

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:

Π2.2

Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Απρίλιος 2025

Ιστορικό αναθεωρήσεων του κειμένου

Κωδ.	Ημ/νία	Περιγραφή
0.1	24-04-2025	Πρώτη έκδοση υποδείγματος
0.2		
0.3		
0.4		
0.5		
0.6		
0.7		
0.8		
1.0		

Περίληψη – Ελληνικά

Το παραδοτέο Π2.2 του έργου Greece4.0 παρουσιάζει την τελική έκδοση ενός συνόλου ολοκληρωμένων λύσεων που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση των κυβερνο-φυσικών συστημάτων παραγωγής στο πλαίσιο του Industry 4.0. Περιλαμβάνει 19 τεχνολογικές εφαρμογές οι οποίες αξιοποιούν προηγμένες τεχνολογίες, όπως Τεχνητή Νοημοσύνη, Ψηφιακά Δίδυμα, Ρομποτική και Ανάλυση Δεδομένων. Μεταξύ των καινοτομιών συγκαταλέγονται αυτόνομα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθηκών και γραμμών παραγωγής, ευέλικτες πλατφόρμες συνεργατικών ρομπότ με χρήση AI και ψηφιακών διδύμων, καθώς και εργαλεία προβλεπτικής λήψης αποφάσεων. Επιπλέον, παρουσιάζονται λύσεις για παραγωγή συνθετικών δεδομένων για εκπαίδευση μοντέλων AI, ασφαλή αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ, εκπαιδευτικά ολογράμματα και περιβάλλοντα προσομοίωσης. Κάθε εφαρμογή περιγράφεται αναλυτικά με αρχιτεκτονικά διαγράμματα, βήματα υλοποίησης και αξιολόγηση σε ρεαλιστικά ή εικονικά βιομηχανικά περιβάλλοντα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη διαλειτουργικότητα, την επεκτασιμότητα και τον συντονισμό σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας ευελιξία ενσωμάτωσης στις ελληνικές βιομηχανίες. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την τεχνολογική ωριμότητα των λύσεων και συμβάλλουν στη βελτίωση της παραγωγικής ευελιξίας, της ασφάλειας των εργαζομένων και της έξυπνης αυτοματοποίησης, ενισχύοντας τη μετάβαση στον ψηφιακό μετασχηματισμό, όπως προβλέπεται στο Εθνικό Σχέδιο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας Ελλάδα 2.0.

Περίληψη – Αγγλικά

Deliverable D2.2 of the Greece4.0 project constitutes a compilation of the final version of a comprehensive set of digital solutions aimed at optimizing cyber-physical production systems within the framework of Industry 4.0. This deliverable demonstrates 19 fully developed applications which focus on the integration of advanced digital technologies such as Artificial Intelligence (AI), Digital Twins (DT), robotic automation, and data analytics in industrial environments. Key innovations include autonomous robotic systems for warehouse and assembly line management, flexible platforms for collaborative industrial robots using AI-based digital twins, and predictive decision-making tools for manufacturing processes. The deliverable also covers synthetic data generation for AI model training, secure human-robot interaction, 3D holographic training interfaces, and advanced simulation environments. Each solution is presented with detailed architectural diagrams, implementation steps, and evaluation scenarios in real or simulated manufacturing environments. Special emphasis is placed on modularity, interoperability, and real-time system orchestration, enabling flexible deployment across various manufacturing sectors. The results validate the technological maturity and applicability of the developed systems, offering a toolkit for enhancing production agility, worker safety, and intelligent automation in modern Greek manufacturing industries. The deliverable reflects the project's ambition to support digital transformation and industrial resilience in alignment with the Greece 2.0 National Recovery and Resilience Plan.

Περιεχόμενα

Ιστορικό αναθεωρήσεων του κειμένου	2
Περίληψη – Ελληνικά	3
Περίληψη – Αγγλικά	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων	13
1 Εισαγωγή	15
1.1 Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου	15
1.2 Υλοποίηση Τελικής Έκδοσης	15
2 Τελικές Εκδόσεις των Εφαρμογών του έργου Greece4.0	16
2.1 Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής	16
2.1.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης	16
2.1.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	16
2.1.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	17
2.1.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα	21
2.2 Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης	23
2.2.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης	23
2.2.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	23
2.2.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	24
2.2.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα	26
2.3 Λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση υβριδικών μεθόδων	29
2.3.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης	29
2.3.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	29
2.3.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	30
2.3.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα	33
2.3.5 Αναφορές	36
2.4 Λογισμικό για την δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης	37
2.4.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης	37
2.4.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	38
2.4.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	40
2.4.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα	44
2.5 Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Εξοπλισμού στην Βιομηχανία 4.0	48
2.5.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης	48

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής	
2.5.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	48
2.5.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	50
2.5.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα.....	52
2.6 Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Διαδικασιών στην Βιομηχανία 4.0	56
2.6.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης.....	56
2.6.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	57
2.6.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	59
2.6.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα.....	66
2.7 Πλατφόρμα Ανάλυσης και Διαχείρισης Δεδομένων από το Βιομηχανικό Δίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things).....	68
2.7.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης.....	68
2.7.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	69
2.7.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	70
2.7.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα.....	73
2.8 Ολογράμματα βασισμένα σε Ψηφιακά Δίδυμα για μεταφορά γνώσης και εκπαίδευση εργαζομένων-χειριστών στο περιβάλλον της Βιομηχανίας 4.0.....	73
2.8.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης.....	73
2.8.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	75
2.8.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	76
2.8.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα.....	78
2.9 Εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής και διαχείρισης προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής.....	81
2.9.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης.....	81
2.9.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης	81
2.9.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	83
2.9.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα.....	89
2.9.5 Αναφορές.....	90
2.10 Κυκλικές αλυσίδες αξίας μέσω διαχείρισης και παρακολούθησης δευτερογενών υλικών με χρήση ψηφιακών διδύμων και διαβατηρίων προϊόντων	90
2.10.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης	90
2.10.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης.....	91
2.10.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	93
2.10.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα	99
2.11 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων	101
2.11.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης	101
2.11.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης.....	102
2.11.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων.....	103
2.11.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα	105

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής	
2.12	Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικού ελέγχου 108
2.12.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 108
2.12.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 109
2.12.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 110
2.12.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 114
2.13	Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής 117
2.13.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 117
2.13.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 118
2.13.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 118
2.13.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 119
2.14	Βιομηχανικό μετασύμπαν με την χρήση επεξηγηματικής τεχνητής νοημοσύνης για εφαρμογές επιχειρηματικής νοημοσύνης 124
2.14.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 124
2.14.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 125
2.14.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 125
2.14.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 136
2.15	Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες 138
2.15.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 138
2.15.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 139
2.15.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 140
2.15.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 144
2.16	Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής..... 147
2.16.1	Στάδια υλοποίησης ης λύσης..... 147
2.16.2	Αρχιτεκτονική Τελικής έκδοσης 148
2.16.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 150
2.16.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 152
2.17	Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα 154
2.17.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 154
2.17.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 155
2.17.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 156
2.17.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 158
2.18	Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ 164
2.18.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 164
2.18.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 165
2.18.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 166
2.18.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 167
2.19	Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία 170

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής	
2.19.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 170
2.19.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 170
2.19.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 171
2.19.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 175
2.19.5	Αναφορές 177
2.20	Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων 178
2.20.1	Στάδια υλοποίησης της λύσης 178
2.20.2	Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης..... 179
2.20.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων..... 180
2.20.4	Τελική έκδοση και αποτελέσματα 184
2.20.5	Αναφορές 188
3	Συμπεράσματα 188
4	Αναφορές 190

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική ρομποτικού συστήματος για αυτόνομη πλοήγηση και χειρισμό αντικειμένων .	16
Εικόνα 2 Ψηφιακή σκηνή που περιέχει συνθετικά δεδομένα στο BlenderProc	17
Εικόνα 3 Εντοπισμός περιοχών για την αρπαγή ενός αντικειμένου	17
Εικόνα 4 Εντοπισμός θέσης και προσανατολισμού ενός αντικειμένου με το μοντέλο MegaPose6D	17
Εικόνα 5 Εντοπισμός αντικειμένων με YOLOv11	18
Εικόνα 6 Διαδικασία ανίχνευσης και χειρισμού του ρομποτικού συστήματος	19
Εικόνα 7. Στατική χαρτογράφηση του χώρου με την χρήση σαρωτών ασφαλείας.....	19
Εικόνα 8. Πλοήγηση της κινητής πλατφόρμας	21
Εικόνα 9 Κατάτμηση των αντικειμένων για την ανίχνευση των σημείων αρπαγής.....	21
Εικόνα 10. Ανίχνευση του τύπου των αντικειμένων.....	22
Εικόνα 11. Μετασχηματισμός θέσης των εντοπισμένων αντικειμένων.....	22
Εικόνα 12. Αρπαγή των εντοπισμένων αντικειμένων από τον ρομποτικό βραχίονα	22
Εικόνα 13. Αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου και εργαλείου προσομοίωσης	24
Εικόνα 14. Σημεία κλειδιά στο ανθρώπινο σκελετό και δημιουργία εμποδίων προς αποφυγή	24
Εικόνα 15. Αποφυγή ανθρώπου με την χρήση σημείων κλειδιών και δημιουργία δυναμικών εμποδίων.....	25
Εικόνα 16. Στιγμιότυπο 3D περιβάλλοντος προσομοίωσης ανεπτυγμένο σε Unity3D	25
Εικόνα 17. Ενσωμάτωση του συστήματος όρασης στο ψηφιακό δίδυμο.....	26
Εικόνα 18. Απεικόνιση του ψηφιακού διδύμου κατά την διαδικασία συναρμολόγησης.....	27
Εικόνα 19. Δεδομένα από τον αισθητήρα δύναμης κατά την διαδικασία συναρμολόγησης.....	28
Εικόνα 20. Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα και της ρομποτικής αρπάγης μέσα στο ψηφιακό περιβάλλον.....	28
Εικόνα 21 Αρχιτεκτονική και εργαλεία συστήματος.....	30
Εικόνα 22 Πειραματική διάταξη και χαρακτηριστικά αισθητηρίων	30
Εικόνα 23 (a) Ελαττώματα διεργασίας DED-LB με σύρμα (b) Εξαγωγή χαρακτηριστικών από το οπτικό σήμα (c) Σχεδιασμός πειραμάτων και διάταξη αισθητηρίων.....	31
Εικόνα 24 Πίνακας σύγχυσης και διάγραμμα περιοχών μοντέλου	32
Εικόνα 25 Διάγραμμα ροής της πλατφόρμας και του μηχανήματος.....	32
Εικόνα 26 Αρχιτεκτονική γραφικού περιβάλλοντος	33
Εικόνα 27 Μήνυμα για την ενεργοποίηση του διακομιστή Meltio	33
Εικόνα 28 Περιβάλλον διακομιστή μηχανής Meltio	33
Εικόνα 29 Εικόνα κατά την αναμονή έναρξης της διεργασίας εναπόθεσης	34
Εικόνα 30 Δομή φακέλου πειράματος.....	34
Εικόνα 31 Δεδομένα που καταγράφονται στο αρχείο CSV.....	35
Εικόνα 32 Πειράματα επικύρωσης του μοντέλου μηχανικής μάθησης	35
Εικόνα 33 Γραφικό περιβάλλον πλατφόρμας	36
Εικόνα 34 Πληροφορίες και παράμετροι μηχανήματος	36
Εικόνα 35 Παραστατική αρχιτεκτονική εφαρμογής συνθετικής παραγωγής δεδομένων	38
Εικόνα 36 Αρχιτεκτονική εφαρμογής παραγωγής συνθετικών δεδομένων.....	39
Εικόνα 37 Αρχιτεκτονική εφαρμογής εκπαίδευσης μοντέλων TN.....	40
Εικόνα 38 Μοντελοποίηση σκηνής στο γραφικό περιβάλλον Blender3D	40
Εικόνα 39 Βελτιώσεις συνθετικών δεδομένων: α) Εστίαση στην αναγνώριση αντικειμένων πρώτης σειράς, β) Προσομοίωση πραγματικών συνθηκών παραγωγής	41
Εικόνα 40 Αρχιτεκτονική πλατφόρμας.....	43
Εικόνα 41 Εγγραφή νέου χρήστη στην πλατφόρμα και επιλογή τύπου χρήστη	44
Εικόνα 42 Επιλογή περιβάλλοντος εργασίας.....	45
Εικόνα 43 Επιλογή παραμέτρων για την δημιουργία συνθετικών εικόνων	45
Εικόνα 44 Επιλογή σετ δεδομένων, μοντέλου TN και υπερπαραμέτρων για την εκπαίδευση ενός μοντέλου TN	46
Εικόνα 45 Ανίχνευση αντικειμένων σε πραγματική εικόνα.....	48

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Εικόνα 46: Αρχιτεκτονική προτεινόμενης λύσης	58
Εικόνα 47 Μοντελοποίηση γραμμής παραγωγής σε AutomationML.....	60
Εικόνα 48: Το αποτέλεσμα της χρήσης του URDF Importer	61
Εικόνα 49: Αρχιτεκτονική Συστημάτων της πλατφόρμας του ΨΔ	63
Εικόνα 50: Διαδικασία δημιουργίας σεναρίων βιομηχανικών διεργασιών με χρήση GAI	65
Εικόνα 51: Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής και Ψηφιακού διδύμου	66
Εικόνα 52: Σενάριο εκτέλεσης Ψηφιακού Διδύμου	66
Εικόνα 53: Παραγωγική διαδικασία αποτυπωμένη σε BPMN.....	67
Εικόνα 54: Παρακολούθηση λειτουργίας της πραγματικής γραμμής παραγωγής μέσω του Ψηφιακού Διδύμου	67
Εικόνα 55 Γραφική διεπαφή χρήστη του Ψηφιακού Διδύμου	68
Εικόνα 56 Παρακολούθηση εκτέλεσης σεναρίου μέσω Πλατφόρμας IoT	68
Εικόνα 57 - Αρχιτεκτονική Λύσης IIoT	69
Εικόνα 58 – Διαδικασία Προσθήκης Συσκευών	70
Εικόνα 59 Δυναμικός Πίνακας Ελέγχου (Dashboard)	71
Εικόνα 60 Ιστορική Ανάλυση μέσω Explore Tab	71
Εικόνα 61 Μοντέλο Πρόβλεψης.....	72
Εικόνα 62 – Ανίχνευση Ανωμαλιών.....	72
Εικόνα 63 – Πρόβλεψη θερμοκρασίας.....	72
Εικόνα 64 Πρόβλεψη Δόνησης.....	73
Εικόνα 65 Απλοποιημένο διάγραμμα κλάσεων.....	76
Εικόνα 66 Εργαλεία της εφαρμογής Annotator	77
Εικόνα 67 Εισαγωγή οπτικοακουστικού υλικού στην εφαρμογή XR-Viewer	79
Εικόνα 68 Παράδειγμα περιγραφής σεναρίου στην εφαρμογή XR-Creator	80
Εικόνα 69 Παράδειγμα οπτικοακουστικού υλικού στην εφαρμογή XR-Viewer.....	80
Εικόνα 70 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης τεχνολογικής λύσης για τον προγραμματισμό ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής	82
Εικόνα 71 Συνοπτική απεικόνιση βασικών στοιχείων του πυρήνα του λογισμικού προγραμματισμού παραγωγής.....	82
Εικόνα 72 Γραφικό περιβάλλον χρήστη εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής.....	83
Εικόνα 73:Εισαγωγή μπλοκ διαγραμμάτων στο γραφικό περιβάλλον σχεδιασμού της προσφερόμενης εργαλειοθήκης	85
Εικόνα 74:Διαθέσιμα στοιχεία σχεδίασης στην υλοποιημένη εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής	87
Εικόνα 75: Προσφερόμενες δυνατότητες της εργαλειοθήκης για τον καθορισμό των συναρτήσεων συμμετοχής (Membership Functions - αριστερά) και των τεχνικών ασαφопоίησης/αποασαφопоίησης πληροφορίας ελεγκτή(δεξιά).....	89
Εικόνα 76 Μετατροπή κώδικα από προγραμματιστικό περιβάλλον Python σε εκτελέσιμο αρχείο - εφαρμογή (πάνω: εκτέλεση εντολής στο Shell, κάτω: τελικό αποτέλεσμα μετατροπής “one-file conversion”)	90
Εικόνα 77 Η τελική έκδοση της αρχιτεκτονικής με τον σχεδιασμό και ανάπτυξη του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος	92
Εικόνα 78: Αξιοποίηση του εργαλείου PSM για την προσομοίωση διεργασιών.....	94
Εικόνα 79: Παράδειγμα δημιουργίας KPI στο περιβάλλον του PSM Script Editor.....	95
Εικόνα 80 Παράδειγμα παρουσίασης αποτελεσμάτων των KPIs στο PSM	95
Εικόνα 81 Το φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος παρουσιάζει με σαφήνεια όλα τα απαραίτητα δεδομένα μέσω οργανωμένων και ευανάγνωστων επιμέρους στοιχείων.	96
Εικόνα 82 Βασικά στοιχεία ταυτοποίησης του προϊόντος.....	97

