσουν σε κάποια αριθμητικά κατώφλια τα οποία αν ξεπεραστούν οδηγούν το ανιχνευτή να συμπεράνει ότι πραγματοποιείται κάποια κακόβουλη ενέργεια. Ο αισθητήρας αυτός επιβεβαιώνεται με ένα σενάριο βασισμένο στην χρήση CPU και μνήμης. Στο σενάριο αυτό τεχνητά πραγματοποιούμε stress tests στον κόμβο αιχμής και παρατηρούμε αν αυτά ανιχνεύονται σαν κακόβουλες δράσεις από τον στατιστικό αισθητήρα ανώμαλων δραστηριοτήτων. Στη δεύτερη παραλλαγή του ο αισθητήρας αναβαθμίζεται με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Ποιο συγκεκριμένα, για τον εντοπισμό σύνθετης κακόβουλης συμπεριφοράς, προτείνεται μια μεθοδολογία που βασίζεται σε αναγνώριση, μέσω Βαθιάς Μάθησης, εκμεταλλεύσεων (exploits) του πλαισίου MITRE ATT&CK μέσα στην πραγματική ροή υπολογισμών μιας συσκευής με Linux OS, όπως αυτή περιγράφεται από τη χρήση της CPU, τη χρήση μνήμης και τη χρήση/αξιοποίηση του δίσκου. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, προτείνεται ένα σενάριο επιβεβαίωσης της μεθοδολογίας αυτής που οδηγεί στον αντίστοιχο αισθητήρα η οποία δημιουργεί ένα σύνολο δεδομένων (dataset) για εκπαίδευση ML/DL με στόχο την ανίχνευση κακόβουλου λογισμικού και/ή κακόβουλης συμπεριφοράς και χρησιμοποιεί τα δεδομένα για να παράγει χαρακτηριστικά (features). Στο σενάριο επιβεβαίωσης εξομοιώνεται η συμπεριφορά του malware/της κακόβουλης ενέργειας μέσω της αποσύνθεσής της σύμφωνα με το MITRE ATT&CK παρακολουθώντας το εκτελεστικό περιβάλλον του Linux OS. Η υλοποίηση του αισθητήρα σε αυτό το σενάριο επιβεβαίωσης γίνεται για τρεις classifiers Deep Learning (μοντέλα FCN, CNN, RNN/LSTM) που μπορούν να υποστηρίξουν την παραπάνω μεθοδολογία, και επιβεβαιώνεται η βέλτιστη προσέγγιση για ακριβή εκπαίδευση και επικύρωση (training & validation) των μοντέλων αυτών χρησιμοποιώντας μετρικές όπως η επιτευχθείσα Ακρίβεια (Accuracy), καθώς και οι δείκτες False Positive Rate (FPR) και False Negative Rate (FNR). Το προηγμένο backdoor κακόβουλο λογισμικό SysJoker χρησιμοποιήθηκε ως μελέτη περίπτωσης (use case) για την επικύρωση της εφικτότητας (feasibility validation) της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία και τον επιλεγμένο classifier DL, καταφέραμε να παρέχουμε ακρίβεια ανίχνευσης του SysJoker.

[Onboarding, Έκδοση, αποθήκευση και επαλήθευση διαπιστευτηρίων του κόμβου αιχμής σε βιομηχανικά συστήματα.](#)

Για την τεκμηρίωση και αξιολόγηση της πιλοτικής λύσης ασφαλούς αποκεντρωμένης διαχείρισης ταυτότητας, υλοποιήθηκαν σενάρια χρήσης τα οποία αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές ροές onboarding,

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

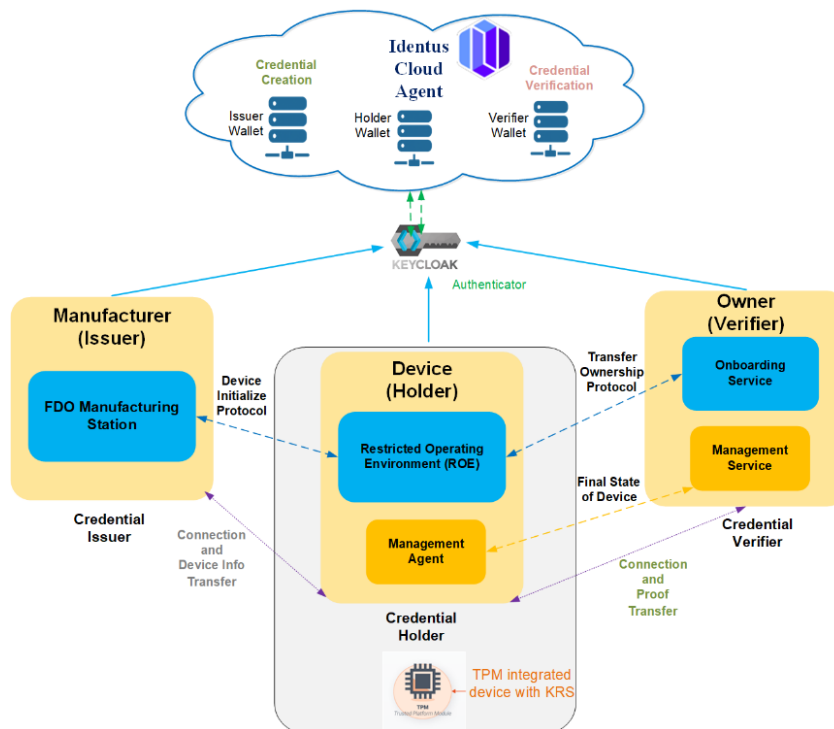
έκδοσης, αποθήκευσης και επαλήθευσης διαπιστευτηρίων σε βιομηχανικό περιβάλλον IIoT. Η δομή των σεναρίων εστιάζει στους τρεις διακριτούς ρόλους: Issuer (κατασκευαστής/φορέας onboarding), Holder (συσσκευή IIoT/edge node) και Verifier (cloud service/ελεγκτής). Το γενικό διάγραμμα αναπαράστασης των ρόλων και των συστημάτων που συμμετέχουν στο σενάριο χρήσης φαίνεται στην Εικόνα 60.



Εικόνα 60 Διάγραμμα Σεναρίου χρήσης που απεικονίζει τις βασικές ροές onboarding, έκδοσης, παρουσίασης, επαλήθευσης και ανάκλησης διαπιστευτηρίων μεταξύ Issuer, Holder και Verifier στο πιλοτικό σύστημα

Onboarding και Έκδοση Διαπιστευτηρίου Συσσκευής (Device Onboarding & VC Issuance)

Στην αρχική φάση, μια νέα συσκευή IIoT ενεργοποιείται και επικοινωνεί με το Kria Robotics Stack για ασφαλές onboarding. Ο πράκτορας Issuer που εκτελείται στο Kria, χρησιμοποιώντας το TPM, δημιουργεί και αποθηκεύει ένα μοναδικό κρυπτογραφικό κλειδί. Ο Issuer καταχωρεί ένα νέο DID schema και εκδίδει το πρώτο Verifiable Credential (VC), το οποίο υπογράφεται από το TPM και παραδίδεται στη συσκευή (Holder). Η συσκευή αποθηκεύει το VC τοπικά στο Identus Wallet και όλα τα απαραίτητα μεταδεδομένα καταχωρούνται στη Verifiable Data Registry (βλ. Prism/Cardano). Το παραπάνω σενάριο απεικονίζεται στην Εικόνα 61

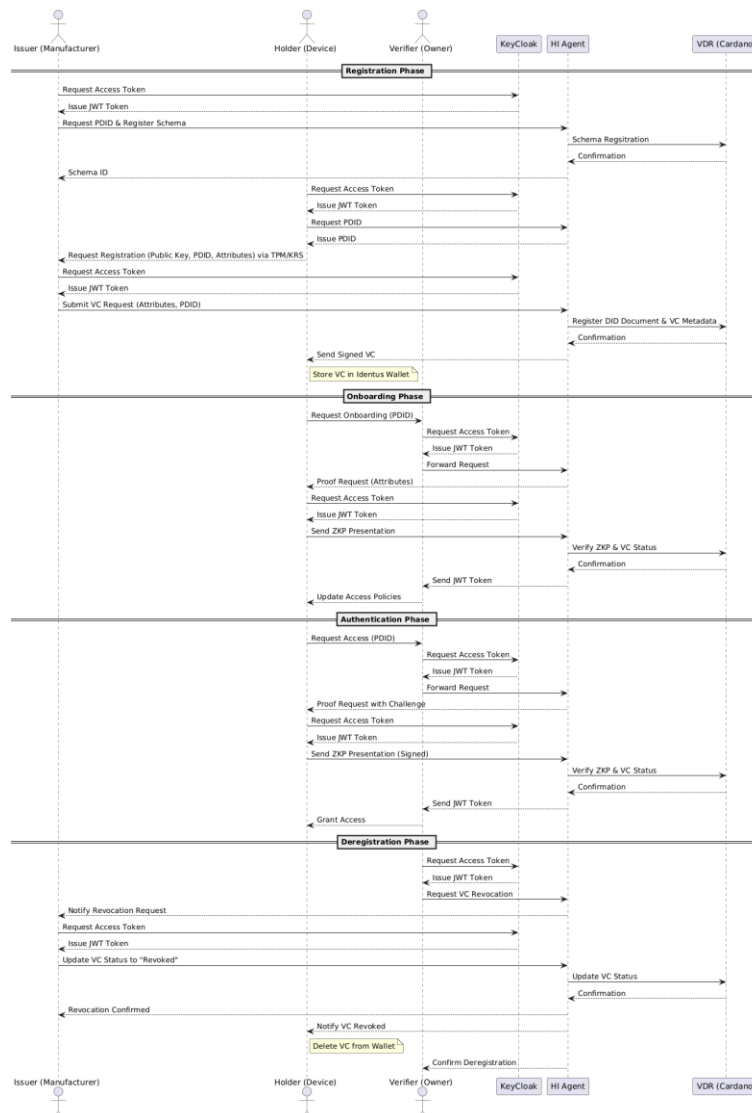


Εικόνα 61 Διασύνδεση όλων των βασικών τεχνολογικών συνιστωσών κατά το onboarding και credential issuance.

Παρουσίαση και Επαλήθευση Διαπιστευτηρίου (VC Presentation & Verification)

Μετά το onboarding, η συσκευή (Holder) μπορεί να αιτηθεί πρόσβαση σε κρίσιμες υπηρεσίες του cloud (Verifier). Ο Verifier στέλνει αίτημα επιλεκτικής παρουσίασης (proof request) ζητώντας συγκεκριμένα attributes (π.χ. κατασκευαστής, κατάσταση έγκρισης, ιδιοκτησία TPM). Ο Holder Agent στον κόμβο αιχμής δημιουργεί Zero-Knowledge Proofs (ZKPs) μέσω SD-JWT-VC, διασφαλίζοντας ότι αποκαλύπτονται μόνο τα απαιτούμενα δεδομένα, χωρίς μεταφορά προσωπικών ή εταιρικών πληροφοριών. Η επαλήθευση γίνεται μέσω DIDComm v2 με κρυπτογραφημένη ροή, και ο Verifier ελέγχει τα signatures και το revocation status από το Identus Cloud Agent. Το διάγραμμα ροής μηνυμάτων ολόκληρου του σεναρίου χρήσης αποτυπώνεται στην Εικόνα 62

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 62 Διάγραμμα ροής των μηνυμάτων μεταξύ Holder, Issuer και Verifier σε όλα τα στάδια.

Ανακλήσεις και Διαχείριση Καταστάσεων (Revocation & Status Management)

Σε περίπτωση αλλαγής κατάστασης ή παραβίασης, ο Issuer μπορεί να ανακαλέσει ένα credential ενημερώνοντας το Verifiable Data Registry (VDR). Κατά την επαλήθευση, ο Verifier ελέγχει πάντα το status του VC πριν δώσει τελική έγκριση. Ο Πίνακας 17, συνοψίζει τις κύριες λειτουργικές ροές, τους εμπλεκόμενους ρόλους και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης.