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Εικόνα 83 Οι τρεις βασικές βαθμολογίες (scores) που αντικατοπτρίζουν την βιωσιμότητα και κυκλικότητα του προϊόντος.....	97
Εικόνα 84 Το διάγραμμα ροής που αναπαριστά την αλυσίδα παραγωγής του προϊόντος	98
Εικόνα 85 Βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) σε κατηγορίες, και τα αποτελέσματά τους, τα οποία εμφανίζονται σε αναδυόμενα παράθυρα	99
Εικόνα 86 Εννοιολογική αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων.....	102
Εικόνα 87 Τεχνική αρχιτεκτονική και λεπτομέρειες υλοποίησης ενδιάμεσης έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων.....	103
Εικόνα 88 Μεθοδολογία της πρόβλεψης κατάστασης της υγείας του εξοπλισμού με AutoML.....	104
Εικόνα 89 Σύγκριση της ακρίβειας μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών	106
Εικόνα 90 Σύγκριση του MAE μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών	106
Εικόνα 91 Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών	107
Εικόνα 92 Προεπισκόπηση της διεπαφής χρήστη του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων	107
Εικόνα 93 Αξιολόγηση απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep.....	108
Εικόνα 94 Αξιολόγηση απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep με εξομάλυνση	108
Εικόνα 95 Αρχιτεκτονική του συστήματος.....	110
Εικόνα 96 Ιεραρχία ελέγχου.....	112
Εικόνα 97 Καταστάσεις λειτουργίας στην εφαρμογή εποπτικού ελέγχου.....	113
Εικόνα 98 Συμπεριφορά σχεδιασμένου ρυθμιστή MPC σε γλώσσα Python-CasADi σε περίπτωση όπου η επιθυμητή τιμή στόχος για τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή είναι ίση με 50 nm	114
Εικόνα 99 Κεντρική οθόνη εφαρμογής εποπτικού ελέγχου HMI	115
Εικόνα 100 Κεντρική οθόνη εφαρμογής εποπτικού ελέγχου SCADA	116
Εικόνα 101 Γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τη διεργασία για την εισαγωγή σφαλμάτων και την τροποποίηση στις τιμές των διαταραχών	116
Εικόνα 102 Αρχιτεκτονική Τελικής Έκδοσης της Λύσης.....	118
Εικόνα 103 (α) Εισαγωγή Δεδομένων στην πλατφόρμα; (β) Επιλογή Χρονικού Εύρους Δεδομένων.....	119
Εικόνα 104 Διαθέσιμα Φίλτρα της σελίδας ανάλυσης χειροκίνητων διαδικασίες	120
Εικόνα 105 Διαθέσιμα Φίλτρα της σελίδας ανάλυσης σφαλμάτων αυτοματισμού αποθήκευσης παλετών	120
Εικόνα 106 Ημερήσια Παραγωγικότητα Εργαζομένων (Pick & Pack Data)	120
Εικόνα 107 Ημερήσια Δεδομένα Συλλογής (Daily Picking Data)	121
Εικόνα 108 Δεδομένα Συλλογής & Συσκευασίας (Pick & Pack Data).....	121
Εικόνα 109 Δεδομένα σφάλματων λειτουργίας του ISA.....	122
Εικόνα 110 Εξατομικευμένη ειδοποίηση	122
Εικόνα 111 Εισαγωγή Ημερομηνίας.....	123
Εικόνα 112 Παράδειγμα λειτουργίας Σελίδας Ψηφιακού διδύμου	123
Εικόνα 113 Επισκόπηση Μοντέλου Προσομοίωσης Αποθηκευτικής Διάταξης	124
Εικόνα 114 Εκτέλεση και Εξαγωγή Δεδομένων από το Μοντέλο Προσομοίωσης μέσω Python	124
Εικόνα 115 Αρχιτεκτονική του Συστήματος για την Εκπαίδευση του Προσωπικού σε Βιομηχανικό Μετά-Σύμπαν.....	125
Εικόνα 116 Αρχιτεκτονική του υπό-συστήματος ομιλίας σε κείμενο και ανάλυση συναισθήματος.....	126
Εικόνα 117 Αρχιτεκτονική Εφαρμογής Εικονικής Πραγματικότητας.....	129
Εικόνα 118 Σχηματικό διάγραμμα της δομής του υποσυστήματος πυρήνα.....	131
Εικόνα 119 Γράφος των ενεργειών	133

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Εικόνα 120 Διάγραμμα αστέρα για την ποσοστιαία απόδοση του εκπαιδευόμενου στις επιμέρους ενέργειες	135
Εικόνα 121 Παράδειγμα παραγόμενου αρχείου pdf για την συνολική απόδοση του εκπαιδευόμενου και του αντίστοιχου κειμένου-σχολιασμού	135
Εικόνα 122 (Α) VR Head Mounted Display (HMD), (Β) Εισαγωγική σκηνή ρυθμίσεων, (Γ) Σκηνή εκπαίδευσης και εικονικό περιβάλλον	136
Εικόνα 123 Γενική αρχιτεκτονική λύσης	139
Εικόνα 124 Ενδεικτικές εικόνες από το σύνολο εκπαίδευσης του αλγορίθμου εντοπισμού δεδομένων	141
Εικόνα 125 Ενδεικτικά αποτελέσματα ακριβείας και εμπιστοσύνης του μοντέλου YOLO για τον εντοπισμό αντικειμένων	145
Εικόνα 126 Πίνακας σύγκρισης του μοντέλου για την κατηγοριοποίηση των αντικειμένων	145
Εικόνα 127 Ενδεικτικές εικόνες για την περαιτέρω εκπαίδευση του μοντέλου αναγνώρισης αντικειμένων	145
Εικόνα 128 Ενδεικτικά αποτελέσματα αναγνώρισης αντικειμένων από το περιβάλλον προσομοίωσης	146
Εικόνα 129 Ενδεικτικά εικόνες από το dashboard καταγραφών με στατιστικά στοιχεία (δεξιά) και λεπτομέρειες καταγραφής χαμηλής φωτεινότητας (αριστερά)	146
Εικόνα 130 Διεπαφή χρήστη για την φιλική εξαγωγή αποτελεσμάτων από το ιστορικό των καταμετρήσεων	147
Εικόνα 131 Αρχιτεκτονική Μηχανισμών Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής	148
Εικόνα 132 Ανταλλαγή Μηνυμάτων στο PQ-EDHOC	150
Εικόνα 133 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης συστήματος	155
Εικόνα 134 Μετρικές αξιολόγησης του VoxelPose στο σύνολο δεδομένων Panoptic με διαφορετικές ρυθμίσεις καμερών. (Α) Οι μετρικές AP (AP@50, AP@75, AP@100, AP@125, AP@150) δείχνουν μείωση της απόδοσης καθώς μειώνεται ο αριθμός των καμερών. (Β) Μελέτη μείωσης αριθμού	168
Εικόνα 135 Σύγκριση της απόδοσης εκτίμησης πόζας μεταξύ των μοντέλων YOLO-HRNet και Mask R-CNN-HRNet, χρησιμοποιώντας δύο μετρικές αξιολόγησης: PCP και Recall στα 75 mm (Recall@75mm).	169
Εικόνα 136 Η μέθοδος Rapid Upper Limb Assessment (RULA) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργονομικό εργαλείο για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου μυοσκελετικών διαταραχών μέσω της βαθμολόγησης των στάσεων των άνω βραχιόνων, των κάτω βραχιόνων, των καρπών, του αυχέ	169
Εικόνα 137 Η αρχιτεκτονική της λύσης είναι δικτυακή και βασίζεται σε κάμερες οι οποίες είναι είτε συνδεδεμένες απευθείας σε κόμβους του δικτύου (USB) είτε μέσω IP. Ο server της εφαρμογής μπορεί να λαμβάνει ερωτήματα κατανόησης σκηνής και να απαντάει είτε απευθείας	171
Εικόνα 138 Το νευρωνικό δίκτυο MocapNET μετατρέπει εικόνες εισόδου που απεικονίζουν ανθρώπους σε τρισδιάστατα σημεία περιλαμβάνοντας επίλυση της αντίστροφης κινηματικής. Πιο συγκεκριμένα παραλαμβάνει δισδιάστατες συντεταγμένες τις οποίες κωδικοποιεί σε πίνακες eNS , πραγματοποιεί ελάττωση της διαστασημότητας της εισόδου, εξαγει απευθείας την αντίστροφη κινηματική μέσω νευρωνικών δικτύων την οποία στην συνέχεια ανατροφοδοτεί με τον αλγόριθμο ιεραρχικής κατάβασης συντεταγμένων (HCD) έτσι ώστε να δώσει το τελικό αποτέλεσμα. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στις δημοσιεύσεις [1][2][3][4][5]	172
Εικόνα 139 Το νευρωνικό δίκτυο MocapNET κατανοεί τους εικονιζόμενους ανθρώπους τους οποίους αποσυνθέτει σε τρισδιάστατες γωνίες. Η σχεδίαση των επιμέρους βαθμών ελευθερίας για μια συνεχιζόμενη ροή εικόνων μας δίνει ένα τέτοιο γράφημα δραστηριότητας.	172
Εικόνα 140 Παρουσίαση του πλαισίου υλοποίησης λογισμικού της λύσης 18, και των τμημάτων του.	179
Εικόνα 141 Πλαίσιο αξιοποίησης της Λύσης 18 σε σενάριο παρακολούθησης μιας γραμμής παραγωγής. Εμπρόσθια του πάγκου εργασίας ενός εργαζομένου τοποθετείται ο οπτικός αισθητήρας καταγραφής, η ροή δεδομένων αποστέλλεται μέσω δικτύου στον διακομιστή επεξεργασίας ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα με τα μοντέλα της λύσης. Ο διακομιστής διαθέτει λογισμικό διάθεσης των δεδομένων και αποτελεσμάτων σε υπολογιστές μέσω διαδικτυακά διαθέσιμων γραφικών διεπαφών	180
Εικόνα 142 Η αρχιτεκτονική του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων σε διαδικασίες. Κατά την φάση εξαγωγής προβλέψεων (inference phase) το ιστορικό των παρελθοντικών δράσεων	

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής τροφοδοτείται με τις προγενέστερες εκτιμήσεις του μοντέλου (πράσινες γραμμές δρομολόγησης πληροφορίας).....	182
Εικόνα 143 Η διαδικασία εξαγωγής και αξιοποίησης πρωτοκόλλων εκτέλεσης δραστηριοτήτων. Στο στάδιο 1, από δείγματα βίντεο κατασκευάζονται τα γραφήματα εκτέλεσης δράσεων, συνενώνονται σε ένα ενιαίο γράφημα και τέλος φιλτράρονται για την κατασκευή του γράφου πρωτοκόλλου εκτέλεσης της δραστηριότητας. Στο στάδιο 2, δοθέντων των εκτιμήσεων του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων & δραστηριοτήτων για ένα βίντεο και των γράφων πρωτοκόλλου, γίνεται η εκτίμηση των παραλειπόμενων δράσεων.	183
Εικόνα 144 Στιγμιότυπα αποτελεσμάτων του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων με δεδομένα εικόνας και σκελετικές αναπαραστάσεις, (α) παράδειγμα εκτίμησης σε βίντεο μη βιομηχανικής διαδικασίας, (β) παράδειγμα εκτίμησης σε βίντεο βιομηχανικής φύσεως ενός ατόμου, (γ) παράδειγμα εκτίμησης σε βίντεο βιομηχανικής φύσεως πολλαπλών ατόμων - δράσεις. Σε κάθε περίπτωση έχει αναγνωριστεί η θέση στην σκηνή του ατόμου που εκτελεί την δράση και έχει δοθεί εκτίμηση για την τρέχουσα δράση-μαζί με το ποσοστό βεβαιότητας του μοντέλου για την εκτίμηση.	185
Εικόνα 145 Στιγμιότυπο από την χρήση της διαδικτυακής γραφικής διεπαφής του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων με δεδομένα εικόνας και σκελετικές αναπαραστάσεις, με χρωματική επισήμανση των λειτουργιών/δυνατοτήτων που διαθέτει.....	185
Εικόνα 146 Στιγμιότυπα από μια από τις υποστηριζόμενες δραστηριότητες για τα σετ δεδομένων (α) Assembly101 (παιχνίδι α16), (β) HA4M (κατασκευή του εσωτερικού μηχανισμού του πλανητικού συστήματος).....	186
Εικόνα 147 Στιγμιότυπο από την χρήση της διαδικτυακής γραφικής διεπαφής του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων, με χρωματική επισήμανση των υποστηριζόμενων λειτουργιών.....	187
Εικόνα 148 Στιγμιότυπο από την χρήση της διαδικτυακής γραφικής διεπαφής επισήμανσης δεδομένων.....	188

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Δοκιμή και σύγκριση διαφόρων μοντέλων TN	42
Πίνακας 2: Βελτιστοποίηση παραμέτρων εκπαίδευσης μοντέλου TN	42
Πίνακας 3: Παράμετροι παραγωγής συνθετικών εικόνων	47
Πίνακας 4: Παράμετροι εκπαίδευσης Συνελκτικού Νευρωνικού Δικτύου.....	47
Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμών εκπαιδευμένου μοντέλου σε πραγματικές εικόνες	48
Πίνακας 6 Βασικά Στάδια Οριστικοποίησης Τεχνολογικής Λύσης	81
Πίνακας 7: Βασικά Στάδια Οριστικοποίησης Τεχνολογικής Λύσης	84
Πίνακας 8: Διαθέσιμα στοιχεία σχεδίασης στην υλοποιημένη εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής	85
Πίνακας 9: Διαχείριση ιδιοτήτων μπλοκ κι ελέγχου μέσω της εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης παραγωγής.....	87
Πίνακας 10: Φάσεις Υλοποίησης και Επισκόπηση Εργασιών της Προτεινόμενης Λύσης	91
Πίνακας 11 Οι βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) χωρίζονται σε ενότητες στο μενού του dashboard	98
Πίνακας 12: Εφαρμογές και αξιοποίηση των εργαλείων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της λύσης στη βιομηχανία.	100
Πίνακας 13: Οι φορείς που επωφελούνται από την εφαρμογή της παρούσας λύσης	100
Πίνακας 14: Παραδείγματα προτάσεων και αποτελέσματα ανάλυσης συναισθήματος από τα τρία μοντέλα	127
Πίνακας 15 Υπόμνημα αντικειμένων στο 3D περιβάλλον του σεναρίου συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα.....	130
Πίνακας 16 Πιθανές ενέργειες στο εικονικό περιβάλλον.....	131
Πίνακας 17 Αποκωδικοποίηση συμβάντων τύπου Grab ή drop σε ενέργειες στο εικονικό περιβάλλον	132
Πίνακας 18 Τα κόστη των ενεργειών	134

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Πίνακας 19: Πλήθος εικόνων ανά κλάση του συνόλου εκπαίδευσης, αξιολόγησης και δοκιμής	141
Πίνακας 20: Υπερ-παράμετροι εκπαίδευσης του μοντέλου εντοπισμού και αναγνώρισης αντικειμένων	142
Πίνακας 21: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγέθους απόδοσης και ακρίβειας των μοντέλων TN που χρησιμοποιεί η λύση. Οι χρόνοι με αστερίσκο είναι κοινói καθώς το ΥMAP-Net παράγει όλες τις εξόδους με ένα πέρασμα στον ίδιο χρόνο.	177

1 Εισαγωγή

Η παρούσα ενότητα εισαγάγει το περιεχόμενο του Παραδοτέου Π2.2, το οποίο εκπονήθηκε στο πλαίσιο του έργου Greece4.0 – Δίκτυο Αριστείας για την Ανάπτυξη, Διάδοση και Εφαρμογή Τεχνολογιών Ψηφιακού Μετασχηματισμού στην Ελληνική Μεταποιητική Βιομηχανία. Το παραδοτέο εστιάζει στην τελική έκδοση των λύσεων που αναπτύχθηκαν για τη βελτιστοποίηση των κυβερνο-φυσικών συστημάτων παραγωγής, όπως αυτές σχεδιάστηκαν, υλοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου. Οι λύσεις αυτές καλύπτουν ένα ευρύ τεχνολογικό φάσμα καθώς και μια πληθώρα πεδίων εφαρμογής του Industry 4.0, από την ρομποτική και τα ψηφιακά δίδυμα έως την τεχνητή νοημοσύνη, την ανάλυση δεδομένων και την κυβερνοασφάλεια. Κάθε υποσύστημα αναπτύχθηκε με γνώμονα την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την ενσωμάτωση σε υφιστάμενα βιομηχανικά περιβάλλοντα, συμβάλλοντας στην ψηφιακή αναβάθμιση της ελληνικής μεταποίησης.

1.1 Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου

Ο σκοπός του παρόντος παραδοτέου είναι η τεκμηρίωση των τελικών εκδόσεων των τεχνολογικών λύσεων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του έργου Greece4.0 για τη βελτιστοποίηση των κυβερνο-φυσικών συστημάτων παραγωγής. Το παραδοτέο συγκεντρώνει και παρουσιάζει το σύνολο των ολοκληρωμένων εφαρμογών, περιγράφοντας λεπτομερώς την αρχιτεκτονική, τη λειτουργικότητα, τη μεθοδολογία υλοποίησης και την τελική αξιολόγησή τους. Ο βασικός στόχος είναι να αποτυπωθεί με σαφήνεια η τεχνολογική ωριμότητα και η εφαρμοσιμότητα των λύσεων που προτάθηκαν, να εντοπιστούν τα οφέλη και οι δυνατότητες ενσωμάτωσης τους σε πραγματικά περιβάλλοντα παραγωγής, και να συμβάλει στη δημιουργία ενός θεμελίου για περαιτέρω αξιοποίηση και βιομηχανική υιοθέτηση των αποτελεσμάτων.

1.2 Υλοποίηση Τελικής Έκδοσης

Η τελική έκδοση των λύσεων του παραδοτέου βασίστηκε στην ολοκλήρωση όλων των φάσεων ανάλυσης, σχεδιασμού, ανάπτυξης, ενσωμάτωσης και δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου. Κάθε εφαρμογή αναπτύχθηκε με βάση συγκεκριμένες βιομηχανικές ανάγκες, ενώ αξιοποιήθηκαν καινοτόμες τεχνολογίες και σύγχρονες μεθοδολογίες ανάπτυξης λογισμικού και συστημάτων. Οι λύσεις αξιολογήθηκαν είτε σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον είτε σε πραγματικά βιομηχανικά σενάρια, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την πρακτική τους χρησιμότητα. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε διασφαλίζει τη δυνατότητα παραμετροποίησης και προσαρμογής κάθε λύσης ανάλογα με το εκάστοτε βιομηχανικό περιβάλλον, προσφέροντας ένα πλήρες οικοσύστημα εργαλείων για την υποστήριξη της παραγωγικής ευφύιας και της ευελιξίας στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0.

2 Τελικές Εκδόσεις των Εφαρμογών του έργου Greece4.0

2.1 Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής

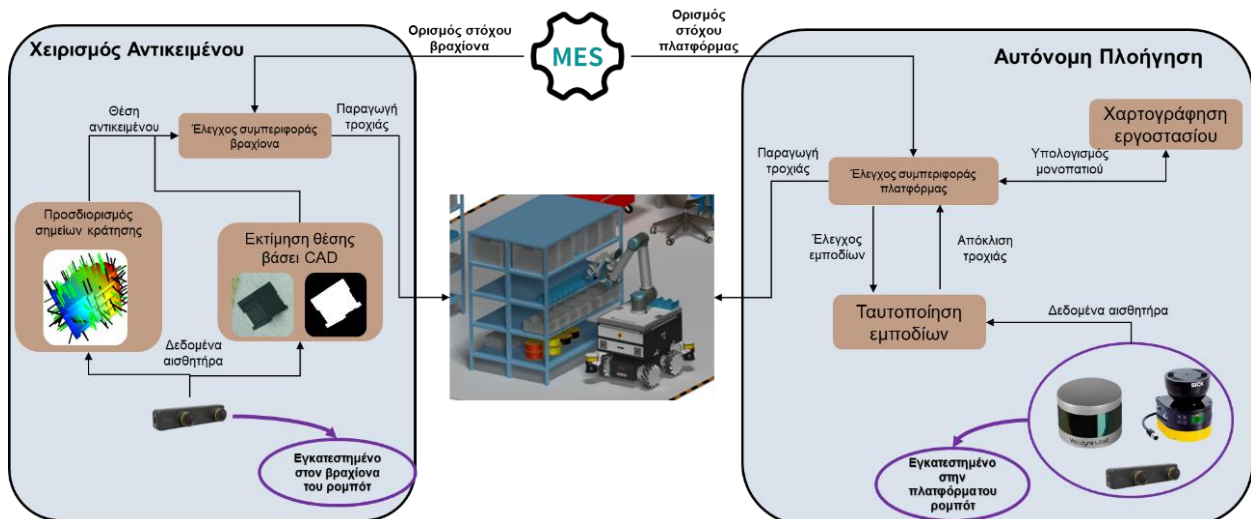
2.1.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Σε πρώτο στάδιο η λύση οργανώθηκε γύρω από τον χειρισμό αντικειμένων από ρομπότ. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν συστήματα όρασης για την εύρεση των σημείων προσάρτησης όπως και για τον εντοπισμό αντικειμένων και την εκτίμηση της θέσης τους στον χώρο. Παράλληλα για την προσάρτηση και τον χειρισμό τους στον χώρο αναπτύχθηκε το κατάλληλο λογισμικό βασισμένο σε ROS2 MoveIt για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα. Σε τελικό στάδιο έγινε ο έλεγχος της ρομποτικής βάσης με χρήση του Navigation2 και η επικοινωνία με σύστημα οργάνωσης. Τα στάδια ανάπτυξης είναι τα εξής:

- Επιλογή σημείων προσάρτησης με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και χρήση κατασκευαστικών αρχείων (CAD).
- Τεχνητής νοημοσύνη για την εκτίμηση θέσης των εξαρτημάτων.
- Έλεγχος αυτοκινούμενων ρομπότ με βραχίονες.
- Επικοινωνία με σύστημα οργάνωσης.
- Συνεχής έλεγχος και προσαρμογή των εφαρμοσμένων τεχνολογιών.

2.1.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η προτεινόμενη λύση αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ρομποτικού συστήματος που μπορεί να κινείται αυτόνομα μέσα σε εγκαταστάσεις παραγωγής, με σκοπό τον εντοπισμό, την ανάκτηση και τη διαχείριση εξαρτημάτων (Εικόνα 1). Το σύστημα αποτελείται από ένα κινητό ρομπότ και έναν ρομποτικό βραχίονα τοποθετημένο πάνω στην κινητή πλατφόρμα. Το κινητό ρομπότ διαθέτει αισθητήρες, όπως λέιζερ ή κάμερες βάθους, οι οποίοι του επιτρέπουν να πλοηγηθεί με ακρίβεια βάσει χαρτογράφησης του χώρου, ενώ παράλληλα προσαρμόζεται στο περιβάλλον αποφεύγοντας εμπόδια σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να διακόπτει την κίνησή του. Ο ρομποτικός βραχίονας, που αποτελεί το δεύτερο μέρος της λύσης, είναι συνεργατικός και περιλαμβάνει μια ευέλικτη αρπάγη στο άκρο εργασίας του και μια κάμερα βάθους. Μέσω της κάμερας, γίνεται ο εντοπισμός της ακριβούς θέσης των αντικειμένων και των σημείων προσάρτησης. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πορείας του βραχίονα, προκειμένου να εκτελεί με ακρίβεια τις ενέργειες ανάκτησης. Τέλος, ένα σύστημα ελέγχου αναλαμβάνει το συντονισμό όλων των επιμέρους λειτουργιών μέσω της ανταλλαγής κατάλληλων εντολών.



Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική ρομποτικού συστήματος για αυτόνομη πλοήγηση και χειρισμό αντικειμένων

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

2.1.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.1.3.1 Επιλογή σημείων προσάρτησης με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και χρήση CAD αρχείων

Η παρούσα λύση αφορά την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου ρομποτικού συστήματος βασισμένο στην Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) για τον εντοπισμό βέλτιστων σημείων προσάρτησης σε ηλεκτρολογικά εξαρτήματα, με σκοπό τη εγκατάστασή τους στο πλαίσιο αυτοματοποιημένων διεργασιών. Η προσέγγιση βασίζεται στη χρήση CAD αρχείων, συνθετικών δεδομένων, εργαλείων εικονικής προσομοίωσης και σύγχρονων τεχνικών βαθιάς μάθησης, ενσωματωμένων σε ένα ρομποτικό σύστημα ελέγχου βασισμένο σε ROS2 και MoveIt2.

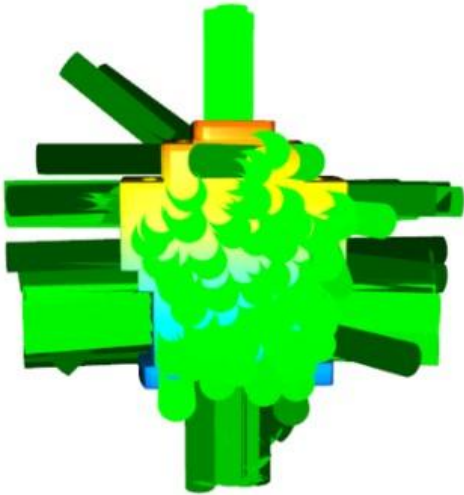
Αρχικά, υλοποιήθηκε ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη βέλτιστων σημείων προσάρτησης από τις πνευματικές βεντούζες κενού του



Εικόνα 2 Ψηφιακή σκηνή που περιέχει συνθετικά δεδομένα στο BlenderProc

ρομποτικού βραχίονα. Για την εκπαίδευση του μοντέλου δημιουργήθηκαν εικονικές σκηνές στο εργαλείο προσομοίωσης BLENDER (Εικόνα 2). Η κάθε σκηνή απαρτίζεται από έναν τυχαίο αριθμό κομματιών μέσα σε ένα κουτί αποθήκευσης και μία πηγή φωτισμού για την μίμηση των πραγματικών συνθηκών. Για την εισαγωγή των εξαρτημάτων στη σκηνή χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα αρχεία. Ωστόσο, για τη μείωση της γεωμετρικής πολυπλοκότητας και την επιτάχυνση της επεξεργασίας, τα μοντέλα υπεβλήθησαν σε διαδικασία υπο-δειγματοληψίας τύπου Voxel.

Η προσομοίωση εμπλουτίστηκε με τη χρήση του εργαλείου BlenderProc, το οποίο παρήγαγε αυτόματα RGB εικόνες και εικόνες βάθους. Για την επισήμανση των δεδομένων μοντελοποιήθηκε η αρπάγη ως κυκλικός δίσκος και χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος για τον εντοπισμό περιοχών χωρίς ανωμαλίες ή εμπόδια, διασφαλίζοντας την πρακτική δυνατότητα αρπαγής.

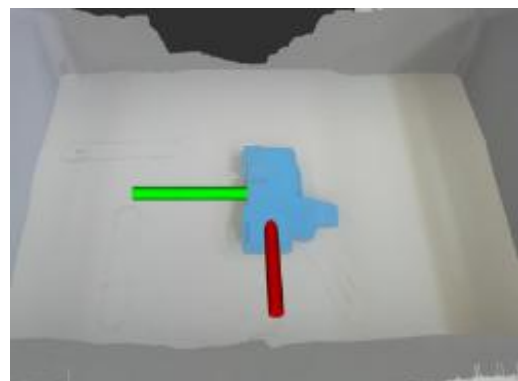


Εικόνα 3 Εντοπισμός περιοχών για την αρπαγή ενός αντικειμένου

2.1.3.2 Βαθιά μάθηση για την εκτίμηση θέσης των εξαρτημάτων

Παράλληλα για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης και προσανατολισμού κάθε εξαρτήματος, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο MegaPose6D. Παρά την ικανότητά του να εντοπίζει αντικείμενα χωρίς ειδική εκπαίδευση, πραγματοποιήθηκε επανεκπαίδευσή του με 25.000 συνθετικές σκηνές βασισμένες στα CAD αρχεία υψηλής ποιότητας για το κάθε κομμάτι με την εφαρμογή τεχνητής υφής.

Επιπρόσθετα για τον προσδιορισμό του τύπου και της περιοχής που κατέχει το κάθε κομμάτι χρειάστηκε η ενσωμάτωση ενός μοντέλου τμηματοποίησης. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου είναι βασισμένη στο YOLOv11 pro εκπαιδευμένο μοντέλο και έγινε



Εικόνα 4 Εντοπισμός θέσης και προσανατολισμού ενός αντικειμένου με το μοντέλο MegaPose6D

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

εκπαίδευση με την χρήση 1500 αληθινών εικόνων με χειροκίνητα ορισμένες τις περιοχές των εξαρτημάτων.

Η απόκριση των παραπάνω συστημάτων χρησιμοποιείται συνδυαστικά για τον ακριβή εντοπισμό των σημείων προσάρτησης των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα στο κουτί. Αναλυτικά τα σημεία προσάρτησης ανατίθενται σε κάθε εντοπισμένο κομμάτι με βάση την περιοχή που κατέχει στην εικόνα και περνάνε μία διαδικασία φιλτραρίσματος όπου μένει το βέλτιστο.

Παράλληλα η περιοχή του κάθε κομματικού μεταφράζεται στα αντίστοιχα δεδομένα βάθους τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τρισδιάστατης πόζας. Στην συνέχεια ο προσανατολισμός συνδυάζεται με την θέση του σημείου για την βέλτιστη προσάρτηση με την αρπάγη κενού.



Εικόνα 5 Εντοπισμός αντικειμένων με YOLOv11

2.1.3.3 Έλεγχος αυτοκινούμενων ρομπότ με βραχίονες

Για την ακριβή και ευέλικτη διαχείριση των εξαρτημάτων κατά τη συναρμολόγηση, αναπτύχθηκε ένα ρομποτικό σύστημα βασισμένο στο πλαίσιο ROS2, το οποίο προσφέρει ένα πλήρες οικοσύστημα για τον έλεγχο ρομποτικών βραχιόνων και την επικοινωνία λογισμικού-υλικού. Η υλοποίηση περιλάμβανε τα εξής βασικά στάδια:

- Ενσωμάτωση του ελεγκτή (controller) του ρομπότ, ο οποίος επιτρέπει τον έλεγχο των μηχανικών στοιχείων μέσω ηλεκτρικών σημάτων.
- Ανάπτυξη ROS2 διεπαφών για την κίνηση των αρθρώσεων του βραχίονα και τον έλεγχο της ρομποτικής αρπάγης μέσω σημάτων εισόδου/εξόδου.
- Δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του ρομπότ, με ενσωμάτωση εξατομικευμένης αρπάγης.
- Διασύνδεση με εξωτερικές συσκευές μέσω ROS2 πακέτων και υποσυστημάτων.