Πίνακας 17 Αποτελέσματα σεναρίων χρήσης και επίδειξης λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος αποκεντρωμένης ταυτότητας

Σενάριο	Ενέργεια	Ρόλοι	Επιτυχής Ροή	Σχόλια
Onboarding	Έκδοση DID & VC	Issuer, Holder	NAI	TPM-based signing
Credential Presentation	Επιλεκτική παρουσίαση με ZKP	Holder, Verifier	NAI	Ελάχιστη αποκάλυψη
Revocation	Ανακοίνωση ανάκλησης	Issuer, Verifier	NAI	Έλεγχος σε VDR
Unauthorized Access	Πρόσβαση χωρίς έγκυρο VC	Holder, Verifier	OXI	Άρνηση από το Cloud

2.15. Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Ο πυρήνας της φυσικής και λογικής σύνδεσης όλης της αρχιτεκτονικής του έργου είναι ο διακομιστής που φιλοξενεί όλες τις εικονικές μηχανές (Hypervisor). Το εγκατεστημένο λογισμικό Proxmox δίνει την δυνατότητα στον διαχειριστή να εκμεταλλευτεί όλους τους φυσικούς πόρους του διακομιστή (επεξεργαστική ισχύ, μνήμη, χώρος αποθήκευσης) και να τους καταναίμει όπως όπως αυτός επιθυμεί με πλήρη ευελιξία. Στο συγκεκριμένο έργο προστέθηκαν επιπλέον μέσα αποθήκευσης για να καλυφθούν τυχόν επιπλέον ανάγκες. Η υλοποίηση της φάρμας εικονικών μηχανών απλοποιεί την συνδεσμολογία σε φυσικό επίπεδο με καλώδια και δικτυακές συσκευές. Η κάθε μηχανή μπορεί να έχει όσες κάρτες δικτύου χρειάζεται ώστε να συνδέεται λογικά με όποιο δίκτυο απαιτείται. Επομένως, σε φυσικό επίπεδο, το μόνο που απαιτήθηκε από το έργο είναι ένα switch στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο διακομιστής που φιλοξενεί τις μηχανές, ο διακομιστής που είναι εγκατεστημένο το εργαλείο DRACVUF και τέλος η δικτυακή συσκευή που παρέχει συνδεσιμότητα του τοπικού δικτύου με το διαδίκτυο.

Στην λογική σύνδεση των συσκευών προς το διαδίκτυο προστέθηκε ένα επιπλέον βήμα για την αύξηση της ασφάλειας της υποδομής. Αποφασίστηκε πως όλες οι εικονικές μηχανές θα είναι μέλη ενός απομονωμένου δικτύου χωρίς καμία ανοιχτή πρόσβαση από και προς το διαδίκτυο. Η μικρότερη δυνατή έκθεση των μηχανών προς το διαδίκτυο μειώνει τις πιθανότητες επιθέσεων από εξωτερικούς παράγοντες. Η διαχείριση των εσωτερικών επικοινωνιών πραγματοποιείται από την εικονική μηχανή στην οποία έχει εγκατασταθεί ο VPN διακομιστής. Είναι το μόνο τερματικό που έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο και μάλιστα μόνο στις συγκεκριμένες πόρτες λειτουργίας των VPN υπηρεσιών. Άρα, όποιος χρήστης θέλει να συνδεθεί στην φάρμα θα πρέπει να πραγματοποιήσει μία σύνδεση VPN στον διακομιστή και αυτός με την σειρά του θα του ανακοινώσει τα απαραίτητα δρομολόγια ώστε να μπορέσει να τον οδηγήσει στους προορισμούς που ζήτησε.

Η μηχανή όπου τρέχει το εργαλείο του Suricata δέχεται σαν είσοδο την ροή πακέτων του δικτύου, τα αναλύει και διατηρεί τα αποτελέσματα σε αρχείο καταγραφής. Στο έργο δημιουργήθηκε μία διασύνδεση του Suricata με το MISP, ώστε αν βρεθεί κάποια ύποπτη συμπεριφορά κατά την ανάλυση των ροών, να αποστέλλεται η πληροφορία στο εργαλείο MISP. Αυτό με την σειρά του δημιουργεί ένα νέο event στην πλατφόρμα, με σκοπό την φιλικότερη προς τον χρήστη απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Για την εικονική μηχανή που περιέχει όλα τα εργαλεία στατικής ανάλυσης χρειάστηκε να δημιουργηθεί ένα script που λειτουργεί ως orchestrator αφού τα εργαλεία δεν μπορούν να εκτελεστούν αυτοματοποιημένα. Πρακτικά σαν πρώτο στάδιο υλοποιήθηκε μια εσωτερική διασύνδεση όπου ο orchestrator είναι ο κεντρικός συνδετικός κρίκος όλων των εργαλείων και αναλαμβάνει να καλέσει και να εκτελέσει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την ανάλυση που επιθυμεί ο χρήστης. Αφού τα αποτελέσματα της ανάλυσης έχουν εξαχθεί, τα αποθηκεύει σε αρχεία καταγραφής και τα αποστέλλει στο εργαλείο MISP. Εκεί δημιουργούνται νέα events, ανάλογα πάντα με τις ρυθμίσεις του διαχειριστή, ώστε οι χρήστες να έχουν καλύτερη και πιο συγκεντρωτική εικόνα των αποτελεσμάτων.

Για την παρακολούθηση των τερματικών σε πραγματικό χρόνο δημιουργήθηκε μία εικονική μηχανή, όπου εγκαταστάθηκε το λογισμικό Windows 10. Εφόσον για την παρακολούθηση πολλών τερματικών ακολουθείτε ακριβώς η ίδια διαδικασία υλοποίησης παρακολούθησης του ενός, θεωρήθηκε συνετό να χρησιμοποιηθεί για την εξομίωση ένα τερματικό αντί για περισσότερα, παρόλο που αυτή η εικόνα θα αντιπροσώπευε ευστοχότερα ένα πραγματικό περιβάλλον. Υπερίσχυσε η άποψη πως ο όγκος των αποτελεσμάτων θα είναι πιο διαχειρίσιμος και θα παρουσιάζονταν πιο καθαρά στο πέρας του έργου. Στο τερματικό εγκαταστάθηκε ένα λογισμικό που ονομάζεται Winlogbeat. Το Winlogbeat αντλεί τα event logs από το λειτουργικό των windows. Τα αποθηκεύει σε ένα αρχείο καταγραφής και τα στέλνει στο εργαλείο Elastic-Kibana. Για να πραγματοποιείται αυτό σε πραγματικό χρόνο, απαιτείται η δημιουργία μίας διεργασίας στο λειτουργικό Windows όπου θα εκκινεί αυτόματα το λογισμικό Winbeat. Έπειτα, τα αρχεία καταγραφής φτάνουν στην βάση δεδομένων του Elastic και αποθηκεύονται σε αυτήν. Πλέον, οι διαχειριστές του Kibana μπορούν να δημιουργήσουν διαγράμματα και πίνακες οπτικοποιημένων αποτελεσμάτων κάνοντας χρήση αυτών των αρχείων καταγραφής.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Το τελικό συμπέρασμα για την διασύνδεση των μηχανημάτων της φάρμας είναι πως οι δυο κύριοι προορισμοί αποστολής πληροφοριών είναι η πλατφόρμα MISIP και η πλατφόρμα Kibana.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Τα σενάρια χρήσης που μελετήθηκαν σε αυτό το έργο είναι: Ανάλυση κακόβουλου λογισμικού και Ανάλυση συμβάντων κυβερνοασφάλειας.

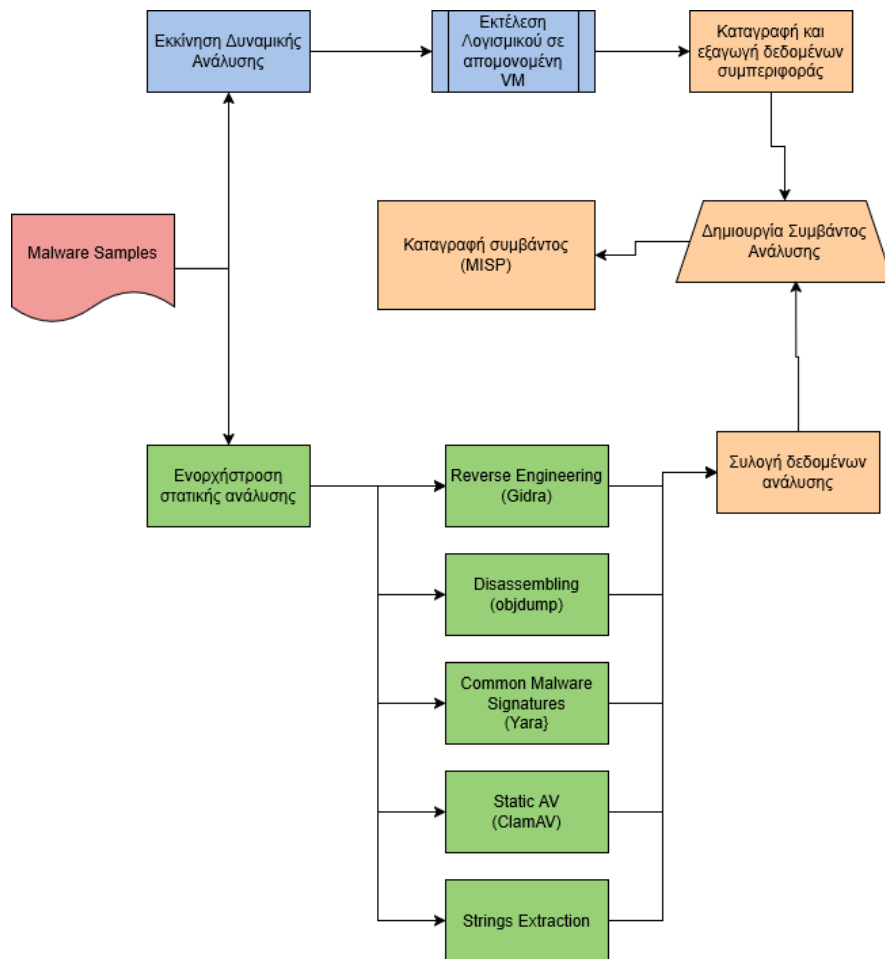
Σενάριο 1: Ανάλυση κακόβουλου λογισμικού. Στο σύστημα μπορούν να εισέλθουν ως είσοδο δείγματα κακόβουλων λογισμικών και ροές δεδομένων. Η είσοδος μπορεί να είναι δυναμική, όταν κάποιο εργαλείο έχει την δυνατότητα να διαβάζει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, είτε στατική όταν το εργαλείο ζητά από τον χρήστη να ανεβάσει ένα αρχείο για ανάλυση. Ακολούθως, η ανάλυση μπορεί να είναι δυναμική ή στατική.

Στην δυναμική ανάλυση ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει χειροκίνητα ένα αρχείο ή μία ροή δεδομένων στο εργαλείο που ονομάζεται DRACKVUF. Το DRACKVUF εκκινεί μία πλήρως απομονωμένη εικονική μηχανή, την οποία χρησιμοποιεί για να αναλύσει το αρχείο. Η πρακτική της απομονωμένης μηχανής χρησιμοποιείται για λόγους ασφάλειας, ώστε αν υπάρχει κακόβουλο λογισμικό να μην καταφέρει να μολύνει άλλες συσκευές πέρα από αυτήν. Η εξάπλωση του κακόβουλου λογισμικού θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είτε μέσω του λογισμικού των συσκευών, είτε μέσω του δικτύου. Όταν τελειώσει την εξέταση του αρχείου, το DRACKVUF απενεργοποιεί την εικονική μηχανή και εξάγει μία αναφορά με τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Εκτός από το αν το αρχείο που εξετάστηκε ήταν κακόβουλο, το DRACKVUF παρέχει πολλές πληροφορίες για την φύση και την δομή του αρχείου. Τα αποτελέσματα αρχικά καταγράφονται τοπικά στον διακομιστή που φιλοξενεί το DRACKVUF και στην συνέχεια προωθούνται στην πλατφόρμα MISIP. Το MISIP είναι η πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε στο έργο για την καταγραφή συμβάντων. Το MISIP δημιουργεί συμβάντα σύμφωνα με κάποια συγκεκριμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά ορίζονται από τους διαχειριστές της πλατφόρμας και ονομάζονται κανόνες.

Δηλαδή, το MISIP δέχεται αρχεία καταγραφής από άλλα συνεργαζόμενα εργαλεία, τα ελέγχει, και σε περίπτωση που τα αρχεία περιέχουν πληροφορίες που ταιριάζουν στους κανόνες που έχουν ορίσει οι διαχειριστές, δημιουργεί ένα νέο συμβάν.

Η στατική ανάλυση αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων τα οποία τρέχουν χειροκίνητα από τον χρήστη. Σε αυτό το έργο, ο σκοπός ήταν να αυτοματοποιηθεί η εκκίνηση των διεργασιών και να μην απαιτείται η εμπλοκή του χρήστη στην εκκίνηση του κάθε εργαλείου ξεχωριστά. Αυτό επετεύχθη δημιουργώντας έναν orchestrator με scripts, τον οποίο καλεί ο χρήστης και επιλέγει ποια εργαλεία επιθυμεί να πραγματοποιήσουν την ανάλυση του αρχείου. Στην συνέχεια ο orchestrator εκκινεί τις διεργασίες των εργαλείων και καλεί τον χρήστη να τοποθετήσει κάποιες παραμέτρους ανά εργαλείο, μόνο σε περιπτώσεις που απαιτείται. Μετά το πέρας της ανάλυσης, το κάθε εργαλείο ξεχωριστά δημιουργεί ένα αρχείο καταγραφής στον φάκελο εγκατάστασης του, όπου αποθηκεύει τα αποτελέσματα. Ο orchestrator γνωρίζει την τοποθεσία των αρχείων αυτών και κατέχει δικαιώματα προσπέλασης τους. Εφόσον τα συλλέξει όλα, τα στέλνει στο εργαλείο δημιουργίας συμβάντων MISIP. Το MISIP θα τα δεχτεί σαν είσοδο, θα τα εξετάσει και αν ταιριάζουν με τους κανόνες που έχουν δημιουργήσει οι διαχειριστές, τότε θα δημιουργήσει ένα νέο συμβάν στην πλατφόρμα. Μία μικρή απεικόνιση του σεναρίου 1 φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

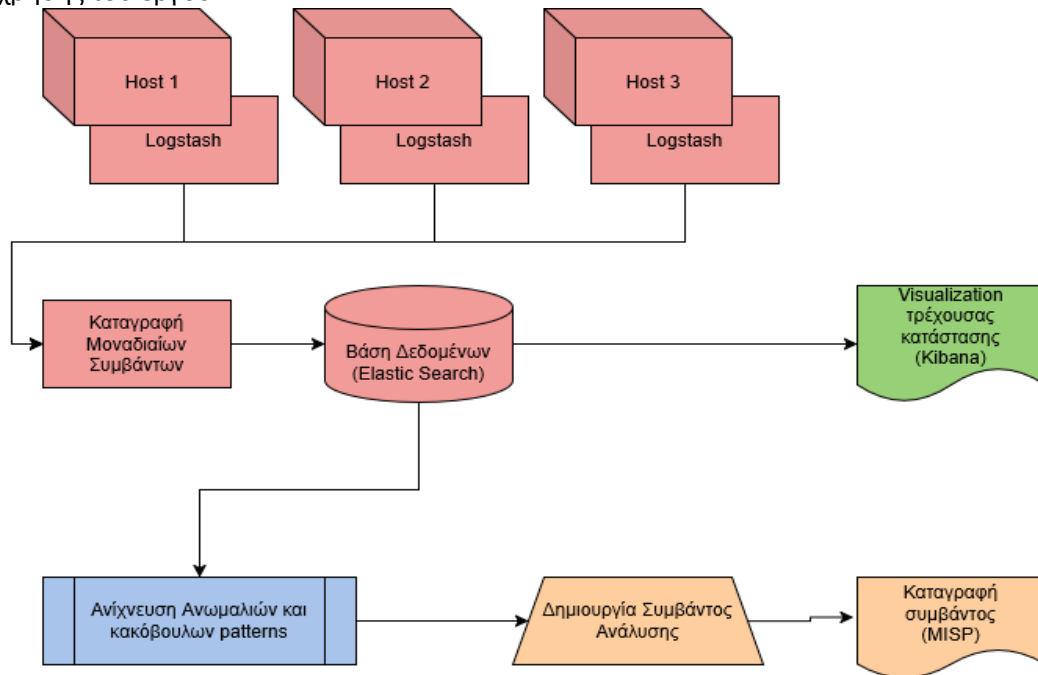


Σενάριο 2: Ανάλυση συμβάντων κυβερνοασφάλειας. Εκτός από τις αναλύσεις των αρχείων και των ροών που εξετάστηκαν στο προηγούμενο σενάριο, υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης δεδομένων ενός συστήματος ή μιας δικτυακής σε πραγματικό χρόνο. Για την ανάλυση συστημάτων σε πραγματικό χρόνο δημιουργήθηκε μια εικονική μηχανή, η οποία αναπαριστά μια τερματική συσκευή σε ένα πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Σε αυτήν εγκαταστάθηκε το λογισμικό Winlogbeat και στη συνέχεια δημιουργήθηκε μία διεργασία η οποία εκκινεί το λογισμικό αυτόματα όταν το τερματικό είναι ενεργοποιημένο. Το Winlogbeat διαβάζει τα συμβάντα του λογισμικού Windows και τα καταγράφει σε έναν φάκελο που επιλέγεται κατά την εγκατάσταση. Ο φάκελος αυτός προσπελάζεται από το λογισμικό ανά πολύ τακτά χρονικά διαστήματα και το περιεχόμενο του αποστέλλεται στην βάση δεδομένων του Elastic Search. Το Elastic Search δέχεται την πληροφορία και την καταχωρεί στην βάση δεδομένων του με μορφή που είναι εύκολα προσπελάσιμη και επεξεργάσιμη για αυτό. Στην συνέχεια, η πληροφορία αυτή κατανέμεται σε δύο συστήματα της φάρμας. Το πρώτο είναι το Kibana, το οποίο αντλεί την πληροφορία από το Elastic Search και δημιουργεί γραφήματα και πίνακες αναλυτικών αποτελεσμάτων, με βάση τα κριτήρια που έχει θέσει ο διαχειριστής του. Το δεύτερο είναι το MISP. Το Elastic Search διοχετεύει την πληροφορία στο MISP, το MISP θα την δεχτεί σαν είσοδο, θα την εξετάσει και αν ταιριάζει με τους κανόνες που έχουν δημιουργήσει οι διαχειριστές, τότε θα δημιουργήσει ένα νέο συμβάν στην πλατφόρμα.

Την ανάλυση δικτυακών ροών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο την αναλαμβάνει το Suricata. Το Suricata μπορεί να δεχτεί σαν είσοδο ροές δικτυακών δεδομένων της κάρτας δικτύου του, όλου του δικτύου μέσω της τεχνολογίας mirroring, η ροές που είναι αποθηκευμένες σε αρχεία της μορφής .pcap. Το Suricata δεν παρέχει κάποια διεπαφή που να είναι φιλική προς το χρήστη και όλες του οι λειτουργίες εκτελούνται και απεικονίζονται στην κονσόλα του κεντρικού λογισμικού. Το Suricata αναλύει την κίνηση σε πραγματικό χρόνο και σε περίπτωση που συλλάβει ροές με ύποπτη συμπεριφορά, αποθηκεύει την

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

αντίστοιχη πληροφορία σε ένα αρχείο καταγραφής. Το αρχείο αυτό στέλνεται στο Elastic Search και από εκεί και έπειτα ακολουθούνται τα ίδια μονοπάτια κατανομής που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Παρακάτω ακολουθεί ένα σχέδιο που αναπαριστά σχηματικά την δομή του δεύτερου σεναρίου χρήσης του έργου.



Να σημειωθεί πως στο σχήμα απεικονίζεται μόνο η περίπτωση εγκατάστασης του Winlogbeat σε τερματικές συσκευές. Στην περίπτωση του Suricata, το σχήμα παραμένει το ίδιο αλλά θα πρέπει να αντικατασταθούν όλα τα πλαίσια Host1, Host2, Host 3 με ένα πλαίσιο που θα αναγράφει Suricata-Server.

2.16. Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Διάταξη Συστήματος Καμερών

Στον εργαστηριακό χώρο δοκιμών τοποθετήθηκαν τρεις βιομηχανικές κάμερες Sony IMX265 MER2-302-37GC-P, συνδεδεμένες μέσω Gigabit Ethernet σε κοινό δίκτυο, με σκοπό την καταγραφή συγχρονισμένων πλάνων από τρεις διαφορετικές οπτικές γωνίες. Ο χώρος στήριξης ήταν πολύ περιορισμένος, γεγονός που επέβαλε στενή διάταξη των καμερών γύρω από το αντικείμενο -στόχο, χωρίς δυνατότητα σημαντικής μετατόπισης. Επιπλέον, οι συνθήκες φωτισμού ήταν ακανόνιστες, καθώς εναλλασσόταν φυσικό και τεχνητό φως με έντονες σκιές, δημιουργώντας προκλήσεις για την ομοιομορφία της έκθεσης και τη σταθερότητα της εικόνας. Για τη μείωση της χρονικής καθυστέρησης ("lag") μεταξύ των ρών εικόνας ενεργοποιήθηκε λειτουργία λογισμικού trigger, ώστε κάθε σύλληψη καρέ να ξεκινά σχεδόν ταυτόχρονα και στις τρεις συσκευές.



Εικόνα 63 Μοντέλο κάμερας Sony IMX265 MER2-302-37GCP

Η επιλογή του TL-SG105PE ως Ethernet switch με υποστήριξη PoE (Power over Ethernet) είναι ιδανική για αυτήν τη διάταξη. Η δυνατότητα τροφοδοσίας των καμερών μέσω του ίδιου καλωδίου Ethernet απλοποιεί την εγκατάσταση – δεν απαιτούνται ξεχωριστά τροφοδοτικά κοντά σε κάθε κάμερα, κάτι που είναι κρίσιμο σε περιορισμένους χώρους. Με έως τέσσερις θύρες PoE καθεμία εμπιστευόμενη έως 15,4W, μπορούμε να συνδέσουμε απευθείας και τις τρεις MER2-302-37GC-P, διασφαλίζοντας σταθερή τροφοδοσία και συγχρονισμό τροφοδοσίας / δικτύου. Επιπλέον, το TL-SG105PE προσφέρει βασικό QoS (Quality of Service), επιτρέποντάς μας να ιεραρχήσουμε την κυκλοφορία βίντεο ώστε τα πακέτα εικόνας να έχουν προτεραιότητα έναντι άλλων δεδομένων — εξαιρετικά σημαντικό όταν θέλουμε ελαχιστοποίηση του latency. Μέσω των DIP switches μπορούμε επίσης να ενεργοποιήσουμε τον έλεγχο ενεργειακής κατανάλωσης των PoE θυρών, εξοικονομώντας έως 75% ενέργεια όταν οι κάμερες δεν καταγράφουν ή είναι σε κατάσταση αναμονής. Αυτό είναι χρήσιμο για μακροχρόνιες εγκαταστάσεις ή όταν ο διακόπτης βρίσκεται εκτός εύκολης πρόσβασης.



Εικόνα 64 TL-SG105PE ως Ethernet switch

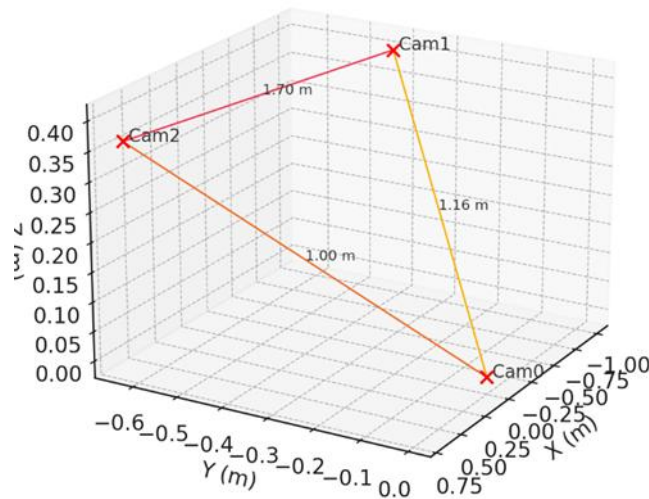
Καλιμπράρισμα Καμερών και καταγραφή εικόνας

Το καλιμπράρισμα των καμερών πραγματοποιήθηκε με χρήση πλέγματος σκακιέρας (chessboard) 9×6 εσωτερικών τετραγώνων, πλευράς 0,1m, ως πρότυπο πλαίσιο αναφοράς. Αρχικά, ρυθμίστηκαν οι βασικές παράμετροι exposure, gain και bitrate frame (ExposureTime = 80000μs, Gain = 11, AcquisitionFrameRate = 12fps, GammaDisable) ώστε να διασφαλισθεί σταθερή απόδοση σε όλες τις συσκευές. Μέσω συναρτήσεων OpenCV (cv2.findChessboardCorners, cv2.cornerSubPix) ανιχνεύθηκαν γωνίες και υπολογίστηκε η ακρίβεια των εντοπισμένων σημείων (μέση απόκλιση <0,5px). Στη συνέχεια, μέσω cv2.calibrateCamera υπολογίστηκαν εσωτερικές παράμετροι (μητρώα κάμερας K και συντελεστές παραμόρφωσης dist), ενώ με cv2.stereoCalibrate και τα flags FIX_INTRINSIC, ZERO_DISPARITY

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

υπολογίστηκαν οι εξωτερικοί μετασχηματισμοί (μητρώα περιστροφής R και διανύσματα μετατόπισης T) των καμερών. Η αξιολόγηση της ποιότητας του καλιμπραρίσματος έγινε με βάση το RMS reprojection error, το οποίο διατηρήθηκε σε αποδεκτά χαμηλά επίπεδα (subpixel accuracy).