Σε αντίθεση με συμβατικές μεθόδους προγραμματισμού, οι οποίες βασίζονται σε στατικές προκαθορισμένες θέσεις, η προτεινόμενη λύση παρέχει δυναμική απόκριση και προσαρμοστικότητα. Αυτό είναι απαραίτητο, καθώς τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα τοποθετούνται κάθε φορά σε διαφορετικές, τυχαίες θέσεις εντός ενός κουτιού αποθήκευσης. Η διαδικασία ανίχνευσης και χειρισμού περιλαμβάνει τη συνεργασία του ρομποτικού συστήματος με αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Το μοντέλο εκτίμησης προσδιορίζει τα βέλτιστα σημεία προσάρτησης για την πνευματική βεντούζα.
- Το μοντέλο στιγμιαίας τμηματοποίησης εντοπίζει τις μάσκες και τους τύπους των εξαρτημάτων.
- Από κάθε μάσκα επιλέγεται το σημείο με τη μέγιστη εμπιστοσύνη.
- Το σύστημα οργάνωσης επιλέγει ποιο εξάρτημα θα χειριστεί, βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων.
- Οι συντεταγμένες του σημείου προσδιορίζουν τη θέση και τον προσανατολισμό.
- Το μοντέλο εκτίμησης θέσης παρέχει την τελική τιμή yaw, προσδιορίζοντας τη στροφή που απαιτείται για ορθή προσάρτηση.
- Όλες οι τελικές τιμές αποστέλλονται στον οδηγό του ρομπότ μέσω του ROS2 για εκτέλεση της κίνησης.

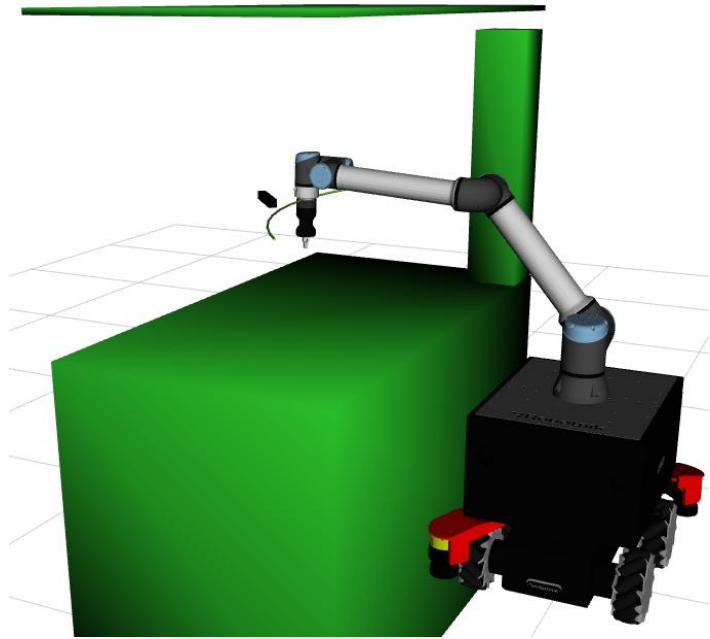
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στο ρομποτικό σύστημα να αναγνωρίζει, να πιάνει και να χειρίζεται αυτόνομα εξαρτήματα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, συμβάλλοντας στην αυτοματοποίηση και ευφυή λειτουργία της διαδικασίας συναρμολόγησης.

Για την πλήρη υλοποίηση της παρούσας λύσης, είναι απαραίτητος και ο προγραμματισμός του αυτοκινούμενου ρομπότ, πάνω στο οποίο έχει εγκατασταθεί ο ρομποτικός βραχίονας. Όπως και ο ρομποτικός βραχίονας, το ρομποτικό αυτό σύστημα αναπτύχθηκε βασισμένο στο πλαίσιο ROS2. Ένα από τα βασικά

χαρακτηριστικά του συστήματος είναι η χαρτογράφηση και η πλοήγηση εντός των εγκαταστάσεων παραγωγής. Οι λειτουργίες αυτές αναπτύχθηκαν με τη χρήση του εργαλείου Navigation2.

Αρχικά, η χαρτογράφηση του χώρου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση σαρωτών ασφαλείας (safety scanners). Οι σαρωτές αυτοί παράγουν ένα νέφος σημείων υψηλής ανάλυσης, παρέχοντας πληροφορίες για τα γειτονικά αντικείμενα εντός των εγκαταστάσεων. Ο χάρτης που δημιουργήθηκε (Εικόνα 7) χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για την πλοήγηση του αυτοκινούμενου ρομπότ. Κατά τη διάρκεια της πλοήγησης, το ρομποτικό σύστημα χρησιμοποιεί τους σαρωτές ασφαλείας για την ανίχνευση αντικειμένων που δεν περιλαμβάνονται στη στατική χαρτογράφηση, όπως πιθανά εμπόδια ή χειριστές. Έτσι, ο χάρτης ανανεώνεται δυναμικά, διασφαλίζοντας την ασφαλή πλοήγηση και την αποφυγή συγκρούσεων ρομπότ και χειριστών του ρομποτικού κελιού.



Εικόνα 6 Διαδικασία ανίχνευσης και χειρισμού του ρομποτικού συστήματος



Εικόνα 7. Στατική χαρτογράφηση του χώρου με την χρήση σαρωτών ασφαλείας

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Με τη χρήση του Navigation2, το ρομποτικό σύστημα πραγματοποιεί την αναγνώριση θέσης (localization) του αυτοκινούμενου ρομπότ, βασιζόμενο στη μέθοδο Monte Carlo (Adaptive Monte Carlo Localization – AMCL). Η πλοήγηση του ρομπότ υλοποιήθηκε με τον ορισμό μιας τελικής θέσης εντός του στατικού χάρτη. Το Navigation2 παρέχει μια έτοιμη διεπαφή ROS2 (ROS2 interface) για τον καθορισμό της τελικής θέσης και την επικοινωνία με τον οδηγό του ρομπότ για την εκτέλεση της κίνησης.

Ένα κρίσιμο στάδιο στη λειτουργία του αυτοκινούμενου ρομπότ είναι η πρόσδεσή του σε έναν σταθμό εργασίας. Για την επίτευξη αυτής της διαδικασίας, αναπτύχθηκε ένας PID ελεγκτής (PID controller), ικανός να στέλνει διορθωτικές κινήσεις σε κάθε έναν από τους τέσσερις τροχούς του ρομπότ έως ότου ολοκληρωθεί η προσδοκώμενη κίνηση.

Αφού το αυτοκινούμενο ρομπότ προσεγγίσει τον σταθμό εργασίας, απαιτείται μια επιπλέον ενέργεια για τον ακριβή προσδιορισμό της σχετικής θέσης του ρομπότ ως προς τον σταθμό εργασίας. Αυτή η διαδικασία υλοποιήθηκε με τη χρήση ArUco δεικτών (ArUco markers). Με τη βοήθεια της κάμερας που είναι εγκατεστημένη στον ρομποτικό βραχίονα, ένα ενσωματωμένο σύστημα ανίχνευσης εντοπίζει τις ακριβείς θέσεις των ArUco δεικτών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε προκαθορισμένες σταθερές θέσεις στον σταθμό εργασίας του ρομπότ. Γνωρίζοντας την ακριβή θέση της κάμερας πάνω στον ρομποτικό βραχίονα, το σύστημα εκτελεί τους απαραίτητους μαθηματικούς μετασχηματισμούς για τον υπολογισμό της θέσης όλων των αντικειμένων στον σταθμό εργασίας, μέσα στο περιβάλλον αναφοράς του ρομπότ.

2.1.3.4 Επικοινωνία με συστήματα οργάνωσης

Για την εξασφάλιση της ομαλής επικοινωνίας μεταξύ των τεχνολογιών και των διαφόρων συσκευών, αναπτύχθηκε ένα σύστημα οργάνωσης βασισμένο στο πλαίσιο ROS2. Το σύστημα αυτό είναι ικανό να επικοινωνεί μέσω διεπαφών ROS2, όπως μηνύματα (messages), υπηρεσίες (services) και ενέργειες (actions), τόσο ως πομπός όσο και ως δέκτης σημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των λογισμικών που απαρτίζουν τη λύση. Παρακάτω παρουσιάζεται η αρχική διαδικασία εκτέλεσης του χειρισμού των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων για τη συναρμολόγηση ενός ηλεκτρολογικού πίνακα:

1. Το αυτοκινούμενο ρομπότ προσεγγίζει τον σταθμό εργασίας.
2. Η αναγνώριση της σχετικής θέσης του ρομπότ πραγματοποιείται μέσω σάρωσης των ArUco δεικτών.
3. Ο ρομποτικός βραχίονας κινείται πάνω από το κουτί αποθήκευσης.
4. Τα συστήματα ανίχνευσης εντοπίζουν τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα και την θέση τους ως προς το ρομπότ.
5. Το σύστημα οργάνωσης επιλέγει το εξάρτημα που θα εγκατασταθεί κάθε φορά από το ρομπότ.
6. Ο ρομποτικός βραχίονας προσεγγίζει το κάθε εξάρτημα και το ανακτά.
7. Ο ρομποτικός βραχίονας εκτελεί τις κατάλληλες κινήσεις για την εγκατάσταση του ηλεκτρολογικού εξαρτήματος στη ράγα του ηλεκτρολογικού πίνακα.
8. Τα βήματα 3 έως 7 επαναλαμβάνονται έως ότου εγκατασταθούν όλα τα απαιτούμενα εξαρτήματα.

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα οργάνωσης έχει επίσης τη δυνατότητα να βελτιστοποιεί τη διαδικασία με βάση ορισμένα κριτήρια. Στη συγκεκριμένη διαδικασία, το σύστημα οργάνωσης επιλέγει ποιο εξάρτημα θα εγκατασταθεί ύστερα από κάθε ανίχνευση των εξαρτημάτων. Για την επιλογή αυτή, το σύστημα λαμβάνει υπόψη τα εξής κριτήρια:

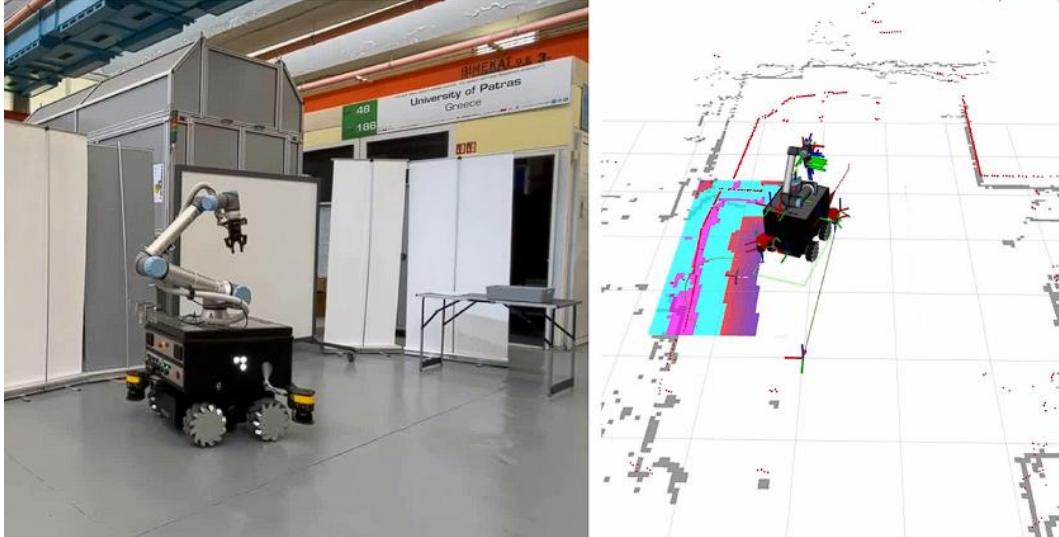
- Επίπεδα επιτυχής ανίχνευσης των αντικειμένων.
- Τύπος του εξαρτήματος που πρέπει να εγκατασταθεί στη συγκεκριμένη ράγα του ηλεκτρολογικού πίνακα.
- Ευκολία μετακίνησης του ρομποτικού βραχίονα για την ανάκτηση του εξαρτήματος.

Σε κάθε ένα από τα παραπάνω κριτήρια, το σύστημα οργάνωσης εφαρμόζει ένα συγκεκριμένο βάρος. Με βάση αυτή την πληροφορία, επιλέγει το εξάρτημα που συγκεντρώνει τον υψηλότερο συνολικό δείκτη.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

2.1.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Η τελική έκδοση της λύσης που παρουσιάζεται στις προηγούμενες υπο-ενότητες εφαρμόστηκε και ελέγχθηκε σε ένα σενάριο συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα. Η διαδικασία της εκτέλεσης περιγράφεται στην υποενότητα του συστήματος οργάνωσης. Η συναρμολόγηση του ηλεκτρολογικού πίνακα κάνει χρήση όλων των τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν, επαληθεύοντας τα αποτελέσματά τους. Οι τεχνολογίες δοκιμάστηκαν σε εργαστηριακό επίπεδο, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα της τελικής έκδοσης.



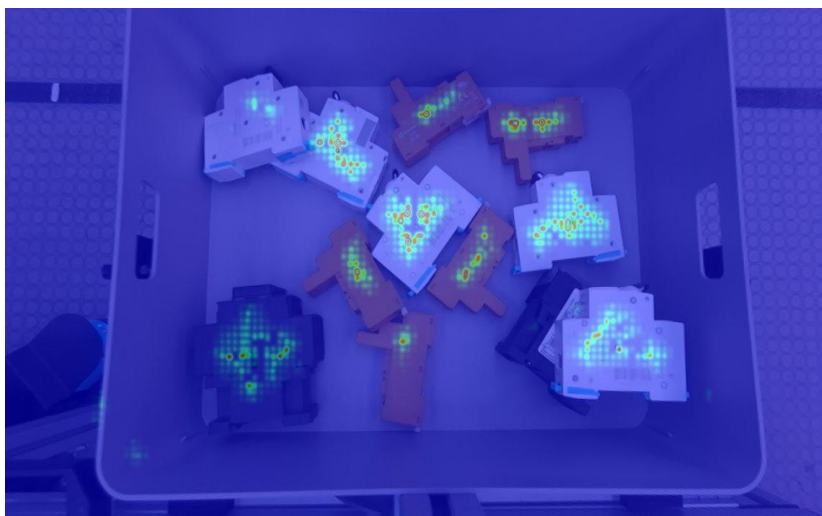
Εικόνα 8. Πλοήγηση της κινητής πλατφόρμας

Αρχικά η ρομποτική πλατφόρμα μπορεί να κινηθεί ελεύθερα στον χώρο για την εκτέλεση εργασιών. Για να οριστεί ένας στόχος, πρέπει πρώτα να καθοριστεί ένα σημείο πορείας στον χάρτη αναφοράς. Στη συνέχεια, το navigation2 αναλαμβάνει τον έλεγχο χρησιμοποιώντας τις καθορισμένες παραμέτρους και κατευθύνει τη ρομποτική βάση προς τη ζητούμενη θέση, αποφεύγοντας τυχόν συγκρούσεις ή προβλήματα στη διαδρομή.

Όταν το ρομπότ επιστρέφει στον εργασιακό σταθμό, το PID docking module αναλαμβάνει τον έλεγχο και τοποθετεί με ακρίβεια και προσοχή τη ρομποτική βάση στη καθορισμένη θέση αφητηρίας. Η πλοήγηση έγινε με επιτυχία καθώς ο εντοπισμός Monte Carlo παρουσίασε ελάχιστο σφάλμα και η διαδικασία σύνδεσης φρόντισε να το αντισταθμίσει.