Η διαδικασία καταγραφής υλοποιήθηκε επίσης σε Python, αξιοποιώντας τη βιβλιοθήκη gchiry για επικοινωνία με τις κάμερες και το OpenCV για τη μετατροπή της εικόνας από BAYER_RG8 σε BGR. Με ενεργοποιημένη την παραπάνω ρύθμιση trigger (TriggerMode = SOFTWARE, TriggerDelay = 0) καταγράφηκαν συνεχώς καρέ για συνολικό χρόνο RECORD_SECONDS = 200 s. Κάθε κάμερα κατέγραφε σε ξεχωριστό αρχείο AVI με κωδικοποίηση XVID, στην προκαθορισμένη ταχύτητα FRAME_RATE = 12 fps, και στο τέλος της λήψης υπολογίστηκε το πραγματικό fps από τον αριθμό των ληφθέντων καρέ. Τα αρχεία επανεκωδικοποιήθηκαν ώστε να ευθυγραμμίζεται ο ρυθμός εξόδου (OUTPUT_FPS) με τον πραγματικό ρυθμό καταγραφής και τα αρχικά προσωρινά αρχεία διαγράφηκαν. Η διαδικασία καλιμπραρίσματος των τριών καμερών οδήγησε στην απόκτηση εξωτερικών μετασχηματισμών ακριβείας (διανυσμάτων μετάθεσης T) που αντιστοιχούν στις θέσεις των καμερών Cam1 και Cam2 σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς της Cam0. Μετατρέποντας τις τιμές αυτές σε μετρικές αποστάσεις, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα: Η Cam1 απέχει περίπου 1,160mm (1,16m) από τη Cam0. Η Cam2 απέχει περίπου 1,002mm (1,00m) από τη Cam0. Η απόσταση μεταξύ Cam1 και Cam2 υπολογίζεται σε περίπου 1,701mm (1,70m).



Εικόνα 65 Αποστάσεις μεταξύ των τριών καμερών

Οι αποστάσεις αυτές της τάξης του ενός με δύο μέτρα, κρίνονται απολύτως αποδεκτές για περιβάλλοντα όπου απαιτείται στενή διάταξη των καμερών γύρω από το αντικείμενο -στόχο, χωρίς να θυσιάζεται η αναλυτικότητα και η διαστασιολογική ακρίβεια των εικόνων. Σε εφαρμογές όπως η βιομηχανική επιθεώρηση (inspection) προϊόντων σε γραμμές παραγωγής ή η παρακολούθηση συστημάτων μικρής κλίμακας, οι αποστάσεις αυτές διασφαλίζουν επαρκές πεδίο θέασης και επικαλυπτόμενες οπτικές γωνίες, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν το ενδεχόμενο δημιουργίας «νεκρών» ζωνών (blind spots) ή έντονης σκίασης. Παρομοίως, σε εφαρμογές ασφαλείας εντός κτιρίων ή σε στούντιο μικρής κλίμακας για ψηφιακή λήψη τρισδιάστατων αντικειμένων ή προσώπων, οι κάμερες μπορούν να στηριχθούν σε αποστάσεις ενός έως δύο μέτρων, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η οπτική κάλυψη χωρίς να απαιτείται εκτεταμένος χώρος.

Η συγκεκριμένη επιλογή αποστάσεων μεταξύ των καμερών ανταποκρίνεται σε συνθήκες πραγματικού κόσμου όπου ο χώρος γύρω από το αντικείμενο συχνά περιορίζεται από μηχανικά μέρη, δομικά στοιχεία ή άλλον εξοπλισμό. Για παράδειγμα, σε ένα κλειστό εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου, οι κάμερες τοποθετούνται συνήθως γύρω από έναν μικρό πάγκο ή μία κατασκευή, ώστε να καλύπτουν όλες τις απαραίτητες όψεις ενός αντικειμένου χωρίς να παραβιάζουν τις φυσικές διαστάσεις του χώρου. Έτσι επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη καταγραφή τριών διαφορετικών προοπτικών με ελάχιστη απόκλιση στο

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

συγχρονισμό, παρά τις μικρές καθυστερήσεις που τυχόν προκύπτουν από το Ethernet πρωτόκολλο ή το λογισμικό trigger.

Το γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των καμερών δεν ξεπερνά τα δύο μέτρα υποδηλώνει επίσης ότι το σύστημα μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα ακόμα και σε οχήματα (π.χ. ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς αγαθών σε αποθήκες). Σε κάθε περίπτωση, η μικρή απόσταση επιτρέπει ισχυρή γεωμετρική επικάλυψη των πεδίων θεάσεως, γεγονός που διευκολύνει τόσο τις διαδικασίες τριγωνοποίησης όσο και την ανάλυση σκηνών όπου μπορεί να υπάρξουν φυσικά εμπόδια ή περιορισμένος φωτισμός. Σε μια τυπική εφαρμογή κλειστού χώρου, όπως η επιθεώρηση εξαρτημάτων μηχανών σε γραμμή συναρμολόγησης, οι κάμερες μπορούν να τοποθετηθούν εκατέρωθεν και πάνω από τον πάγκο εργασίας, σε αποστάσεις της τάξης του ενός μέτρου. Η Cam0, ως κεντρική, εστιάζει κατευθείαν στο αντικείμενο, ενώ οι Cam1 και Cam2 τοποθετούνται πλάγια για την κάλυψη δύσκολων γωνιών ή τμημάτων που ενδέχεται να παρεμποδίζονται από κινούμενα μέρη. Σε περίπτωση που μια όψη δεν παρέχεται (π.χ. λόγω ισχυρής σκιάς ή προσωρινής κάλυψης από κάποιο φυσικό αντικείμενο), οι άλλες δύο καθίστανται ικανές να διατηρήσουν την ακρίβεια αναγνώρισης ή μέτρησης, χάρη στο πρότερο γεωμετρικό καλιμπράρισμα. Συνοψίζοντας, οι αποστάσεις των καμερών, που κυμαίνονται μεταξύ 1,00 m και 1,70 m, αντιπροσωπεύουν σενάριο ρεαλιστικό και εφαρμόσιμο σε κλειστούς χώρους με περιορισμένη ελευθερία κίνησης. Επιτρέπουν επαρκή επικάλυψη, ελαχιστοποιούν τα τυφλά σημεία και διατηρούν την καθυστέρηση σε αποδεκτά επίπεδα, εξασφαλίζοντας την απρόσκοπτη λειτουργία των νευρωνικών δικτύων, ακόμη κι όταν μία από τις όψεις απουσιάζει λόγω φυσικών εμποδίων ή συνθηκών φωτισμού.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

RULA SCORES

Παρακάτω περιγράφουμε ενδεικτικά κάποια στιγμιότυπα από καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, καθώς και τα RULA scores που υπολογίστηκαν. Στο πρώτο καρτέ (~2,3 s), οι βραχίονες βρίσκονται κοντά στο σώμα, σε γωνία 20–30°. Το στήθος παραμένει όρθιο και η στάση γενικά σταθερή. Η bird-eye απεικόνιση δείχνει πράσινο χρώμα, που αντιστοιχεί σε RULA score **2**. Στο δεύτερο στιγμιότυπο (~6,9 s), ο χρήστης στέκεται με τον αριστερό βραχίονα ελαφρώς ανυψωμένο στο ύψος της μέσης, χωρίς να φτάνει τον ώμο. Η γωνία του ώμου είναι περίπου 30–45°, με το μπράτσο να σχηματίζει ήπια γωνία προς τα εμπρός. Το χρώμα στη bird-eye προβολή παραμένει πράσινο, υποδεικνύοντας RULA score **2**, χωρίς μεταβολή από το πρώτο στιγμιότυπο. Στο τρίτο στιγμιότυπο (~11,5 s), παρατηρούμε ότι ο αριστερός βραχίονας έχει ανασηκωθεί πάνω από το ύψος του ώμου, σχηματίζοντας γωνία 60–75° σε σχέση με τον κορμό. Αυτή η θέση αυξάνει τη φορτία στην άρθρωση του ώμου, και στη bird-eye απεικόνιση εμφανίζεται κίτρινο χρώμα, που αντιστοιχεί σε RULA score **4**. Στο τέταρτο καρτέ (~16,1 s), ο χρήστης υψώνει κυρίως τον δεξιό βραχίονα ψηλά, αλλά ο αριστερός παραμένει επίσης κοντά στο ύψος του ώμου. Η γωνία ξεπερνά τις 75° και στις δύο πλευρές, με αποτέλεσμα η bird-eye προβολή να δείχνει κίτρινο χρώμα.



Εικόνα 66 Αποτελέσματα εκτίμησης εργονομικής κατάστασης με την μορφή heatmap

Στο 21ο καρτέ παρατηρούμε χρονική απόκλιση μεταξύ των τριών όψεων που επιβεβαιώνει ότι σε πραγματικές συνθήκες καταγραφής ακόμη και το software trigger και η τροφοδοσία μέσω PoE δεν εξασφαλίζουν πάντα αποτελεσματικό συγχρονισμό, με αποτέλεσμα οι γωνίες των βραχιόνων να μην αποτυπώνονται ταυτόχρονα σε όλες τις κάμερες. Σε περίπτωση προσωρινού occlusion ή καθυστέρησης ενός stream, οι δύο άλλες όψεις, έχοντας ακριβές calibration και γνωστή γεωμετρική σύζευξη, μπορούν να αναπληρώσουν τα προβληματικά keypoints, διατηρώντας την ακρίβεια του 3D σκελετικού μοντέλου και κατ' επέκταση του RULA score. Έτσι το σύστημα παραμένει ανθεκτικό σε μικρές ασυμφωνίες χρόνου ή προσωρινή απώλεια ενός καναλιού, διασφαλίζοντας συνεπή αξιολόγηση εργονομίας ακόμη και σε

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

απαιτητικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, οι προσωρινοί χρονικοί ή φυσικοί αποκλεισμοί δεν διαταράσσουν σημαντικά τον υπολογισμό του 3D σκελετού και άρα δεν αλλοιώνουν το RULA score, διατηρώντας την έγκυρη εργονομική αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και σε απαιτητικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 67 Εκτίμηση εργονομικής κατάστασης στο 21ο καρέ

Βελτίωση Καταγραφής

Μπορούμε να ενισχύσουμε σημαντικά τη σταθερότητα, την ευελιξία και την ποιότητα της λήψης αξιοποιώντας τον επιπλέον εξοπλισμό ως εξής: Πρώτον, η χρήση camera housings εξασφαλίζει απόλυτη προστασία των καμερών από σκόνη, υγρασία ή τυχαίες εκτοξεύσεις σωματιδίων, ιδιαίτερα σε πραγματικές συνθήκες βιομηχανίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να τοποθετήσουμε τις κάμερες ακόμα και μέσα σε περιορισμένα ή εκτεθειμένα περιβάλλοντα (π.χ. κοντά σε ψεκαστές υγρού ή σε ιζήματα), χωρίς να κινδυνεύει ο αισθητήρας ή τα ηλεκτρονικά. Δεύτερον, η προσθήκη ειδικών φακών υψηλής ανάλυσης σε συνδυασμό με ευρυγώνιο fishlens μας επιτρέπει να εναλλάσσουμε εύκολα τις οπτικές γωνίες θέασης: οι κανονικοί φακοί (3 MP, 3 mm) προσφέρουν στενές, υψηλής λεπτομέρειας λήψεις όταν θέλουμε να εστιάσουμε σε μικρά ή πολύ απομακρυσμένα αντικείμενα, ενώ ένας fishlens 12 MP (1.85 mm) δίνει ευρύ πεδίο λήψης, ιδανικό για καταστάσεις όπου επιθυμούμε μέγιστη κάλυψη σε περιορισμένο χώρο. Τρίτον, τοποθετώντας τις κάμερες σε mounting plates εξασφαλίζουμε ακαμπτη στήριξη και δυνατότητα λεπτομερούς ρύθμισης κλίσης και περιστροφής. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης του σημείου προβολής ώστε οι οπτικοί άξονες να επικαλύπτονται καλύτερα, μειώνοντας ακόμα περισσότερο τα blind spots όταν μία όψη παρεμποδίζεται. Τέλος, η ενσωμάτωση bar lights επιτρέπει ομοιόμορφη πλαϊνή ή πίσω φωτιστική δέσμη σε κάθε κάμερα. Με τον συνδυασμό bar lights σε διαφορετικές θέσεις (π.χ. χαμηλά, πλάγια, μεταβλητά ύψη) μπορούμε να «εξομαλύνουμε» τις σκιές που δημιουργούνται από τα υφιστάμενα φωτιστικά και να ελαττώσουμε τις ακανόνιστες αντανακλάσεις. Η μεγάλη εμβέλεια σειρές είναι ιδανικές για να καλύψουν ακόμα και αντικείμενα που βρίσκονται έως και μερικά μέτρα από τις κάμερες, διατηρώντας όμως σταθερή ένταση φωτός. Συνολικά, ο εμπλουτισμός του πλαισίου με ανθεκτικές θήκες IP67, ευέλικτους φακούς υψηλής ανάλυσης και ευρυγώνιες λήψεις, σταθερές βάσεις στήριξης και ομοιογενές barlighting, θα οδηγήσει σε ακόμη καλύτερη ανθεκτικότητα, σαφέστερη απεικόνιση και μεγαλύτερη αξιοπιστία ακόμη και σε πολύ απαιτητικές συνθήκες εργασίας.

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς της προτεινόμενης λύσης βασίζεται σε τρεις δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), που έχουν ήδη οριστεί στο παραδοτέο Π1.1, οι οποίοι αποτυπώνουν τόσο την ακρίβεια εκτίμησης εργονομικών χαρακτηριστικών για την καταπόνηση του χειριστή όσο και τον χρόνο εκτέλεσης που απαιτείται:

- KPI1 Αύξηση ακρίβειας εκτίμησης χαρακτηριστικών του χειριστή
- KPI2 Ταχύτερη εκτίμηση εργονομικών χαρακτηριστικών σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις
- KPI3 Αύξηση ακρίβειας εκτίμησης εργονομικών χαρακτηριστικών του χειριστή παρουσία πολλών ατόμων

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της απόδοσης του συστήματος που παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π3.2 αναδεικνύουν την επίτευξη των παραπάνω δεικτών με μετρήσιμα οφέλη.

2.17. Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η λύση μας αποτελείται από ένα σύνολο νευρωνικών δικτύων τα οποία μπορούν να παρατηρούν μια σκηνή μέσω καμερών και προσφέρουν κατανόηση της δισδιάστατης/τρισδιάστατης πόζας των ανθρώπων, συμπεριλαμβανομένης της τρισδιάστατης κινηματικής επίλυσης της, αντίληψη του τρισδιάστατου βάθους, της τρισδιάστατης γεωμετρίας (διανύσματα κάθετα στις επιφάνειες), κατάτμηση της σκηνής σε κλάσεις (αντικείμενα, οχήματα, άνθρωποι, κείμενο) και λεκτική περιγραφή τόσο της σκηνής όσο και ερωταπαντήσεις σχετικά με την σκηνή στην Ελληνική γλώσσα.

Για να δοκιμαστεί πιλοτικά και να πιστοποιηθεί η λειτουργία κατανόησης σκηνής απαιτείται όπως είναι προφανές δοκιμή της σε πολλαπλές διαφορετικές σκηνές. Χάρη στην ευέλικτη νεφούπολογιστική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιούμε είναι εύκολα δυνατή τόσο η εκτέλεση των εφαρμογών τόσο σε ένα πραγματικό περιβάλλον όσο και σε δεδομένα που αντλούνται από το διαδίκτυο.



Εικόνα 68 Αριστερά: Όλα τα νευρωνικά δίκτυα εκτελούνται στο εικονιζόμενο μηχάνημα στο γραφείο αριστερά που στεγάζεται στο Πανεπιστήμιο Κρήτης και είναι διαθέσιμο στην διεύθυνση <http://greece40.csd.uoc.gr/>. Δεξιά: Πειραματικές δοκιμές των εφαρμογών πραγματοποιήσαμε τόσο σε ανοιχτά σύνολα δεδομένων όσο και στην εγκατάσταση I.C.HUMANS <https://www.ics.forth.gr/hccv/project/15293> που παραχωρήθηκε στο Πανεπιστήμιο Κρήτης για την εκτέλεση των πειραμάτων.

Εργαστηριακή διάταξη πιλοτικής δοκιμής

Για την εκτέλεση των νευρωνικών δικτύων οι παράμετροι που απαιτούνται:

- Ένας διακομιστής Η/Υ με σχετικά πρόσφατες εκδόσεις λογισμικού, τουλάχιστον 16GB RAM και κάρτα γραφικών NVIDIA με τουλάχιστον 16 GB VRAM (εάν θέλουμε να εκτελεί όλα τα δίκτυα ταυτόχρονα). Για τους σκοπούς της πιλοτικής λειτουργίας χρησιμοποιούμε ένα μηχάνημα με AMD Ryzen 9 CPU και NVIDIA RTX 5080 GPU.
- Οι εικόνες εισόδου μπορούν να προέρθουν από διαφορετικές ροές συμπεριλαμβάνοντας εικόνες από συστήματα ασφαλείας webcams, ή και κάμερες IP.
- Η εκτέλεση των νευρωνικών δικτύων μπορεί να γίνει είτε με την χρήση φυλομετρική (browser) από συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, τάμπλετ ή έξυπνες τηλεοράσεις όσο και από λάπτοπ και σταθερούς υπολογιστές μέσω κώδικα Python.



Εικόνα 69 Κεντρική σελίδα λύσης 17 (<http://greece40.csd.uoc.gr/>) δίνοντας τις διάφορες διαθέσιμες επιλογές για εκτέλεση εφαρμογών.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

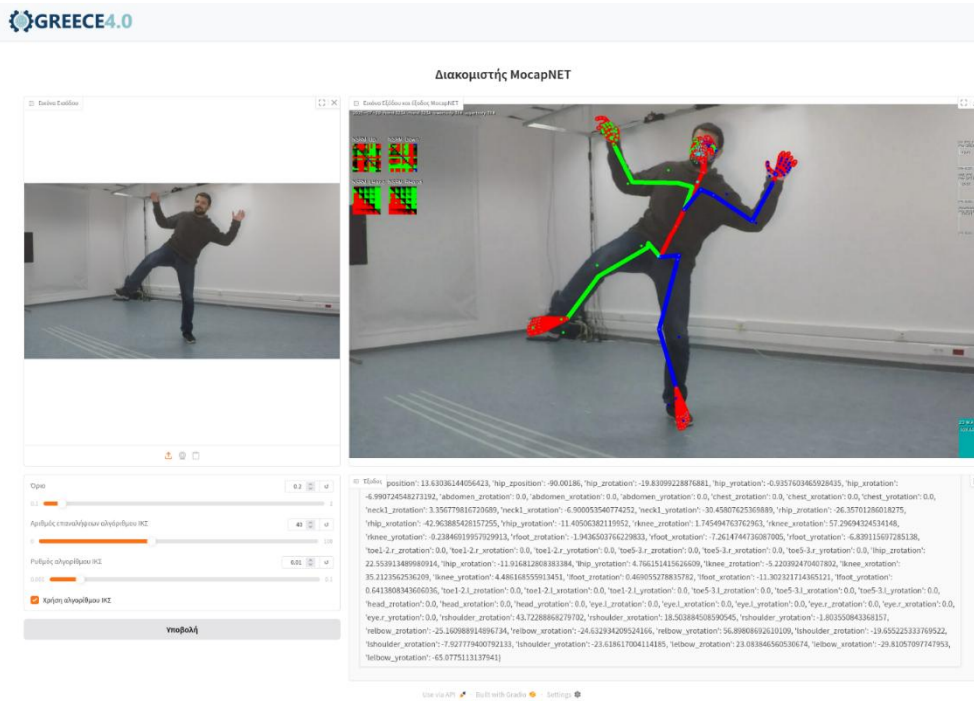
Παρακολούθηση της αρθρωτής κίνησης του ανθρώπινου σώματος χρησιμοποιώντας MocapNETs

Για την δοκιμή μεθόδων που εκτιμούν την θέση και την πόζα του ανθρώπινου σώματος στην διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται τυποποιημένα σύνολα δεδομένων. Κατά την συλλογή τους χρησιμοποιούνται στολές καταγραφής (MOCAP) με ανακλαστές και ένα σύνολο καμερών που επιτρέπουν την εξαγωγή της πραγματικής θέσης του ανθρώπου με ακρίβεια χιλιοστού. Έχοντας αυτά τα δεδομένα οι ερευνητές μπορούν να έχουν μια απόλυτη βάση σύγκρισης σε χιλιοστά που να μπορεί να δώσει ακριβή εικόνα για την ακρίβεια της κάθε μεθόδου. Επιπρόσθετα τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν την συγκριτική αξιολόγηση Ακολουθώντας την διεθνή βιβλιογραφία και χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων H36M που περιλαμβάνει 3.6 εκατομμύρια πόζες μπορούμε να έχουμε μια εργαστηριακή αποτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου. Επιπρόσθετα, η λειτουργία του αλγορίθμου παρακολούθησης της αρθρωτής κίνησης του ανθρώπινου σώματος επικεντρώνεται στο ανθρώπινο σώμα και άρα δεν εξαρτάται από την υπόλοιπη σκηνή. Ως αποτέλεσμα αυτό μας επιτρέπει το να χρησιμοποιούμε την μέθοδο μας και να διεξάγουμε πειράματα σε εργαστηριακό περιβάλλον μεν, τα οποία όμως αντιστοιχούν με την λειτουργία της μεθόδου σε πραγματικό περιβάλλον. Αντλώντας έμπνευση από τα θέματα άλλων λύσεων επιλέγουμε για δοκιμή ένα περιβάλλον μετα-σύμπατος όπου ένας χρήστης φορώντας ένα κράνος εικονικής πραγματικότητας αλληλοεπιδρά με το εικονικό περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας μια κάμερα η λύση μας παρακολουθεί το σώμα του χρήστη καθώς κινείται στον χώρο και παρέχει τρισδιάστατη επίλυση για όλο του το σώμα (συμπεριλαμβάνοντας την θέση των κάτω άκρων). Αντίστοιχα χρησιμοποιώντας video από το διαδίκτυο πραγματοποιούμε επιτήρηση της ανθρώπινης θέσης σε ένα σενάριο όπου ένας άνθρωπος συνεργάζεται με έναν ρομποτικό βραχίονα.



Εικόνα 70 Δοκιμές της εφαρμογής παρακολούθησης της αρθρωτής κίνησης του ανθρώπινου σώματος

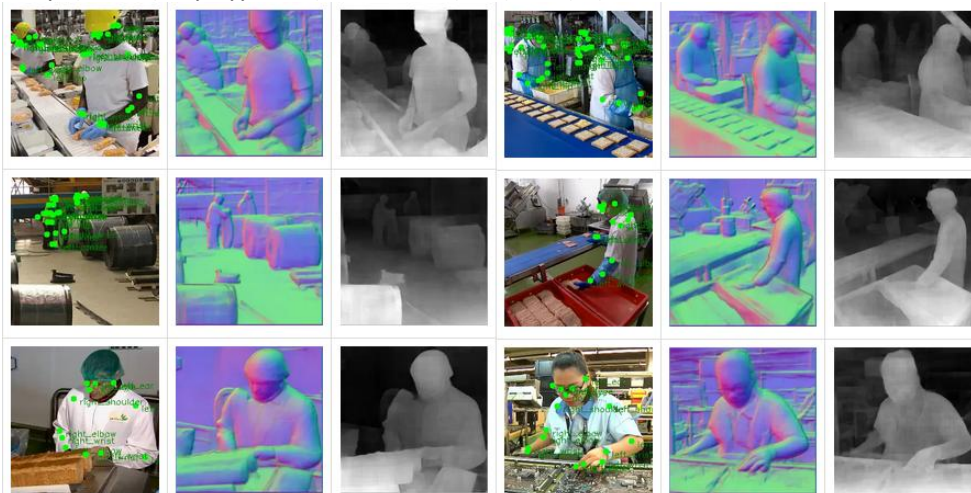
Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 71 Εκτέλεση της εφαρμογής από φυλλομετρητή μέσω της γραφικής διεπαφής Gradio.

Εφαρμογή Εξαγωγής Βάθους/Πόζας/Κλάσης/Περιγραφής

Μετακινώντας την εστίαση των νευρωνικών δικτύων από το ανθρώπινο σώμα στην υπόλοιπη σκηνή η λύση μας χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα που μπορούν να ανταπεξέλθουν και στο τμήμα της σκηνής που δεν απεικονίζει ανθρώπους. Η δεύτερη εφαρμογή μας δέχεται σαν είσοδο εικόνες χρώματος (RGB) και τις αναλύει σε πραγματικό χρόνο παρέχοντας πολλαπλές εξόδους. Πιο συγκεκριμένα εξάγεται βάθος, διανύσματα κάθετα στις επιφάνειες (τρισδιάστατα), γίνεται κατάτμηση της εικόνας σε κλάσεις και εξάγεται μια σύντομη περιγραφή της. Ακολουθώντας την διεθνή επιστημονική μεθοδολογία και καθότι η μέθοδος εκπαιδεύεται στο τυποποιημένο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης COCO17 δοκιμάζουμε την μέθοδο στο σετ επαλήθευσης που επίσης παρέχεται από το COCO17. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να εξάγουμε αντικειμενικές μετρικές ως προς την απόδοση των διαφόρων εξόδων. Στη συνέχεια συλλέγουμε video από το διαδίκτυο και εκτελούμε την μέθοδο σε δεδομένα από πραγματικές γραμμές παραγωγής ώστε να παρατηρήσουμε το κατά πόσο τα παρεχόμενα αποτελέσματα της λύσης είναι ακριβή και αντικατοπτρίζουν την πραγματική κατάσταση στην σκηνή.