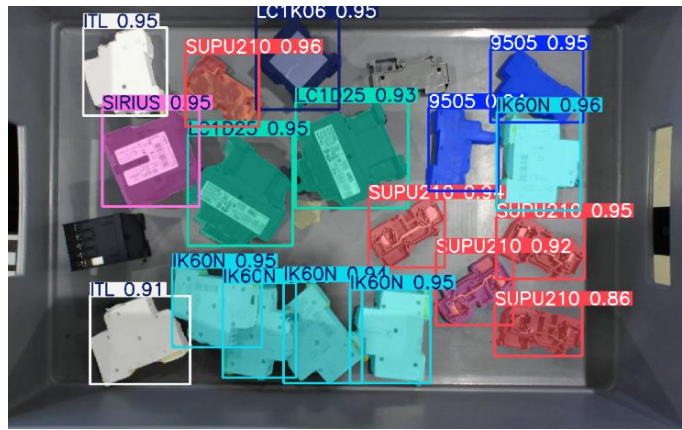
Στη συνέχεια, ο ρομποτικός βραχίονας μετακινείται πάνω από τη θέση του κουτιού αποθήκευσης και ενεργοποιεί όλα τα συστήματα όρασης. Πρώτο βήμα είναι η χρήση του μοντέλου σημείων προσάρτησης σε συνδυασμό με την κατάτμηση αντικειμένων, ώστε να χαρτογραφηθούν όλα τα σημεία προσάρτησης στα επιμέρους εξαρτήματα και να επιλεγεί το βέλτιστο.

Στην τελική έκδοση, το μοντέλο σημείων σύλληψης παρέχει εξαιρετικά αποτελέσματα σε όλους τους τύπους εξαρτημάτων, ενώ η κατάτμηση αντικειμένων, παρόλο που μπορεί να δημιουργήσει αναντιστοιχίες όταν ο κάδος είναι γεμάτος, είναι τις περισσότερες φορές ακριβής.



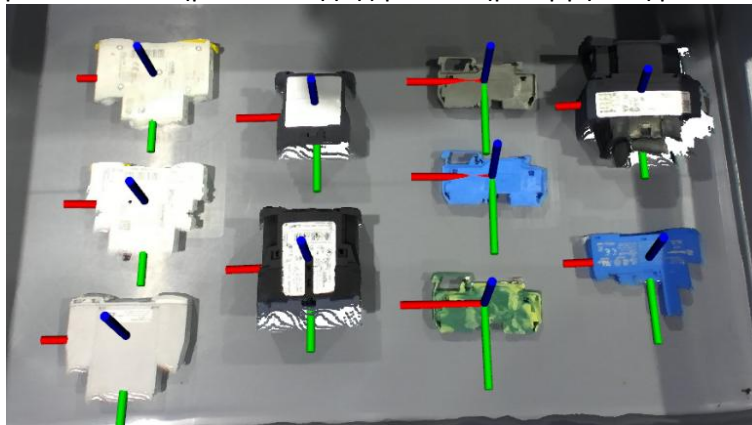
Εικόνα 9 Κατάτμηση των αντικειμένων για την ανίχνευση των σημείων αρπαγής

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



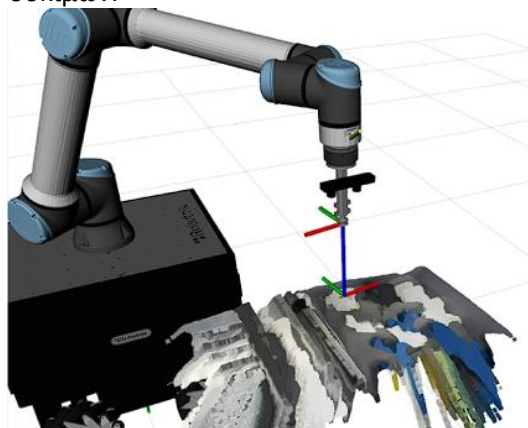
Εικόνα 10. Ανίχνευση του τύπου των αντικειμένων

Τέλος, στο σύστημα όρασης χρησιμοποιείται η εκτίμηση θέσης και προσανατολισμού. Όλα τα ανιχνευμένα εξαρτήματα αποκόπτονται από την εικόνα βάθους ώστε να δημιουργηθεί ένα νέφος σημείων με βάση τη μάσκα τους. Αυτό το νέφος σημείων εισάγεται στον αλγόριθμο εκτίμησης θέσης, ο οποίος επιστρέφει τον μετασχηματισμό του αντικειμένου. Ο μετασχηματισμός αυτός συνδυάζεται στη συνέχεια με τα δεδομένα από τα σημεία σύλληψης για να δημιουργηθεί η βέλτιστη πόζα προσάρτησης.



Εικόνα 11. Μετασχηματισμός θέσης των εντοπισμένων αντικειμένων

Το επόμενο βήμα είναι η προσάρτηση ενός αντικειμένου από το ρομπότ με την χρήση της αρπάγης κενού. Χρησιμοποιώντας τη δημιουργημένη στάση, ο ρομποτικός βραχίονας μετακινείται πάνω από το αντικείμενο και εκτελεί μια κατακόρυφη κίνηση προς τα κάτω μέχρι να δημιουργηθεί αναρρόφηση (suction) με την επιφάνεια του εξαρτήματος, και έπειτα το ανυψώνει και το τοποθετεί πάνω στη ράγα. Αυτή η διαδικασία διαχειρίζεται από το MoveIt2 stack και ήταν ιδιαίτερα επιτυχημένη κατά τις επαναλήψεις στο περιβάλλον δοκιμών.



Εικόνα 12. Αρπαγή την εντοπισμένων αντικειμένων από τον ρομποτικό βραχίονα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Ολόκληρη η προαναφερθείσα διαδικασία διαχειρίζεται από το σύστημα οργάνωσης. Το σύστημα αυτό λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συναρμολόγησης και αναλαμβάνει όλα τα ρομποτικά καθήκοντα. Κατά τις δοκιμές, οι ρομποτικές διεπαφές δεν παρουσίασαν κανένα πρόβλημα και η ολοκλήρωση των εργασιών καθώς και η πρόοδος ήταν ομαλές. Τέλος, η επιλογή των εξαρτημάτων ήταν απολύτως σωστή, σύμφωνα με τα καθορισμένα κριτήρια.

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

2.2.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Κατά τη χρήση μιας ρομποτικής πλατφόρμας, η ασφάλεια των χειριστών αποτελεί πρωταρχική προτεραιότητα. Για τον λόγο αυτό, ξεκίνησε η ανάπτυξη ενός προηγμένου συστήματος ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας και αποφυγής σύγκρουσης ρομπότ με τους χειριστές, αξιοποιώντας τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης. Στη συνέχεια, για την υλοποίηση του ψηφιακού διδύμου, δημιουργήθηκε ένα ρεαλιστικό ψηφιακό περιβάλλον που αναπαριστά μία υπαρκτή εργοστασιακή μονάδα, μέσω εργαλείων προσομοίωσης. Το ψηφιακό αυτό περιβάλλον συγχρονίζεται σε πραγματικό χρόνο με δεδομένα που προέρχονται από πραγματικούς αισθητήρες, διασφαλίζοντας την ακρίβεια και την δυναμική απεικόνιση των συνθηκών λειτουργίας. Τέλος, αναπτύχθηκαν οι απαραίτητες διεπαφές για τον έλεγχο όλων των επιμέρους υποσυστημάτων, επιτρέποντας την πλήρη εποπτεία και την διαχείριση μέσω του συστήματος οργάνωσης. Τα στάδια ανάπτυξης του ψηφιακού διδύμου είναι τα εξής:

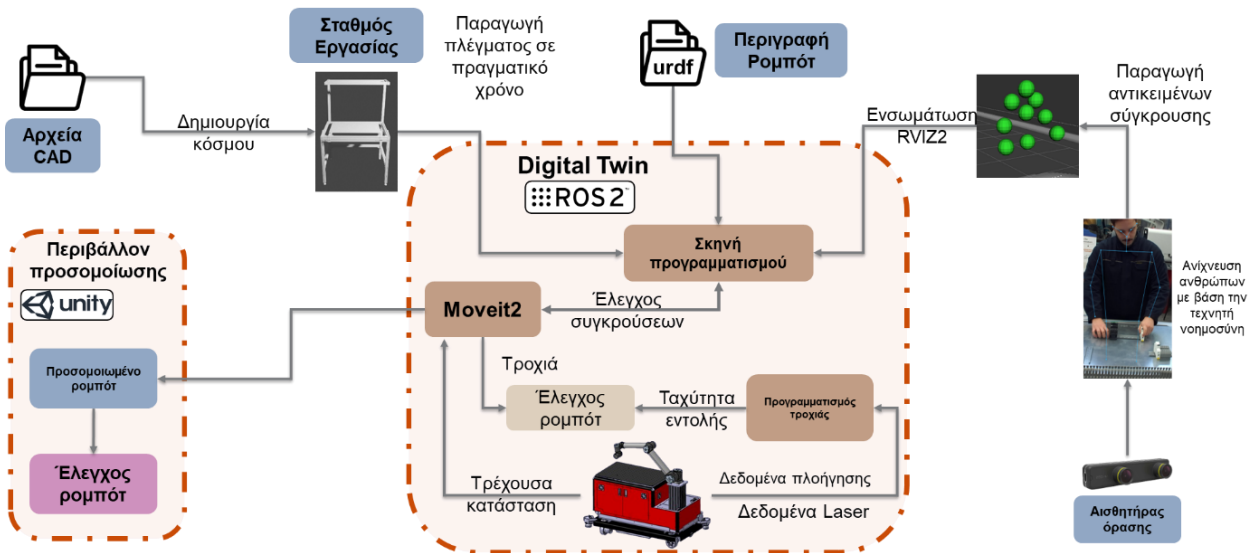
- Εντοπισμός ανθρώπου και αποφυγή σύγκρουσης χρησιμοποιώντας την τεχνητή νοημοσύνη και δεδομένα πραγματικού χρόνου από αισθητήρες όρασης.
- Δημιουργία ψηφιακού περιβάλλοντος και προσομοίωσης μέσω κατασκευαστικών αρχείων (CAD) και αισθητήρων όρασης.
- Ανάπτυξη πλατφόρμας απεικόνισης και χειρισμού του ψηφιακού διδύμου.
- Ενημέρωση του ψηφιακού περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο με δυναμικά εμπόδια.
- Επικοινωνία με το κεντρικό σύστημα οργάνωσης.
- Συνεχής έλεγχος και προσαρμογή των εφαρμοσμένων τεχνολογιών.

2.2.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η παρούσα λύση αποσκοπεί στην ακριβή απεικόνιση και προσομοίωση ενός ρομποτικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο, καθώς και στην παροχή δυνατότητας απομακρυσμένου ελέγχου μέσω ενός ψηφιακού περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, το ψηφιακό δίδυμο συγκροτείται από έναν εικονικό κόσμο σχεδιασμένο ώστε να αναπαριστά πιστά τη φυσική υπόσταση του ρομποτικού συστήματος. Η γεωμετρία του σταθμού εργασίας και των εξαρτημάτων υλοποιείται μέσω αρχείων CAD, ενώ η ενσωμάτωση του ρομποτικού βραχίονα πραγματοποιείται με τη χρήση του ειδικού τύπου αρχείου URDF (Unified Robot Description Format), ο οποίος περιέχει όλη την πληροφορία για το ρομπότ.

Η ενσωμάτωση μιας στερεοσκοπικής κάμερας στον χώρο του ρομποτικού κελιού επιτρέπει τον εντοπισμό και την παρακολούθηση χειριστών μέσα στον χώρο του ρομποτικού κελιού με τη χρήση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης. Οι θέσεις των χειριστών προβάλλονται στο ψηφιακό περιβάλλον και τροφοδοτούν τη ψηφιακή σκηνή για τον προγραμματισμό των κινήσεων των ρομπότ και την υλοποίηση στρατηγικών αποφυγής σύγκρουσης των ρομπότ και των χειριστών. Επιπλέον, ένα ειδικά διαμορφωμένο εργαλείο προσομοίωσης επιτρέπει την αναπαραγωγή της λειτουργίας της ρομποτικής πλατφόρμας, δίνοντας τη δυνατότητα για εικονικό έλεγχο, δοκιμές και βελτιστοποίηση των συστημάτων χωρίς την ανάγκη φυσικής πρόσβασης στον εξοπλισμό. Η πλατφόρμα του ψηφιακού διδύμου περιλαμβάνει επίσης λειτουργίες επιτήρησης και ελέγχου όλων των επιμέρους υποσυστημάτων. Όλες οι διεπαφές είναι διασυνδεδεμένες με ένα ενιαίο σύστημα ενορχήστρωσης, επιτρέποντας τον κεντρικό έλεγχο και την απλοποίηση των διαδικασιών διαχείρισης βασισμένο στο Robot Operating System 2 (ROS2).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



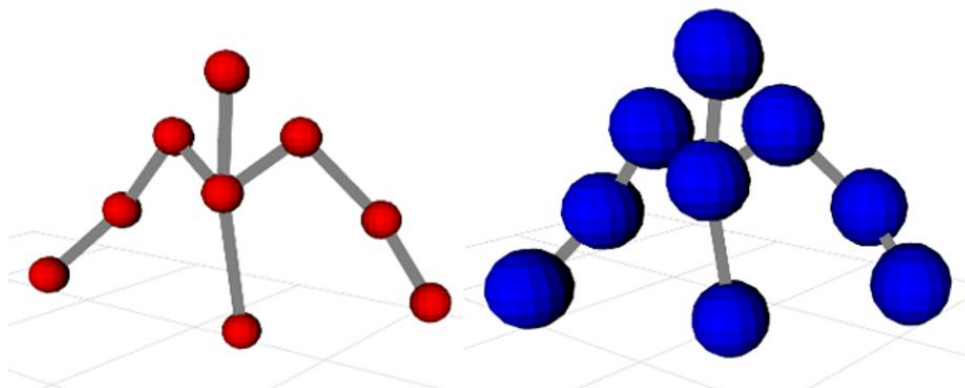
Εικόνα 13. Αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου και εργαλείου προσομοίωσης

2.2.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός προηγμένου ρομποτικού συστήματος με δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, η παρούσα υλοποίηση εστιάζει σε δύο βασικές ομάδες λειτουργιών: α) την αναπαράσταση του ρομποτικού κελιού στο ψηφιακό δίδυμο και β) τη δημιουργία εργαλείων για την προσομοίωση λειτουργιών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Unity3D σε συνδυασμό με το δίκτυο ROS2, μέσω της γέφυρας ROS2 TCP, για την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του πραγματικού και του ψηφιακού περιβάλλοντος. Η ενσωμάτωση των ρομπότ επιτεύχθηκε με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης Unity Robotics Hub.

Η αξιόπιστη παρακολούθηση των χειριστών σε πραγματικό χρόνο αποτελεί κρίσιμη λειτουργία για την ασφάλεια στη συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ (Human-Robot Collaboration – HRC). Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιείται μια στερεοσκοπική κάμερα τοποθετημένη στον χώρο του ρομποτικού κελιού για την καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την χρήση του μοντέλου τεχνητής νοημοσύνης για την εξαγωγή τρισδιάστατων σημείων-κλειδιών (αρθρώσεων) του χειριστή. Τα σημεία αυτά φιλτράρονται ώστε να διατηρούνται μόνο όσα βρίσκονται εντός του εύρους του ρομποτικού βραχίονα, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τον όγκο των δεδομένων.

Το σύστημα βασίζεται στο ROS2, όπου συνδρομητές (subscribers) λαμβάνουν τα δεδομένα από τις κάμερες και εκδότες (publishers) μεταδίδουν τα επεξεργασμένα σημεία. Το σύστημα είναι σε θέση να εκτιμήσει και μη ορατά σημεία χρησιμοποιώντας σκελετικά μοντέλα τριών διαστάσεων.