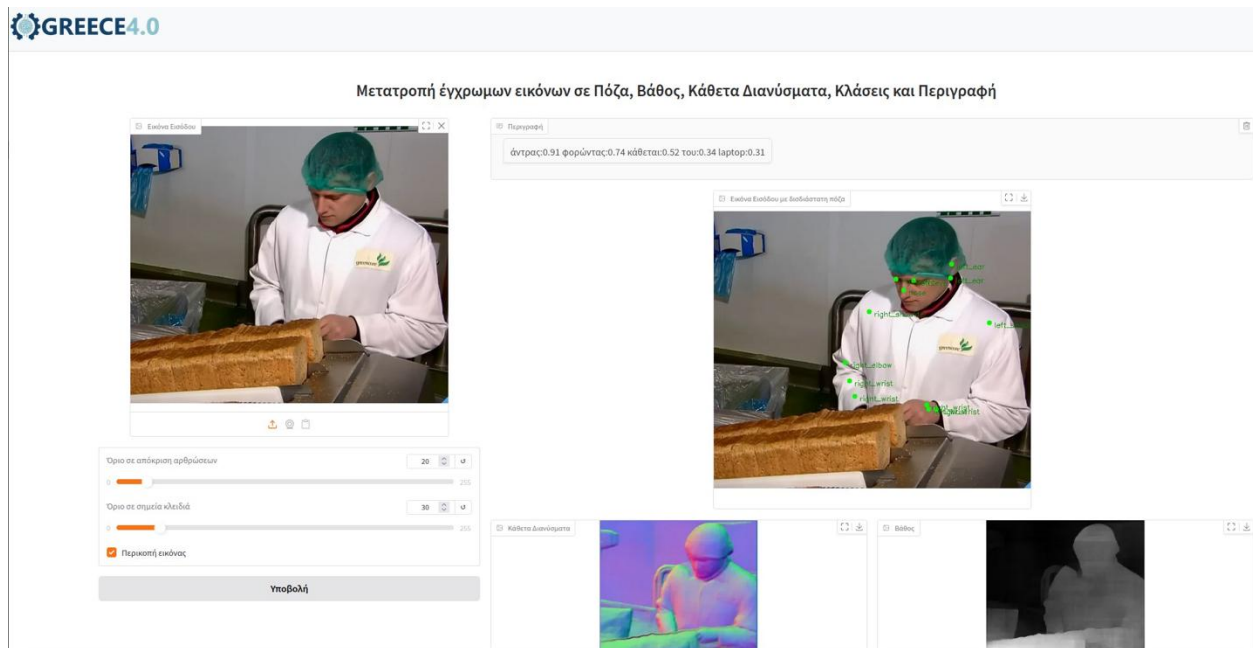


Εικόνα 72 Εκτέλεση της εφαρμογής σε δεδομένα από γραμμές εργασίας σε εργοστάσια, και επιτήρηση των αποτελεσμάτων.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 73 Χρήση των δυνατοτήτων της εφαρμογής σε ένα σενάριο που περιλαμβάνει την ψηφιοποίηση της κυκλοφορίας στους δρόμους χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες κατανόησης σκηνής που προσφέρει η λύση μας. Χρησιμοποιώντας τους χάρτες βάθους και κλάσης οχημάτων, τοποθετούμε δυο σημεία στην εικόνα (κίτρινες κουκίδες στην εικόνα χρώματος), καθώς αυτοκίνητα περνούν η απόκριση του δικτύου μας μας επιτρέπει τον εντοπισμό των αυτοκινήτων (πράσινα γραφήματα) από τα οποία ο άξονας X περιλαμβάνει τον χρόνο και ο άξονας Y την παρουσία ή όχι ενός οχήματος μια δεδομένη στιγμή.



Εικόνα 74 Εκτέλεση της εφαρμογής εξαγωγής βάθους/πόζας/κλάσης/ περιγραφής από φυλλομετρητή μέσω της γραφικής διεπαφής Gradio.


Εφαρμογή Μεγάλου οπτικο-γλωσσικού μοντέλου

Η τελευταία ενότητα της λύσης μας είναι μια εφαρμογή ενός μεγάλου οπτικο-γλωσσικού μοντέλου (vision language model). Το μέγεθος του δικτύου αυτού είναι τεράστιο και η εκπαίδευση του κοστίζει πολλά εκατομμύρια ευρώ και απαιτεί χιλιάδες επιταχυντές γραφικών, να λειτουργούν επί μήνες. Σαν αποτέλεσμα η επιρροή μας στην διαμόρφωση του περιορίζεται στο επίπεδο μετάφρασης από και προς τα Ελληνικά καθώς και στην ενθουσία του μοντέλου χρησιμοποιώντας την ίδια αρχιτεκτονική με τα υπόλοιπα τμήματα της λύσης μας. Για την πειραματική αποτίμηση του, επεκτείνουμε την πιλοτική δοκιμή των εικόνων της οποίες χρησιμοποιούμε στην εφαρμογή εξαγωγής βάθους/πόζας/κλάσης/περιγραφής και σε αυτή την εφαρμογή. Έτσι σαν ένα παράδειγμα δημιουργούμε ερωτήσεις σχετικά με την σύνθεση της εικονιζόμενης σκηνής καθώς και την ασφάλεια του χώρου εργασίας. Διαμορφώνουμε ερωτήσεις όπως για το κατά πόσο υπάρχει κάποιος που να επανδρώνει ένα πόστο επιτήρησης, κατά πόσο τηρούνται πρωτόκολλα ασφαλείας (γάντια, κράνη), κατά πόσο οι γραμμές παραγωγής είναι ενεργές ή όχι καθώς και για την παρουσία ή όχι αντικειμένων στην σκηνή. Σκοπός των πιλοτικών δοκιμών μας είναι τόσο η διαπίστωση της καλής λειτουργίας του μοντέλου (ακρίβεια των αποκρίσεων του) όσο και η δυνατότητα επικοινωνίας στην Ελληνική γλώσσα που πραγματοποιείται μέσω κώδικα που εκτελεί ενδιάμεσες μεταφράσεις της εισόδου και εξόδου από και προς το δίκτυο καθώς το γλωσσικό μοντέλο λειτουργεί με ακρίβεια κυρίως στην Αγγλική γλώσσα.

VLM Generate: Success

Πριν κάθε ερώτηση, πατήστε Νέα Συνομιλία. Ειδικές λέξεις κλειδιά: <image>, Οπτική θεμελίωση: <zet|>ερώτηση|</zet|>, Συνομιλία με θεμελίωση στην εικόνα: <|grounding|>ερώτηση|

Συνομιλητής Τεχνητής Νοημοσύνης






TAGO Do workers wear protective gloves and helmets?

Ναι, το κάνουν.

<|grounding|> Φορούν οι εργαζόμενοι προστατευτικά γάντια και κράνη; Αποστολή Τέλος

Νέα Συνομιλία Επανερώτηση Διαγραφή της τελευταίας σειράς

Αρχεία		
sample01.jpg		< grounding > Φορούν οι εργαζόμενοι προστατευτικά γάντια και...
sample02.jpg		< grounding > Φοράνε οι εργαζόμενοι προστατευτικά γάντια;
sample03.jpg		< grounding > Είναι γεμάτη η γραμμή παραγωγής;

Εικόνα 75 Εκτέλεση του οπτικο-γλωσσικού μοντέλου μέσω φυλλομετρητή gradío και επερωτήσεις σε σκηνές από βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Για τη πιστοποίηση της λειτουργίας του Ψηφιακού Διδύμου έχουν οριστεί οι δείκτες επαλήθευσης της ανάπτυξης της πλατφόρμας, οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 18. Η λύση είναι εύκολα χρησιμοποιήσιμη από άλλες εφαρμογές χάρη στον προσφερόμενο κώδικα που δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια ανάπτυξης της. Τα σενάρια αυτά καθώς και τα κριτήρια επαλήθευσή τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 18 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Σενάριο	Στόχος	Μέσα επαλήθευσης
ΚΡΙ1: Εξαγωγή μετρικών σχετικά με την ακρίβεια των μεθόδων της λύσης		
Εκτέλεση λύσης σε τυποποιημένα δεδομένων που χρησιμοποιούνται από ερευνητική κοινότητα	Έλεγχος ορθής λειτουργίας και εξαγωγή απόλυτων τιμών ακρίβειας στην: 3D αρθρωτή επιλυσή του ανθρώπινου σώματος, εξαγόμενου βάθους, κατηγοριοποίησης σε κλάσεις και 2D πόζα	Χρήση του συνόλου δεδομένων Human 3.6M για την τρισδιάστατη ανθρώπινη θέση και αρθρωτή κίνηση Χρήση του συνόλου δεδομένων επαλήθευσης COCO17 για εξαγωγή βάθους, κλάσης, περιγραφής.
Εκτέλεση λύσης σε δεδομένων που συλλέξαμε στο εργαστήριο με κράνος VR	Έλεγχος ορθής λειτουργίας και εξαγωγή απόλυτων τιμών ακρίβειας στην: 3D αρθρωτή	Δοκιμή των μεθόδων στα δεδομένα που βιντεοσκοπήσαμε,

Σενάριο	Στόχος	Μέσα επαλήθευσης
εξομοιώνοντας τη χρήση μετασύμπαντος	επίλυση του ανθρώπινου σώματος, εξαγόμενου βάθους, κατηγοριοποίησης σε κλάσεις και 2D πόζα	οπτικοποίηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων των νευρωνικών δικτύων
Εκτέλεση λύσης σε σύνολα δεδομένων που συλλέξαμε από σκηνές σε βιομηχανικά περιβάλλοντα από το internet	Έλεγχος ορθής λειτουργίας και εξαγωγή απόλυτων τιμών ακρίβειας στην: 3D αρθρωτή επίλυση του ανθρώπινου σώματος, εξαγόμενου βάθους, κατηγοριοποίησης σε κλάσεις και 2D πόζα	Δοκιμή των μεθόδων σε δεδομένα από πραγματικές βιομηχανίες, οπτικοποίηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων των νευρωνικών δικτύων
KPI2: Εξαγωγή μετρικών σχετικά με την ταχύτητα απόκρισης		
Εκτέλεση λύσης σε δεδομένα που προέρχονται από ζωντανές ροές εικόνων	Έλεγχος της ταχύτητας απόκρισης	Δοκιμή των επιμέρους δυνατοτήτων σε ζωντανές ροές δεδομένων που έρχονται από πραγματικές κάμερες και επαλήθευση της ταχύτητας απόκρισης των διαφόρων νευρωνικών δικτύων τα οποία χρησιμοποιούμε
Εκτέλεση λύσης σε αποθηκευμένα δεδομένα	Έλεγχος της ταχύτητας απόκρισης	Δοκιμή των επιμέρους δυνατοτήτων σε δεδομένα που έρχονται από ήδη καταγεγραμμένα αρχεία και επαλήθευση της ταχύτητας απόκρισης των διαφόρων νευρωνικών δικτύων τα οποία χρησιμοποιούμε
KPI3: Δοκιμή διασυνδεσιμότητας API λύσεων με την γλώσσα Python		
Εκτέλεση κώδικα εκτός της λύσης που να μπορεί να επεξεργάζεται ροές εικόνων	Έλεγχος της διασυνδεσιμότητας της λύσης με τρίτες εφαρμογές	Δοκιμή των επιμέρους API που διαθέτει η λύση και χρήση τους από ανεξάρτητο κώδικα και επαλήθευση της επεκτασιμότητας της λύσης και της ευκολίας ενοποίησης της με τρίτες εφαρμογές που μπορεί να εξυπηρετούν μια επιχείρηση/βιομηχανία

2.18. Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων

Ολοκλήρωση και Εγκατάσταση Πιλοτικού Συστήματος

Η προσφερόμενη τεχνολογική λύση παρέχει μια πλατφόρμα εργαλείων στις βιομηχανικές παραγωγικές μονάδες για οπτική παρακολούθηση και κατανόηση της συμπεριφοράς των εργαζομένων κατά την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, όπως αυτή διαμορφώνεται από την συμμετοχή τους στα στάδια συναρμολόγησης ενός προϊόντος και από την όλη παρουσία τους στο χώρο εκτέλεσης της παραγωγικής διαδικασίας. Τα εργαλεία της προσφερόμενης λύσης αξιοποιούν τεχνολογίες αναγνώρισης και ανάλυσης ανθρωπίνων δράσεων και δραστηριοτήτων βασισμένων σε αλγόριθμους Μηχανικής Μάθησης και Τεχνητής Νοημοσύνης.

Η πιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος έγινε στο αντίγραφο-μικρογραφία μιας μικρής γραμμής συναρμολόγησης ενός εξαρτήματος-προϊόντος, η οποία για πρακτικούς λόγους φιλοξενήθηκε στην Εθνική Υποδομή I.C.HUMANS <https://www.ics.forth.gr/hccv/project/15293> που παραχωρήθηκε στο Πανεπιστήμιο Κρήτης για την εκτέλεση των πειραμάτων.

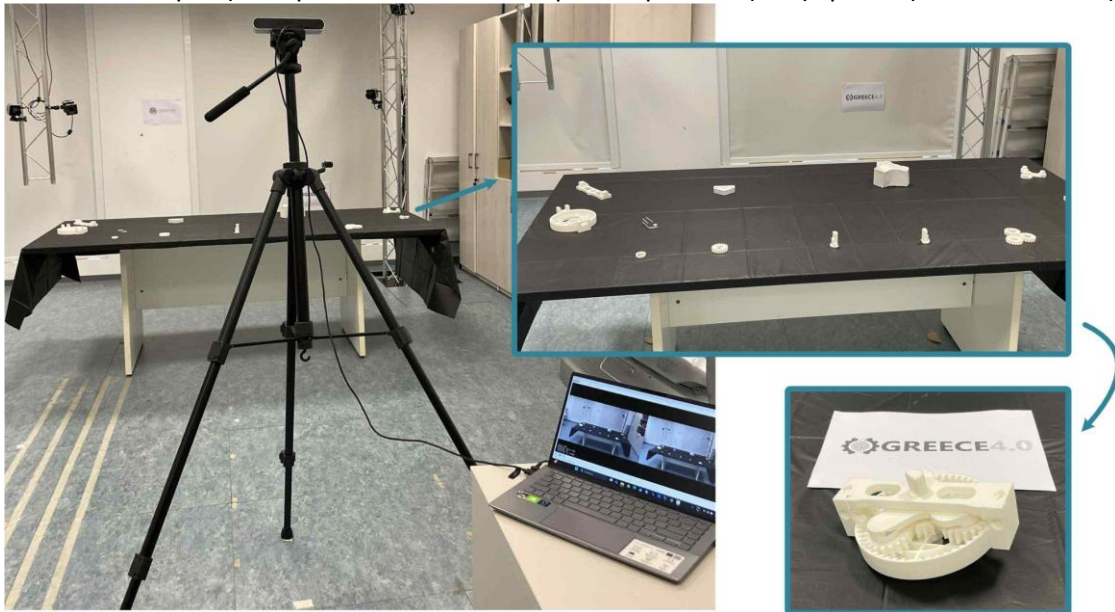
Εργαστηριακή διάταξη βιομηχανικού τύπου διαδικασίας συναρμολόγησης

Δεδομένου ότι η προσφερόμενη πλατφόρμα αξιοποιεί δεδομένα βίντεο για την αναγνώριση και κατανόηση της συμπεριφοράς των εργαζομένων, η εγκατάσταση του πιλοτικού συστήματος απαιτεί την τοποθέτηση οπτικών αισθητήρων στο χώρο εργασίας για την καταγραφή του οπτικού υλικού καθώς και έναν εξυπηρετητή για την αποθήκευση των δεδομένων και την εκτέλεση των εργαλείων. Ως σενάριο παραγωγικής διαδικασίας επιλέχθηκε η διαδικασία συναρμολόγησης ενός πλανητικού συστήματος οδοντωτών τροχών, το οποίο είναι και το σενάριο που υιοθετείται από σετ δεδομένων HA4M, το οποίο αξιοποιήθηκε και για την ποσοτική αξιολόγηση της επίδοσης της λύσης κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες. Η Εικόνα 76 παρουσιάζει στιγμιότυπο από την εγκατάσταση της λύσης στο εργαστηριακό περιβάλλον, και από την τελική μορφή του εξαρτήματος μετά την διαδικασία συναρμολόγησης. Συγκεκριμένα η διαδικασία συναρμολόγησης αποτελείται από τρεις υπο-διαδικασίες (δραστηριότητες):

(α) Συναρμολόγηση του φορέα πλανητικών τροχών (planet carrier) - **Δραστηριότητα Block 1**, διαδικασία αποτελούμενη από ακολουθία 4 διακριτών (επαναλαμβανόμενων σε εμφάνιση) δράσεων.

(β) Συναρμολόγηση και τοποθέτηση του ηλιακού τροχού (sun gear) - **Δραστηριότητα Block 2**, μια διαδικασία αποτελούμενη από μια ακολουθία 4 διακριτών δράσεων (διαφορετικές του Block 1).

(γ) Τοποθέτηση του δακτυλιοειδούς τροχού (ring gear) - **Δραστηριότητα Epicyclic Gear Train**, διαδικασία αποτελούμενη από μια ακολουθία 4 διακριτών δράσεων (διαφορετικές των Block 1 & 2).

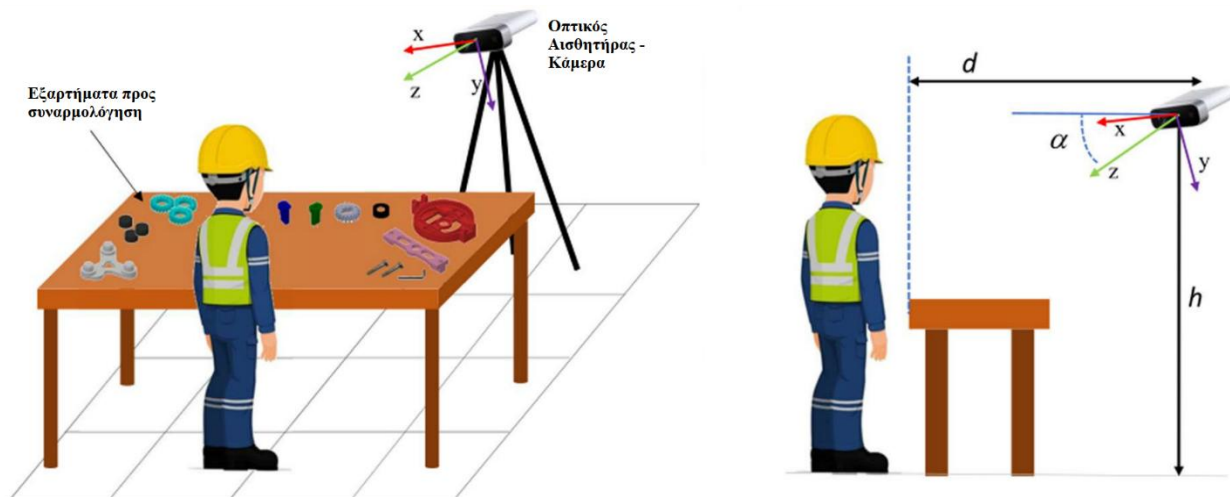


Εικόνα 76 Πειραματική διάταξη γραμμής συναρμολόγησης του προϊόντος (πλανητικό σύστημα οδοντωτών τροχών) και η τελική μορφή του. Η εγκατάσταση του πιλοτικού συστήματος απαιτεί (α) την τοποθέτηση ενός οπτικού αισθητήρα σε θέση που

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

επιτρέπει στο πεδίο θέασης του να απεικονίζεται ο πάγκος εργασίας, και (β) ένας υπολογιστής για την πρόσβαση στο εργαλείο καταγραφής και στην διαδικτυακή πλατφόρμα των εργαλείων της λύσης.

Όπως αναδείχθηκε κατά την διάρκεια ανάπτυξης της λύσης, η τοποθέτηση των οπτικών αισθητήρων στο χώρο είναι κρίσιμης σημασίας για την ορθή και βέλτιστη λειτουργία όλων των εργαλείων της λύσης. Ως εκ τούτου, έχοντας ως κατηγορία παραγωγικής διαδικασίας εκείνη κατά την οποία ένας εργαζόμενος συναρμολογεί ένα προϊόν σε έναν πάγκο εργασίας, καθορίσαμε κατά την πιλοτική εγκατάσταση του συστήματος προδιαγραφές τοποθέτησης του οπτικού αισθητήρα στον χώρο. Για την εξαγωγή αυτών των προδιαγραφών, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 77, βασιστήκαμε στην σχετική βιβλιογραφία, ωστόσο, οι γενικές απαιτήσεις του συστήματος επιτρέπουν την διαφοροποίηση των σημείων τοποθέτησης των αισθητήρων υπό την προϋπόθεση ότι το εύρος κάλυψης εμπεριέχει ολόκληρο τον πάγκο εργασίας και η ανάλυση είναι επαρκής για την διάκριση των εξαρτημάτων και των εργαλείων που αξιοποιούνται κατά την παραγωγική διαδικασία. Ως προς την ανάλυση του οπτικού αισθητήρα η ελάχιστη προδιαγραφή που προτείνεται είναι 2K (2048 × 1080 pixels). Για την πιλοτική εγκατάσταση του συστήματος αξιοποιήθηκε μια η ZED v1 κάμερα (κατασκευαστής Stereolabs), η οποία συνδέθηκε μέσω USB 3.0 διεπαφής στον υπολογιστή συλλογής δεδομένων, με προδιαγραφές καταγραφής 2K (2208 x 1242 pixels) ανάλυση και ρυθμό καρέ τις 15 καρέ/δευτερόλεπτο (fps). Για την καταγραφή των δεδομένων βίντεο χρησιμοποιήθηκε η σχετική γραφική διεπαφή από το πακέτο ανάπτυξης λογισμικού (Software Development Kit - SDK) της κατασκευάστριας εταιρείας.



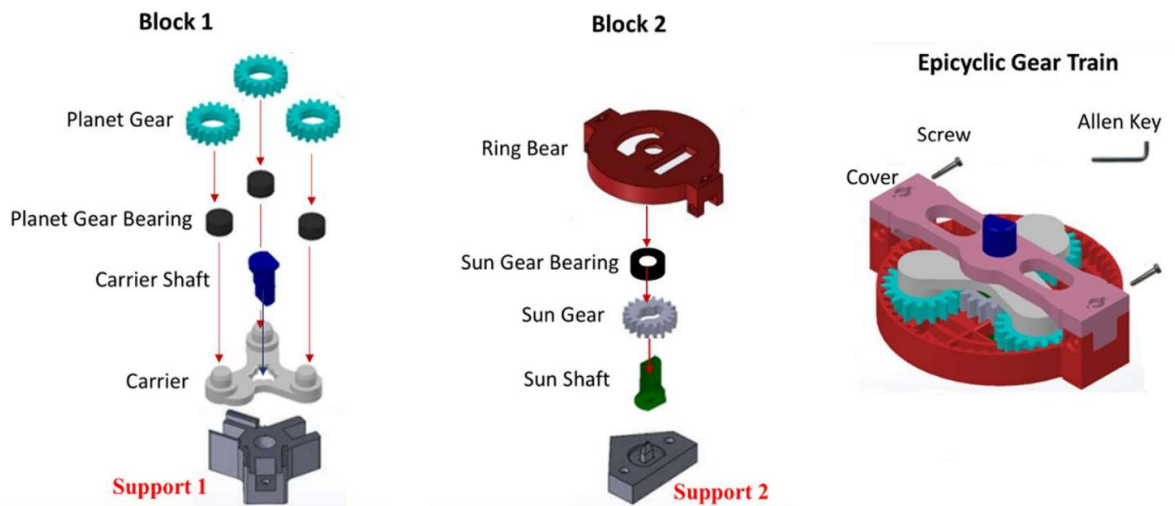
Εικόνα 77 Σχηματική αναπαράσταση της τοπολογίας οπτικού αισθητήρα σε σχέση με τον πάγκο εργασίας όπως αυτή υιοθετήθηκε για το συγκεκριμένο σενάριο εργασίας βασιζόμενη στην ενδεικτική βιβλιογραφία. Η απόσταση του οπτικού αισθητήρα από το πάγκο εργασίας (d) είναι 1.78μ., από το έδαφος (h) είναι 1.54μ., και η κλίση (γωνία θέασης - α) ήταν 17°.

Αναφορικά με τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη συναρμολόγηση του πλανητικού συστήματος οδοντωτών τροχών, εκτυπώθηκαν 3D αξιοποιώντας τα διαθέσιμα 3D μοντέλα (3D CAD αρχεία) με PLA υλικό, και ήταν τα ακόλουθα: **Block 1:** 3 x φορέας πλανητικών τροχών (planet gear), 3 x ρουλεμάν πλανητικών τροχών (planet gear bearings), 1 x άξονας φορέα (carrier shaft), 1 x φορέας (carrier), **Block 2:** 1 x ρουλεμάν σε μορφή δακτυλίου (ring bear), 1x ρουλεμάν ηλιακού γραναζιού (sun gear bearing), 1 x ηλιακός οδοντωτός τροχός (sun gear), 1 x ηλιακός άξονας (sun shaft), **Epicyclic Gear Train (EGT):** 1 x κάλυμμα}. Επίσης, για την συναρμολόγηση χρησιμοποιήθηκαν 2 βίδες και ένα κλειδί Allen. Η Εικόνα 78 παρουσιάζει την 3D απεικόνιση του κάθε εξαρτήματος για κάθε διαδικασία.