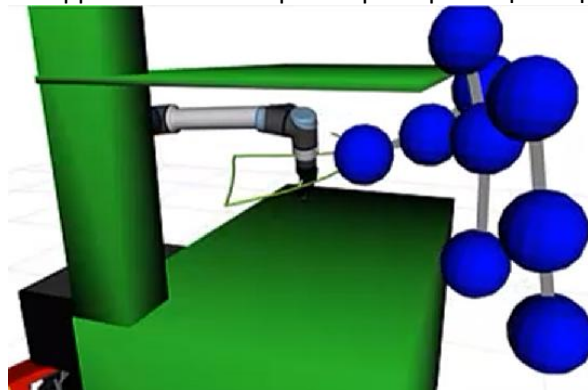


Εικόνα 14. Σημεία κλειδιά στο ανθρώπινο σκελετό και δημιουργία εμποδίων προς αποφυγή

Για να λειτουργήσει σωστά το σύστημα, απαιτείται βαθμονόμηση τύπου hand-eye, ώστε να υπολογιστεί η ακριβή θέση τοποθέτησης της κάμερας ως προς την βάση του ρομπότ. Για το ψηφιακό δίδυμο που

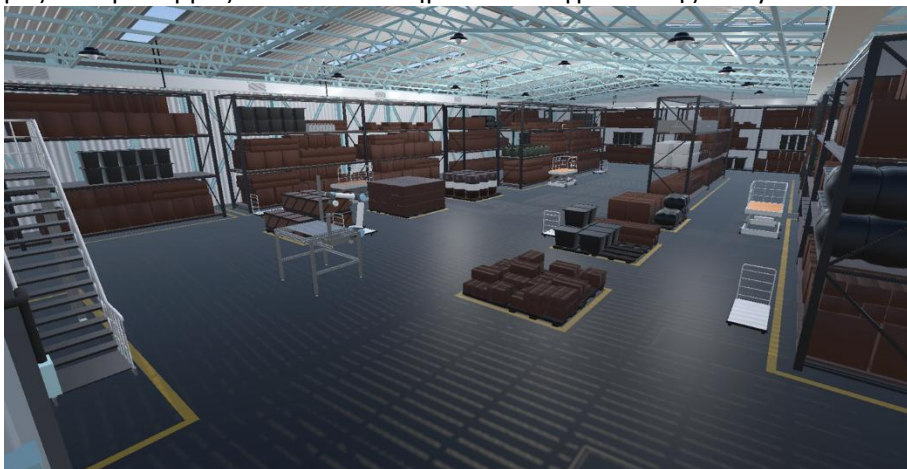
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής αναπτύχθηκε, η βαθμονόμηση έγινε με στατική κάμερα και χρήση ενός δείκτη ArUco τοποθετημένο πάνω στον ρομποτικό βραχίονα.

Ο έλεγχος της κίνησης πραγματοποιείται με την βιβλιοθήκη MoveIt2 του ROS2, το οποίο υποστηρίζει αποφυγή σύγκρουσης με στατικά και δυναμικά εμπόδια του ρομποτικού κελιού. Οι χειριστές αναπαρίστανται ως δυναμικά αντικείμενα (σφαίρες), και όταν ανιχνεύεται πιθανότητα μελλοντικής σύγκρουσης, το ρομπότ είτε επιβραδύνει είτε σταματά προσωρινά την κίνηση του.



Εικόνα 15. Αποφυγή ανθρώπου με την χρήση σημείων κλειδιών και δημιουργία δυναμικών εμποδίων

Για τη δημιουργία μιας ρεαλιστικής προσομοίωσης του ρομποτικού περιβάλλοντος, δημιουργήθηκε στο Unity3D ένα εικονικό αντίγραφο του φυσικού σταθμού εργασίας, με τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων όπως κουτιά, ράφια και ρομποτικός εξοπλισμός. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα φωτισμού για καλύτερη οπτικοποίηση και 3D μοντέλα πραγματικών εξαρτημάτων, τα οποία εισήχθησαν στο περιβάλλον Unity. Η ακριβής αναπαράσταση του ρομπότ (Robotnik RB Kairos+) έγινε με την εισαγωγή του αντίστοιχου URDF αρχείου μέσω της βιβλιοθήκης URDF Importer του ROS2. Έπειτα, δημιουργήθηκαν διεπαφές ROS2 για τη συνεχή ενημέρωση των θέσεων των αρθρώσεων σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα μετατρέπονται από ακτίνια σε μοίρες και προσαρμόζονται στο σύστημα συντεταγμένων της Unity.



Εικόνα 16. Στιγμιότυπο 3D περιβάλλοντος προσομοίωσης ανεπτυγμένο σε Unity3D

Επιπλέον, υποστηρίζεται η δυνατότητα οπτικοποίησης της προβλεπόμενης τροχιάς του ρομπότ, μέσω ενός δεύτερου μοντέλου (ολογράμματος), που λαμβάνει πληροφορίες για τις επικείμενες κινήσεις του ρομπότ. Αυτό προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα να προβλέψει πιθανές συγκρούσεις του ρομπότ με αντικείμενα του ρομποτικού κελιού.

Η εφαρμογή υποστηρίζει την απεικόνιση των αποτελεσμάτων από τα συστήματα όρασης (π.χ. ανίχνευση αντικειμένων, grasping points). Μέσω του ROS2, λαμβάνονται οι εικόνες από τις κάμερες, οι οποίες εμφανίζονται στην εφαρμογή με επισημάνσεις (bounding boxes, σημεία προσάρτησης). Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να παρακολουθεί την πραγματική απόκριση των συστημάτων TN, βελτιώνοντας τη διαφάνεια και την εποπτεία του συστήματος.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

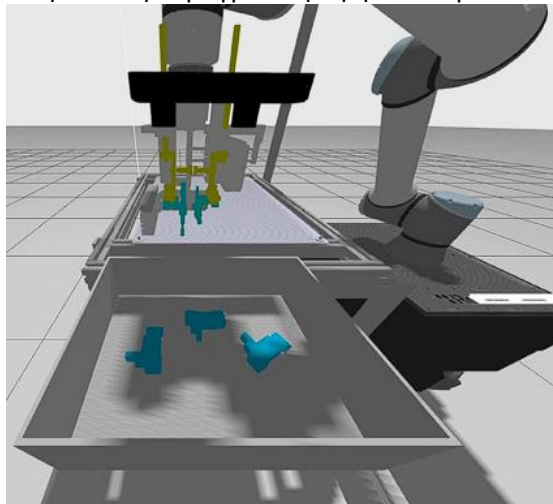
Η συνολική υλοποίηση προσφέρει ένα ρεαλιστικό, διαδραστικό και ασφαλές περιβάλλον, που συνδυάζει το φυσικό ρομποτικό σύστημα με εικονική αναπαράσταση, συστήματα όρασης και τεχνητή νοημοσύνη. Η χρήση του ROS2 και του Unity επιτρέπει την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία, καθιστώντας το σύστημα κατάλληλο για προηγμένες εφαρμογές βιομηχανικού αυτοματισμού και συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ.

Ψηφιακό δίδυμο για προσομοίωση

Παράλληλα η εφαρμογή έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει και την προσομοίωση διαφόρων αισθητήρων για την δοκιμή των λειτουργιών με συνθετικά δεδομένα. Η προσομοίωση έγινε αρχικά για δύο λειτουργίες.

- Για την χρήση των συστημάτων όρασης και την εύρεση ηλεκτρολογικών κομματιών στο ψηφιακό περιβάλλον.
- Για την χρήση του αισθητήρα δύναμης ώστε να γίνει η τοποθέτηση αυτών στη ράγα.

Αρχικά για την χρήση των αληθινών συστημάτων όρασης χρειάστηκε η κατασκευή των κατάλληλων διασυνδέσεων. Για την παραγωγή των κατάλληλων δεδομένων χρώματος και βάθους, χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο Unity plugin που είναι κατάλληλο για στερεοσκοπικές κάμερες και τοποθετήθηκε στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα, μιμούμενο την συμπεριφορά της φυσικής κάμερας. Παράλληλα, η μετάδοση των δεδομένων στο δίκτυο πραγματοποιείται μέσω της λογικής ROS-TCP plugin, ώστε να ενσωματωθούν τα δεδομένα των αισθητηρίων στη ροή επεξεργασίας. Στην συνέχεια προστέθηκαν τα ηλεκτρολογικά κομμάτια στην σκηνή χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα μοντέλα CAD και τοποθετήθηκαν στο κουτί αφού επεξεργάστηκαν ώστε να αποκτήσουν την πραγματική υφή και κλίμακα.



Εικόνα 17. Ενσωμάτωση του συστήματος όρασης στο ψηφιακό δίδυμο

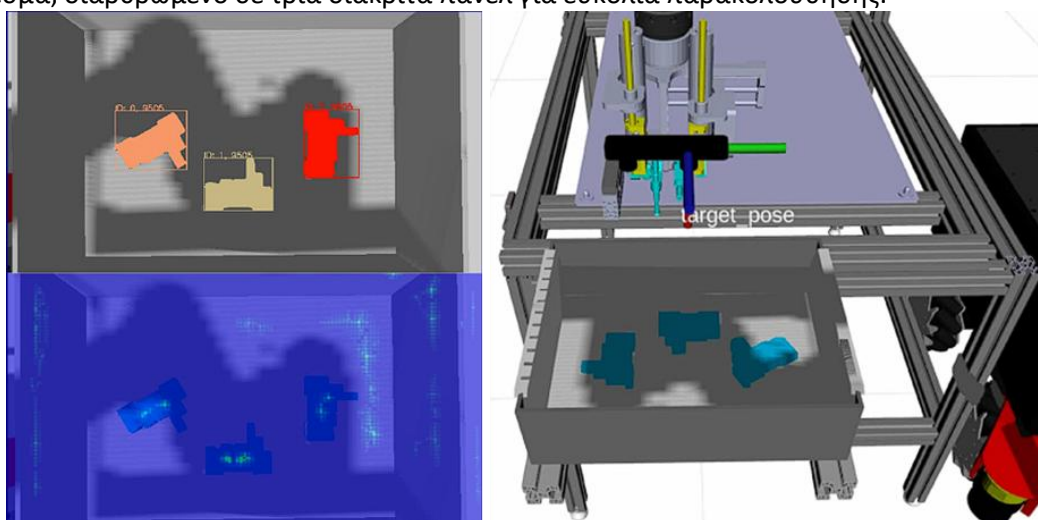
Επιπλέον για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων χρειάζεται και η προσομοίωση ενός αισθητήρα δύναμης που είναι τοποθετημένος στο άκρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα. Το μοντέλο του ρομπότ είναι δομημένο με τη χρήση Articulation Bodies. Τα Articulation Bodies επιτρέπουν τη δημιουργία φυσικών αρθρώσεων, όπως ρομποτικούς βραχίονες ή κινηματικές αλυσίδες, με GameObjects που οργανώνονται ιεραρχικά. Παρέχουν ρεαλιστικές φυσικές συμπεριφορές, ιδιαίτερα χρήσιμες σε προσομοιώσεις για βιομηχανικές εφαρμογές. Με αυτή τη δομή, μπορούμε να υπολογίσουμε τη δυναμική ανάδραση στο πλαίσιο αναφοράς του αισθητήρα δύναμης με τον φυσικό solver Featherstone και να μεταφέρουμε τα διανύσματα δύναμης και ροπής στο ROS2 μέσω της μεθόδου ROS-TCP. Ύστερα από δοκιμές κρίθηκε ότι τα δεδομένα αυτά είναι ασταθή και ακατάλληλα για χρήση. Για την επίλυση του προβλήματος έγινε αντικατάσταση του Unity από τον λογισμικό Gazebo καθώς προσφέρει περισσότερα και πιο ευαίσθητα εργαλεία προσομοίωσης.

2.2.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Η υλοποιημένη λύση, όπως περιεγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, αξιοποιήθηκε και αξιολογήθηκε στο ίδιο σενάριο συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2. Στο

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής πλαίσιο της διαδικασίας συναρμολόγησης, εφαρμόστηκαν όλες οι αναπτυχθείσες τεχνολογίες, επιτρέποντας την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητάς τους. Οι τεχνολογίες αξιολογήθηκαν σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον, αποδίδοντας τα αποτελέσματα της τελικής εκδοχής τους. Κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης, το σύστημα ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας λειτουργεί αδιάκοπα στο παρασκήνιο. Τα σημεία-κλειδιά που σχετίζονται με τις αρθρώσεις του σώματος επεξεργάζονται μέσω φίλτρων, και για τα πλέον κρίσιμα από αυτά δημιουργούνται εικονικά σώματα αποφυγής σύγκρουσης. Το ρομποτικό σύστημα εκτελεί ενέργειες παράλληλα με τον χρήστη μέσα στον σταθμό εργασίας. Σε περίπτωση που ο χρήστης παρεμβάλει την τροχιά του ρομποτικού βραχίονα, το σύστημα προσαρμόζει τη συμπεριφορά του ρομπότ επιβραδύνοντας, και εφόσον το εμπόδιο παραμείνει, διακόπτει την κίνηση του.

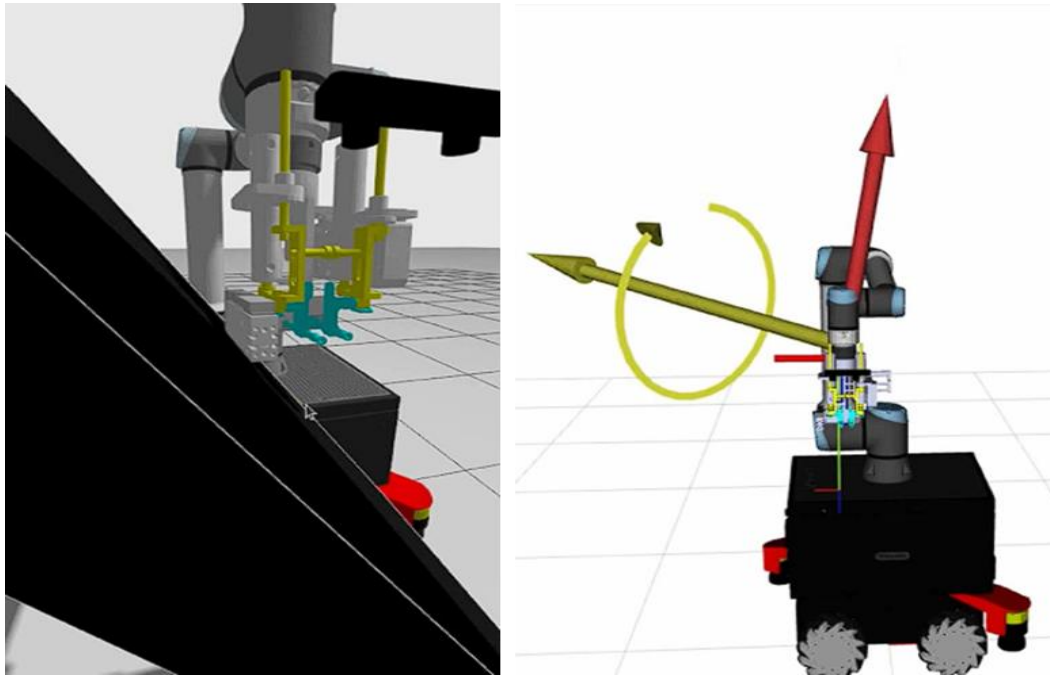
Ταυτόχρονα, η εφαρμογή που βασίζεται στο Unity εκτελείται στο παρασκήνιο, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες στον χειριστή. Όταν ο ρομποτικός βραχίονας ακολουθεί προκαθορισμένο πλάνο κίνησης οι ενέργειές του αποτυπώνονται δυναμικά στο ψηφιακό μοντέλο. Επιπλέον, η προγραμματισμένη τροχιά αποδίδεται οπτικά μέσω ενός μπλε ολογράμματος, προσφέροντας ξεκάθαρη πρόβλεψη της κίνησης. Τέλος, πραγματοποιήθηκε δοκιμή της εφαρμογής σε συνδυασμό με τα οπτικά μοντέλα επεξεργασίας. Η διεπαφή του συστήματος παρουσιάζει την έξοδο κάθε μοντέλου, καθώς και το τελικό συνδυαστικό αποτέλεσμα, διαρθρωμένο σε τρία διακριτά πάνελ για ευκολία παρακολούθησης.



Εικόνα 18. Απεικόνιση του ψηφιακού διδύμου κατά την διαδικασία συναρμολόγησης

Πραγματοποιήθηκε επίσης αξιολόγηση του εργαλείου προσομοίωσης τόσο σε σενάρια βασισμένα στην οπτική αντίληψη όσο και σε περιπτώσεις ελέγχου που βασίζονται σε δεδομένα δύναμης. Το ρομπότ μετακινείται πάνω από το κουτί που περιέχει εικονικά αντικείμενα και ενεργοποιεί τα συστήματα όρασης για την εύρεση τους. Παρατηρήθηκε ότι η απόκριση του μοντέλου σημείων προσάρτησης ήταν περιορισμένη ωστόσο οι συνθήκες φωτισμού και η υφή των αντικειμένων διαφέρουν από την πραγματική. Αντίθετα το μοντέλο τμηματοποίησης και η διαδικασία εύρεσης της πόζας των αντικειμένων αποδείχθηκαν πλήρως λειτουργικές και στα εικονικά δεδομένα.

Στο πλαίσιο της δοκιμής του αισθητήρα δύναμης, το ρομποτικό σύστημα εκτέλεσε κατακόρυφη τροχιά πάνω από μια επιφάνεια με κλίση. Καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης, ο αισθητήρας δύναμης παρείχε συνεχή ροή δεδομένων στον ελεγκτή του ρομπότ, ο οποίος προσαρμοζόταν δυναμικά ώστε να διατηρεί επαφή και να ακολουθεί την κεκλιμένη επιφάνεια με ακρίβεια. Τα δεδομένα δύναμης οπτικοποιούνται σε πραγματικό χρόνο στον τρισδιάστατο χώρο του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Επιπλέον, η χρήση του GAZEBO προσέφερε υψηλής ποιότητας αναπαράσταση των προσομοιωμένων αισθητήρων, επιτρέποντας την εικονική δοκιμή κατασκευαστικών σεναρίων όπως η τοποθέτηση ράγας, με ρεαλιστική ακρίβεια.



Εικόνα 19. Δεδομένα από τον αισθητήρα δύναμης κατά την διαδικασία συναρμολόγησης

Η παραπάνω διαδικασία ελέγχεται εξ' ολοκλήρου από το σύστημα οργάνωσης. Το σύστημα είναι υπεύθυνο για την επιτήρηση των σημείων κλειδιών του ανθρώπου και την για παύση της ρομποτικής τροχιάς σε περίπτωση σύγκρουσης. Παράλληλα επιτρέπει την διέλευση δεδομένων για απομακρυσμένη προβολή και έλεγχο της συνολικής διαδικασίας. Επιπλέον, δοκιμάστηκε σε εργαστηριακό επίπεδο κατά την εικονική διαδικασία εγκατάστασης μίας ηλεκτρολογικής ράγας εφαρμόζοντας όλα τα προηγούμενα εργαλεία προσομοίωσης και διαπιστώθηκε η ομαλή ολοκλήρωση της διαδικασίας.



Εικόνα 20. Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα και της ρομποτικής αρπάγης μέσα στο ψηφιακό περιβάλλον

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

Οι διαδικασίες προσθετικής κατασκευής συνοδεύονται συχνά από προκλήσεις που σχετίζονται με την ποιότητα του τελικού προϊόντος, τόσο σε δομικό επίπεδο (όπως η παρουσία εγκλεισμάτων, πόρων ή μικρο-ρωγμών), όσο και σε γεωμετρική ακρίβεια. Για την ανίχνευση και, στο μέτρο του δυνατού, την εξάλειψη αυτών των προβλημάτων, θα αναπτυχθούν κατάλληλοι αλγόριθμοι και εργαλεία λογισμικού. Η παρούσα λύση επικεντρώνεται στην ανάπτυξη λογισμικού που αξιοποιεί την Τεχνητή Νοημοσύνη και την συλλογή δεδομένων, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής.

2.3.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

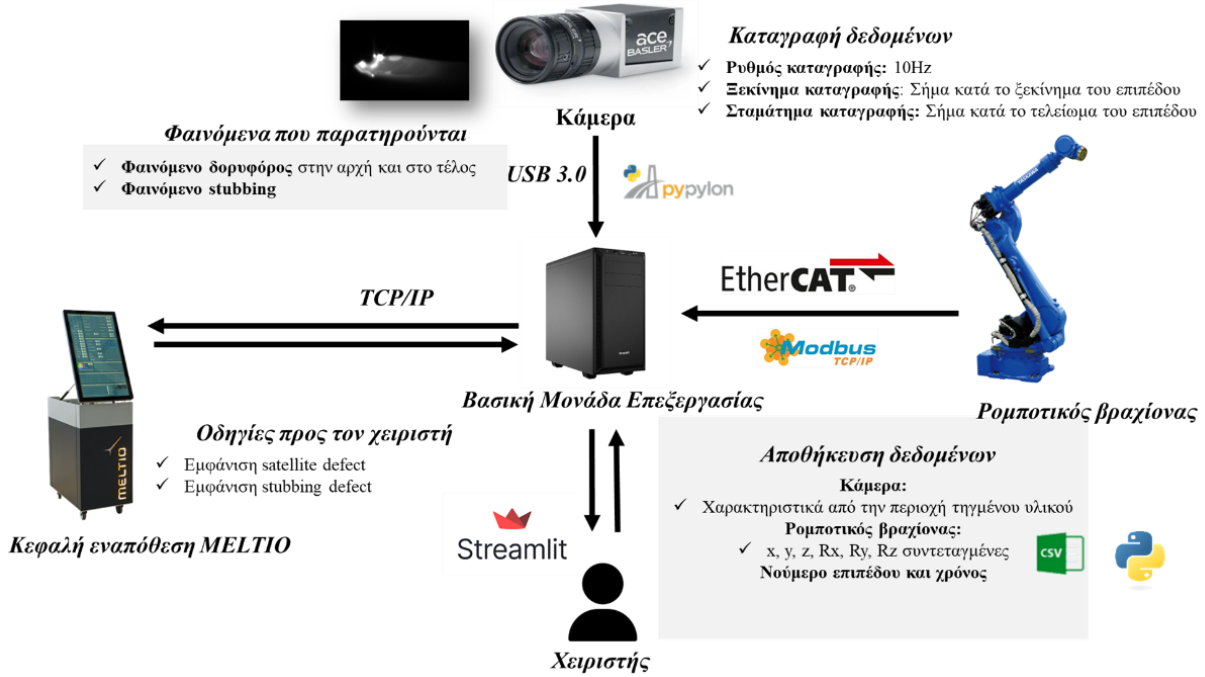
Για την υλοποίηση της λύσης, ένα οργανόγραμμα διαδικασιών σχεδιάστηκε, με σκοπό την τήρηση σωστής μεθοδολογίας για την εξαγωγή έμπιστων αποτελεσμάτων και την δυνατότητα εγκατάστασης τους σε διάφορα συστήματα.

1. **Τοποθέτηση αισθητήρων και συλλογή δεδομένων:** Πραγματοποιήθηκε η σωστή εγκατάσταση των αισθητηρίων και η έναρξη καταγραφής δεδομένων, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων.
2. **Σχεδίαση αρχιτεκτονικής πλατφόρμας:** Αναπτύχθηκε η δομή της πλατφόρμας, προκειμένου να οργανωθεί η διαδικασία ελέγχου και ανάλυσης των δεδομένων.
3. **Πειραματική διαδικασία:** Διεξήχθησαν πειράματα με διαφορετικές παραμέτρους, ώστε να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων με υγιή και ελαττωματικά δείγματα.
4. **Ανάλυση δεδομένων:** Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τον εντοπισμό κρίσιμων χαρακτηριστικών που υποδηλώνουν ελαττώματα και τη συσχέτιση των θερμικών και γεωμετρικών φαινομένων.
5. **Ανάπτυξη μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης:** Δημιουργήθηκαν και εκπαιδεύτηκαν αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης για την ανίχνευση ατελειών στη διαδικασία.
6. **Ενσωμάτωση στην πλατφόρμα ποιοτικού ελέγχου:** Τα ανεπτυγμένα μοντέλα ενσωματώθηκαν στην πλατφόρμα, επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και αξιολόγηση της ποιότητας.
7. **Τελική μορφοποίηση πλατφόρμας ποιοτικού ελέγχου:** Η πλατφόρμα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να παρέχει λειτουργικότητα και πλήρη έλεγχο της διεργασίας, δίχως την ανάγκη χρήσης τρίτων λογισμικών.

2.3.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Όπως αναφέρθηκε και στο Παραδοτέο 2.1, η πλατφόρμα είναι δημιουργημένη σε περιβάλλον Python και κάνει χρήση διάφορων βιβλιοθηκών για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ του εξοπλισμού. Ακόμα, γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης Streamlit, για την δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος της πλατφόρμας. Η πρώτη δράση της πλατφόρμας είναι η δημιουργία σύνδεσης της βασικής μονάδας επεξεργασίας με την κεφαλή εναπόθεσης, με την χρήση TCP/IP Socket. Έπειτα, γίνεται έλεγχος αν η κάμερα είναι συνδεδεμένη και φορτώνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις. Σε αυτό το στάδιο, η πλατφόρμα είναι έτοιμη να λάβει και να αξιολογήσει δεδομένα. Για την σωστή συλλογή δεδομένων, ο αλγόριθμος αποθηκεύει τιμές και παραμέτρους μόνο όταν αρχίζει η εναπόθεση και έως ότου τελειώσει κάθε επίπεδο. Αυτό είναι εφικτό με την χρήση διάφορων σημάτων που στέλνονται από την κεφαλή στην αρχή και στο τέλος κάθε επιπέδου. Παρακάτω, στην Εικόνα 21, περιγράφονται οι συνδέσεις και οι ενέργειες του συστήματος.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

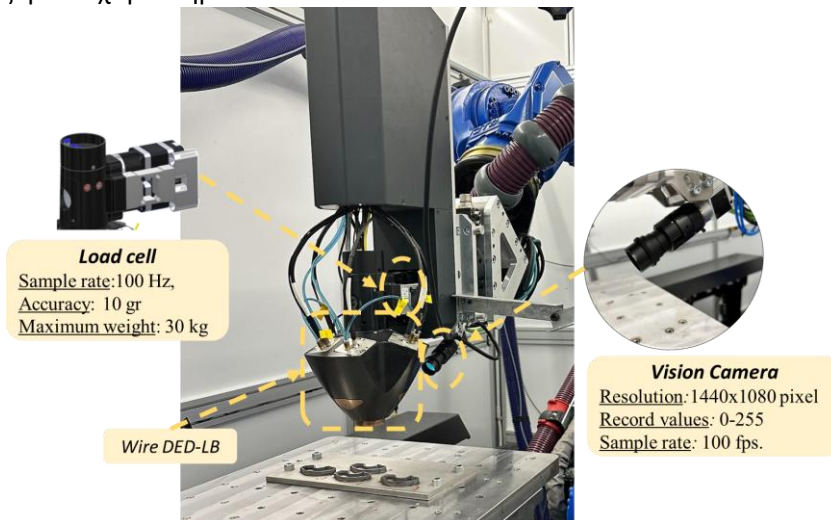


Εικόνα 21 Αρχιτεκτονική και εργαλεία συστήματος

2.3.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.3.3.1 Τοποθέτηση αισθητηρίων και δοκιμαστική συλλογή δεδομένων

Στο Παραδοτέο 2.1 παρουσιάστηκε η ανάλυση των βασικών προβλημάτων ποιότητας που σχετίζονται με την μέθοδο εναπόθεσης ενέργειας και την χρήση laser (Direct Energy Deposition Laser Beam- DED-LB). Εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν δύο κύριοι τύποι ελαττωμάτων: το φαινόμενο δορυφόρος “satellite defect” [1], το οποίο εμφανίζεται κατά την εκκίνηση και παύση της εναπόθεσης λόγω διαφορών στην ταχύτητα του ρομποτικού βραχίονα και της τροφοδοσίας του υλικού, και το φαινόμενο υπερ-εναπόθεσης υλικού “stubbing defect” [2], το οποίο οφείλεται σε υπερβολική ύψωση του υλικού με αποτέλεσμα τη μείωση της απόστασης μεταξύ σύρματος και επιφάνειας εναπόθεσης. Για τη μελέτη αυτών των φαινομένων, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια πειραματική διάταξη με χρήση πλαϊνής κάμερας σε γωνιακή διάταξη, προκειμένου να καταγραφούν εικόνες από την περιοχή τηγμένου υλικού σε διαφορετικές γεωμετρικές και ενεργειακές συνθήκες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 παρακάτω. Η κεφαλή της MELTIO είναι επίσης εξοπλισμένη με έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα (loadcell) ο οποίος επίσης απεικονίζεται μαζί με τα χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 22 Πειραματική διάταξη και χαρακτηριστικά αισθητηρίων

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση της οπτικής κάμερας διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εναπόθεσης μπορούν να παρατηρηθούν, όπως το πάχος της ραφής που εναποτίθεται. Ακόμα, μια ποιοτική ανάλυση του ύψους εναπόθεσης μπορεί να επιτευχθεί συσχετίζοντας την οπτική της κάμερας από την συγκεκριμένη γωνία με ένα γνωστό ύψος και βρίσκοντας τον αντίστοιχο μετασχηματισμό. Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός οπτικών σημάτων και μοντέλων TN μπορούν να επιτρέψουν την εύρεση προβλημάτων και ανωμαλιών κατά την διάρκεια της διεργασίας. Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας, που εδώ δεν γίνεται χρήση του, δίνει σήματα σε μορφή χρονοσειράς που αποδεικνύουν την κάθετη δύναμη που ασκείται στην κεφαλή σε σχέση με το επίπεδο εναπόθεσης.

2.3.3.2 Πειραματική διαδικασία

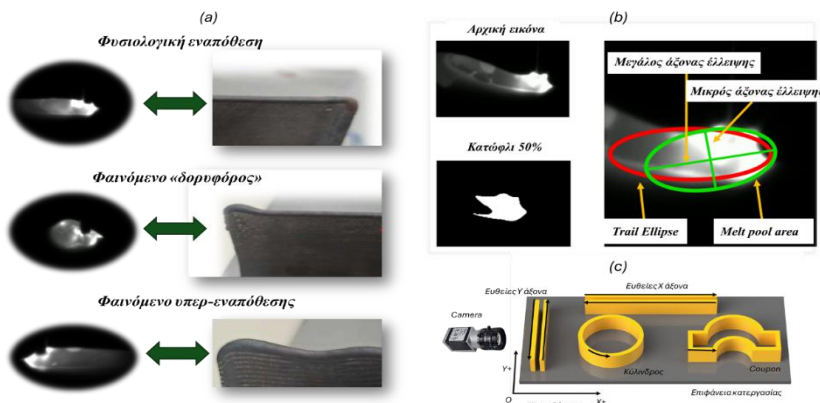
Οι γεωμετρίες που επιλέχθηκαν αφορούσαν κυρίως λεπτότοιχες κατασκευές, όπου τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται πιο έντονα [3]. Οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα πειράματα είναι:

- Ταχύτητα ρομπότ 10 m/s,
- ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος 13.5mm/s,
- χρόνος ψύξης επιπέδου 26 sec,
- ισχύς laser 620-925 Watt.

Για την δημιουργία μιας δομημένης και πλήρης βάσης δεδομένων για την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης, διεξήχθησαν πειράματα σε πέντε διαφορετικά επίπεδα ισχύς laser (620, 700, 775, 850, 925). Με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων μεγέθους 1535 δειγμάτων, συμπεριλαμβανομένων υγιών και μη σημάτων (μη υγιή σήματα χαρακτηρίζουν ελαττώματα και ανωμαλίες της διεργασίας).