Μοντελοποίηση της διαδικασίας συναρμολόγησης με χρήση των εργαλείων της λύσης

Η διαδικασία μοντελοποίησης μια διαδικασίας συναρμολόγησης (οποιοδήποτε σεναρίου) μέσω της αξιοποίησης των παρεχόμενων εργαλείων της λύσης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

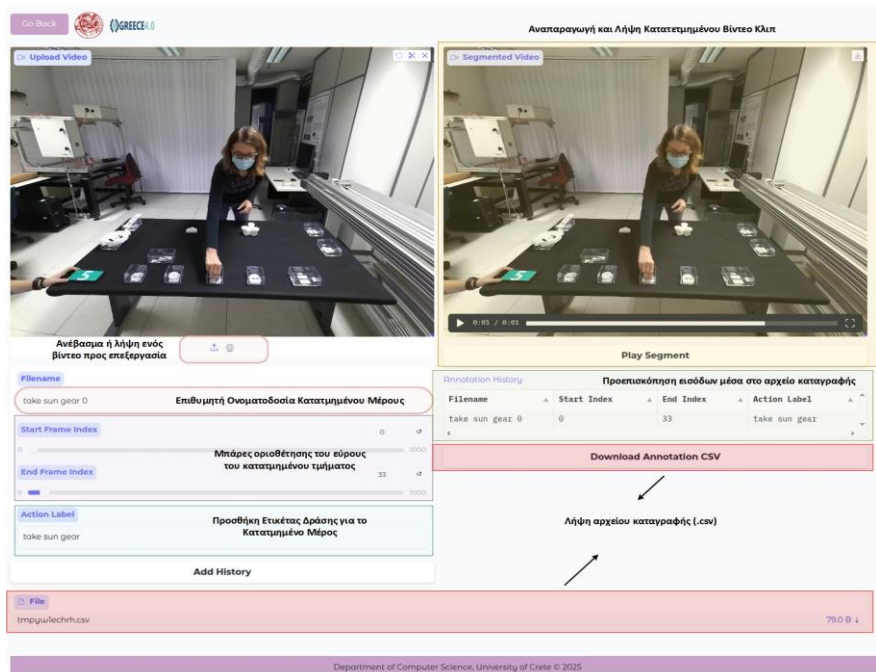
Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα



Εικόνα 78 Σχηματική αναπαράσταση των εξαρτημάτων και των ακολουθιών τοποθέτησής τους για κάθε διαδικασία.

Συλλογή και Προετοιμασία Εκπαιδευτικών Δεδομένων

Για την εκπαίδευση των προσφερόμενων μοντέλων κατανόησης ανθρώπινων δράσεων και δραστηριοτήτων που προσφέρει η λύση απαιτείται η συλλογή κατάλληλων δεδομένων εκπαίδευσης, η οποία πραγματοποιείται σε offline περιβάλλον. Τα δεδομένα προέρχονται από καταγεγραμμένες εκτελέσεις της διαδικασίας συναρμολόγησης και υποβάλλονται σε επισήμειση (annotation) με τη χρήση του σχετικού προσφερόμενου εργαλείου (γραφική διεπαφή) της λύσης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 79, και το οποίο επιτρέπει την αποδοτική σήμανση επιμέρους δράσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί πως προγενέστερα της χρήσης του εργαλείου απαιτείται ο ορισμός του συνόλου των δράσεων που απαρτίζουν την διαδικασία συνυπολογίζοντας ως επιπλέον και τη κατηγορία “Δράση Υποβάθρου” (background action). Η συγκεκριμένη κατηγορία θα περιλαμβάνει περιπτώσεις μη σχετικών με την διαδικασία δράσεων που μπορεί να παρατηρηθούν.



Εικόνα 79 Διαδικασία επισήμανσης δεδομένων εξεταζόμενου σεναρίου με χρήση της προσφερόμενης διαδικτυακής διεπαφής.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Εκπαίδευση Μοντέλων Αναγνώρισης Δραστηριότητας και Δράσεων

Τα επισημασμένα βίντεο εκπαίδευσης αξιοποιούνται για την εκπαίδευση του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων που προσφέρει η λύση, λεπτομέρειες του οποίου παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π.2.2. Δεδομένου ότι το εξεταζόμενο σενάριο στην πιλοτική εφαρμογή της λύσης αποτελεί αναπαραγωγή της διαδικασίας που περιγράφεται σε ένα ευρέως διαθέσιμο σύνολο δεδομένων για την αξιολόγηση μοντέλων οπτικής αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων (HA4M), η εκπαίδευση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το παρεχόμενο σετ εκπαίδευσης. Με το πέρας εκπαίδευσης το μοντέλο ενσωματώνεται τροποποιώντας σχετικές παραμέτρους στο προσφερόμενο γραφικό εργαλείο αναγνώρισης δραστηριότητας.

Ενσωμάτωση Εκπαιδευμένων Μοντέλων στις Γραφικές Διεπαφές Αναγνώρισης

Το εκπαιδευμένο μοντέλο για το εξεταζόμενο σενάριο ενσωματώνεται στην γραφική διεπαφή αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων, μεταφέροντας α) τα βάρη του μοντέλου, β) το εξαγόμενο αρχείο (.csv) των επισημάνσεων εκπαίδευσης και γ) ένα κατάλληλα διαμορφωμένο αρχείο (.txt) το οποίο περιλαμβάνει την σύντομη περιγραφή των παρατηρούμενων ακολουθιών εκτέλεσης της εκάστοτε δραστηριότητας. Τα τρία αρχεία αξιοποιούνται από την προσφερόμενη γραφική διεπαφή αναγνώρισης (Εικόνα 80) για την αναγνώριση της εκάστοτε δράσης που επιτελείται σε χρονικά παράθυρα προκαθορισμένου μεγέθους και της δραστηριότητας στην οποία ανήκει. Επίσης, η διεπαφή ενσωματώνει ρουτίνες αναγνώρισης αποκλίσεων/σφαλμάτων από το πρωτόκολλο της εκάστοτε δραστηριότητας υπό την μορφή επισήμανσης χρονικών στιγμών κατά τις οποίες έχουμε την εμφάνιση μη αναμενόμενης δράσης καθώς και της επισήμανσης των δράσεων της εκάστοτε διαδικασίας που δεν παρατηρήθηκαν μετά το πέρας της εκτέλεσης της. Επιπρόσθετα, η διεπαφή περιλαμβάνει μηχανισμούς οι οποίοι επιτρέπουν την αυτόματη εκτίμηση του αναμενόμενου πρωτοκόλλου εκτέλεσης δράσεων για την εκάστοτε δραστηριότητα. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις προδιαγραφές του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων, καθώς και για τους μηχανισμούς ανίχνευσης αποκλίσεων μπορούν να βρεθούν στο Π2.2 του έργου.

The screenshot displays the 'Προεπισκόπηση Βίντεο (Επιλογές Εκτέλεση/Παύση, Ανίρωση)' interface. It includes a video player on the left, a table of 'Activity Execution Progress Results' in the center, and several control buttons and informational text on the right and bottom.

Start Time	End Time	Action	A_Pr	Activity	Ac_Pr	Mistake
0.00sec	3.00sec	place_sun_shaft	0.88	Block2	0.76	correct
0.67sec	3.67sec	place_sun_gear	0.98	Block2	1.00	correct
1.33sec	5.00sec	place_carrier	0.47	Block2	1.00	correct
2.67sec	5.67sec	pick_up_sun_gear_bearing	0.93	Block2	1.00	correct
3.33sec	7.67sec	pick_up_gear_bearings	0.50	Block2	1.00	correct
5.33sec	8.33sec	place_ring_bear	0.80	Block2	1.00	correct
6.00sec	11.00sec	pick_up_gear_bearings	0.42	Block2	1.00	correct
8.67sec	15.00sec	place_ring_bear	0.97	Block2	1.00	correct
12.67sec	16.33sec	pick_up_gear_bearings	0.26	Block2	1.00	correct

Χρονικό διάστημα εκτίμησης

Εκτιμώμενη δράση για το εκάστοτε διάστημα, και η πιθανότητα της πρόβλεψης

Εκτιμώμενη δραστηριότητα και η πιθανότητα της πρόβλεψης

Εκτίμηση για την ύπαρξη απόκλισης (σφάλματος)

Παρουσίαση του γράφου εκτέλεσης των βημάτων με βάση τις εκτιμήσεις του μοντέλου.

Show Estimated Activity Graph

Παρουσίαση του αναμενόμενου πρωτοκόλλου εκτέλεσης για την συγκεκριμένη δραστηριότητα

Expected Task Graph of Activity: Block2

Department of Computer Science, University of Crete © 2025

Εικόνα 80 Στιγμιότυπο από την ανάλυση μέσω της γραφικής διεπαφής αξιοποίησης του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων σε ένα από τα ληφθέντα βίντεο στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Κρήτης για το εξεταζόμενο σενάριο.

Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας

Για τη πιστοποίηση της λειτουργίας των μοντέλων και των μηχανισμών της λύσης για την έξυπνη οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και τήρησης πρωτοκόλλων έχουν οριστεί συγκεκριμένα σενάρια χρήσης με στόχο τον έλεγχο της επίτευξης των ακόλουθων δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicator - KPI):

- KPI 1: Αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων και δραστηριοτήτων. Στόχος απόδοσης είναι η επίτευξη 50% μέσης ακρίβειας, τόσο στην αναγνώριση των δράσεων, όσο και στην αναγνώριση της εκάστοτε δραστηριότητας.
- KPI 2: Αξιολόγηση της ικανότητας του συστήματος να βρίσκει αποκλίσεις στην εκτέλεση του πρωτοκόλλου των βημάτων (δράσεων).

Τα σενάρια που επιλέχθηκαν για τον έλεγχο επίτευξης των προαναφερθέντων δεικτών απόδοσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 19 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας για την λύση 18

Σενάριο	Στόχος	Μέσα επαλήθευσης
KPI1: Αξιολόγηση απόδοσης μοντέλου αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων		
Αξιολόγηση στο υποσύνολο ελέγχου (test set) ενός επιμελημένου ακαδημαϊκού συνόλου δεδομένων (HA4M), στο οποίο οι οπτικοί αισθητήρες και οι τοποθεσίες καταγραφής ταυτίζονται με εκείνες του υποσυνόλου εκπαίδευσης (training set).	Εκτίμηση της απόδοσης του μοντέλου σε συνθήκες παρόμοιες με εκείνες της εκπαίδευσης, με στόχο την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας του σε ελεγχόμενο περιβάλλον.	1.Χρήση καθιερωμένων ποσοτικών μετρικών: mean Accuracy (mAcc), Precision, Recall, F1-score. 2. Ποιοτική αξιολόγηση μέσω της οπτικής επιβεβαίωσης των εκτιμήσεων μοντέλου με την χρήση δειγμάτων-βίντεο στην γραφική διεπαφή.
Αξιολόγηση σε σύνολο βίντεο ελέγχου που καταγράφηκαν υπό τις εξής διαφορετικές συνθήκες: 1. διαφορετική τοποθεσία (Πανεπιστήμιο Κρήτης), 2. με διαφορετικό οπτικό αισθητήρα (ZED v1 έναντι του Microsoft Azure Kinect που χρησιμοποιήθηκε κατά την λήψη των δεδομένων εκπαίδευσης), 3. διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ του οπτικού αισθητήρα και του πάγκου εργασίας (α) απόσταση 1.54μ., (β) απόσταση 2.40μ.	Διερεύνηση της γενικευσιμότητας και της ανθεκτικότητας του μοντέλου σε συνθήκες αλλαγής περιβάλλοντος και αισθητήρα, προσεγγίζοντας ένα ρεαλιστικό σενάριο μεταφοράς.	1. Χρήση καθιερωμένων ποσοτικών μετρικών: mean Accuracy (mAcc), Precision, Recall, F1-score. 2. Ποιοτική αξιολόγηση μέσω της οπτικής επιβεβαίωσης των εκτιμήσεων μοντέλου με την χρήση δειγμάτων-βίντεο στην γραφική διεπαφή.
KPI2: Αξιολόγηση λειτουργίας μηχανισμών εξεύρεσης αποκλίσεων από πρωτόκολλα διαδικασιών		
Αξιολόγηση λειτουργίας μηχανισμών εξεύρεσης αποκλίσεων από πρωτόκολλα διαδικασιών: εκτέλεση μη αναμενόμενης δράσης.	Εξέταση της ικανότητας του συστήματος να εντοπίζει αποκλίνουσες ή λανθασμένες ενέργειες, όταν πραγματοποιείται μια δράση που δεν προβλέπεται από το πρότυπο πρωτόκολλο εκτέλεσης.	Επιτυχής επισήμανση του σφάλματος σε σχετικό πεδίο στην γραφική διεπαφή αξιοποίησης του μοντέλου.

Π3.1 - Πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα

Αξιολόγηση λειτουργίας μηχανισμών εξεύρεσης αποκλίσεων από πρωτόκολλα διαδικασιών: παράλειψη δράσης	Έλεγχος της δυνατότητας του συστήματος να ανιχνεύσει ελλείπουσες κρίσιμες ενέργειες, δηλαδή περιπτώσεις όπου δεν εκτελείται μια αναμενόμενη δράση, όπως ορίζεται από το πρωτόκολλο.	Επιτυχής επισήμανση του σφάλματος σε σχετικό πεδίο στην γραφική διεπαφή αξιοποίησης του μοντέλου.
--	---	---