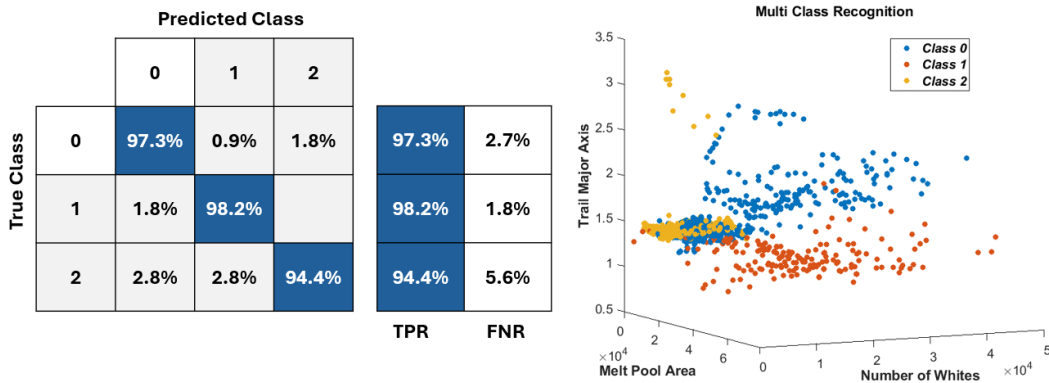
2.3.3.3 Ανάλυση δεδομένων και ανάπτυξη μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η διαδικασία χαρακτηρισμού και επισήμανσης των συλλεχθέντων δεδομένων (labelling), ακολουθούμενη από την εξαγωγή χρήσιμων χαρακτηριστικών (feature engineering) από τις εικόνες. Στο πλαίσιο αυτό, υπολογίστηκαν μετρικές όπως η επιφάνεια της περιοχής τηγμένου υλικού (melt pool area) και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των περιγραμμάτων, όπως παραμέτρους έλλειψης. Τα παραπάνω απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 23. Στόχος της ανάλυσης ήταν η ανάπτυξη μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης για την αυτόματη αναγνώριση και κατηγοριοποίηση ελαττωμάτων στις υπό μελέτη εικόνες. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, όπως τα Support Vector Machines (SVM), οι οποίοι εκπαιδεύτηκαν με βάση τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια στην αναγνώριση μεταξύ υγιών και ελαττωματικών περιπτώσεων – φτάνοντας έως και 99% σε επιμέρους κατηγορίες. Η συνδυαστική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων από τα επιμέρους μοντέλα οδήγησε στην ανάπτυξη ενός ενοποιημένου συστήματος ανίχνευσης ελαττωμάτων. Το σύστημα αυτό είναι ικανό να διακρίνει αποτελεσματικά μεταξύ των βασικών καταστάσεων λειτουργίας (κανονική λειτουργία, satellite defect, και stubbing defect) και επιτυγχάνει συνολική ακρίβεια 94.4%. Η κατηγοριοποίηση των τάξεων και η απόδοση του τελικού μοντέλου παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 24.



Εικόνα 23 (α) Ελαττώματα διεργασίας DED-LB με σύρμα (β) Εξαγωγή χαρακτηριστικών από το οπτικό σήμα (γ) Σχεδιασμός πειραμάτων και διάταξη αισθητηρίων

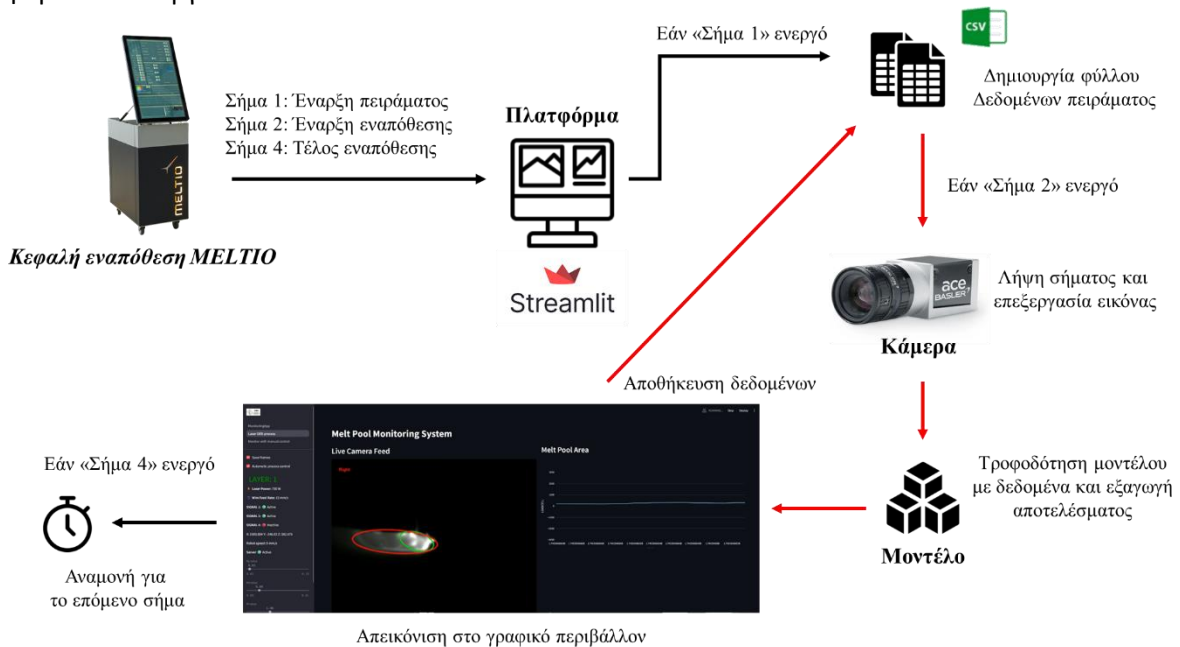
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 24 Πίνακας σύγχυσης και διάγραμμα περιοχών μοντέλου

2.3.3.4 Ανάπτυξη πλατφόρμας ποιοτικού ελέγχου

Για την πλατφόρμα, όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη Streamlit. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη δίνει την δυνατότητα δημιουργίας web εφαρμογών, εύκολης δημιουργίας του γραφικού περιβάλλοντος αλλά και όμορφης και κατανοητής οπτικοποίησης δεδομένων (γραφήματα). Παρακάτω, στην Εικόνα 25, φαίνεται ένα διάγραμμα ροής μεταξύ της πλατφόρμας, των διάφορων σημάτων και των διάφορων λειτουργιών.



Εικόνα 25 Διάγραμμα ροής της πλατφόρμας και του μηχανήματος

Η πλατφόρμα βασίζεται στο Streamlit και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και ανάλυση της περιοχής τήξης (melt pool) σε πραγματικό χρόνο. Μέσω της κάμερας Basler, η πλατφόρμα λαμβάνει συνεχή ροή εικόνας από τη διαδικασία τήξης που εκτελείται στο σύστημα Meltio. Οι εικόνες επεξεργάζονται ώστε να εντοπιστεί και να επισημανθεί η περιοχή του melt pool, ενώ παράλληλα υπολογίζονται κρίσιμες μετρικές, όπως το εμβαδόν της περιοχής. Οι μετρήσεις αυτές προβάλλονται σε γραφήματα και αποθηκεύονται αυτόματα σε αρχεία CSV για μελλοντική ανάλυση ή τεκμηρίωση. Παρακάτω στην Εικόνα 26 φαίνεται η βασική δομή του γραφικού περιβάλλοντος της πλατφόρμας με σκοπό την πλήρη επίβλεψη της διεργασίας και των σημάτων.



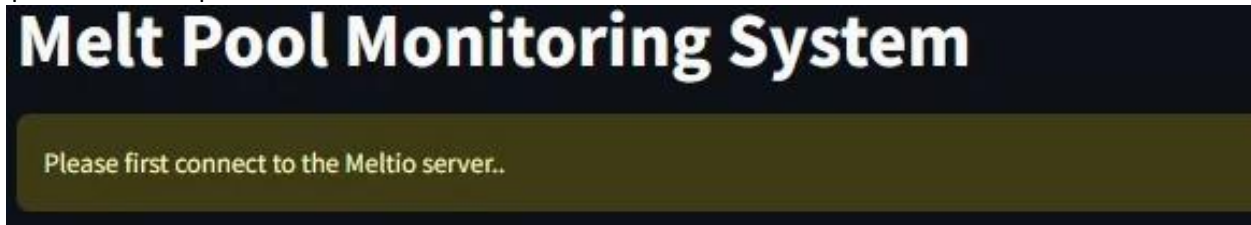
Εικόνα 26 Αρχιτεκτονική γραφικού περιβάλλοντος

Η πλατφόρμα “Melt Pool Monitoring System” έχει τρεις βασικές περιοχές. Στα αριστερά βρίσκεται το μενού με επιλογές για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της διαδικασίας, την αποθήκευση εικόνων και τη ρύθμιση του PID ελεγκτή. Στο κέντρο εμφανίζεται η ζωντανή ροή εικόνας από την κάμερα που παρακολουθεί τη διαδικασία τήξης. Στα δεξιά προβάλλονται μηνύματα σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας και διαγράμματα που απεικονίζουν μετρικές της διαδικασίας, όπως το εμβαδόν του melt pool. Η δομή της πλατφόρμας επιτρέπει εύκολη εποπτεία και έλεγχο.

2.3.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

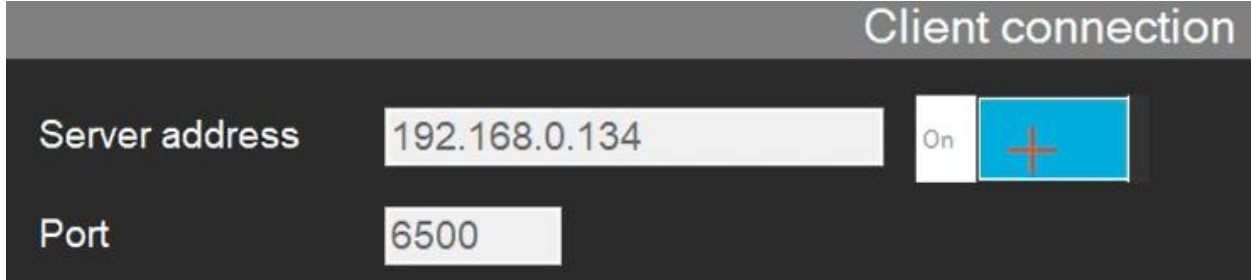
2.3.4.1 Τελική έκδοση πλατφόρμας ποιοτικού ελέγχου προσθετικών διεργασιών

Σχετικά με την σωστή ροή της διεργασίας, πρέπει αρχικά ο χρήστης να επιλέξει από το αριστερό άνω μέρος της οθόνης το είδος της διεργασίας που θέλει να παρακολουθήσει όσο και αν θέλει ή όχι να υπάρχει έλεγχος της ισχύς των λέιζερ. Ακόμα, μπορεί να επιλέξει αν θέλει ή όχι να αποθηκεύσει τις εικόνες που συλλέγονται από κάθε επίπεδο. Έπειτα, αφού έχει επιλέξει διεργασία, δείχνεται ένα μήνυμα στην οθόνη του για την ενεργοποίηση του διακομιστή (server) από την μηχανή εναπόθεσης Meltio όπως φαίνεται και στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27 Μήνυμα για την ενεργοποίηση του διακομιστή Meltio

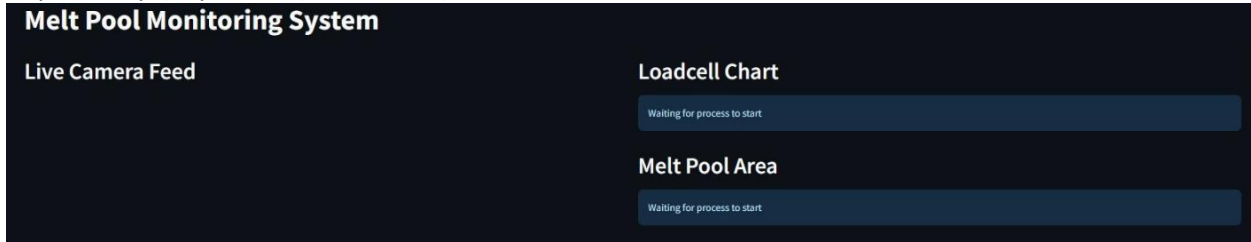
Αντίστοιχα, στο περιβάλλον της μηχανής Meltio, πρέπει να τοποθετηθεί μια συγκεκριμένη IP και πύλη (port) οι οποίες έχουν καθοριστεί κατά την κατασκευή της πλατφόρμας (η IP ταιριάζει με τον υπολογιστή που έχει τοποθετηθεί η πλατφόρμα) και να γίνει η σύνδεση με τον διακομιστή της πλατφόρμας. Το γραφικό περιβάλλον της μηχανής Meltio σχετικά με αυτή την ενέργεια φαίνεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28 Περιβάλλον διακομιστή μηχανής Meltio

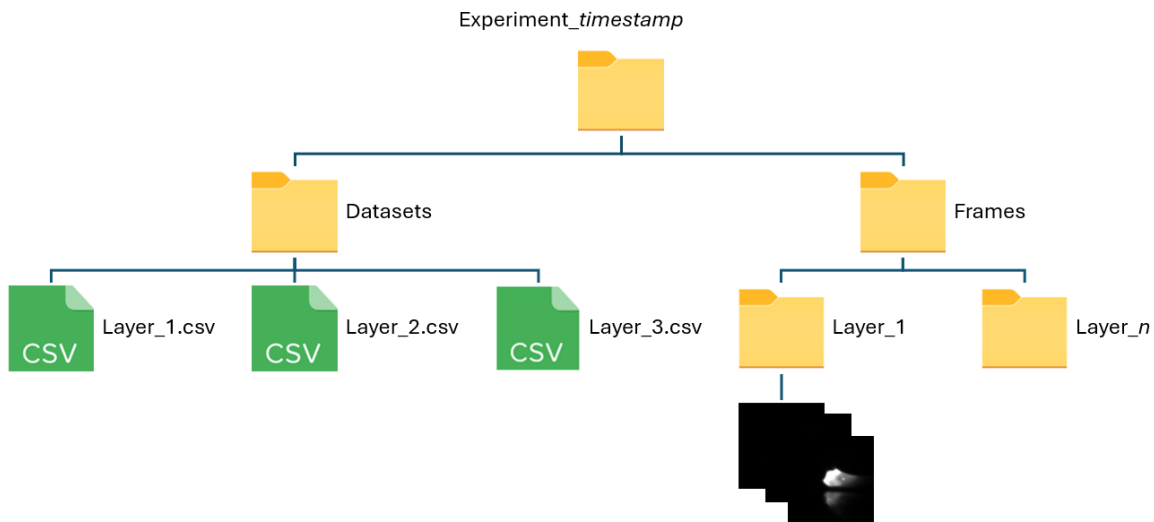
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Αφού γίνει η σύνδεση, η πλατφόρμα ελέγχει για τη σύνδεση κάποιας κάμερας Basler. Σε περίπτωση που ανιχνεύσει αντίστοιχο αισθητήρα, τότε τον αποθηκεύει και φορτώνει τις ρυθμίσεις του σχετικά με φωτεινότητα, χρόνος έκθεσης κλπ. από ένα αρχείο τύπου *.pfs*. Αφού γίνει και αυτή η ενέργεια επιτυχημένα τότε η πλατφόρμα είναι σε θέση να παρακολουθήσει την διεργασία δείχνοντας το παρακάτω μήνυμα που φαίνεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29 Εικόνα κατά την αναμονή έναρξης της διεργασίας εναπόθεσης

Κατά την έναρξη της διεργασίας, το μηχάνημα Meltio αρχίζει να εκτελεί κάποιες μακροεντολές. Κατά την έναρξη μιας εργασίας το μηχάνημα ενεργοποιεί το Σήμα 1. Με το που αναγνωρίσει η πλατφόρμα αυτό το σήμα, δημιουργεί έναν φάκελο για την καταγραφή των χαρακτηριστικών αλλά και των εικόνων. Το όνομα του φακέλου έχει την εξής μορφή “Experiment_{timestamp}” με σκοπό την εύκολη αναγνώριση του. Ακόμα, η πλατφόρμα δημιουργεί ξεχωριστό φάκελο για κάθε επίπεδο εναπόθεσης για τον εύκολο διαχωρισμό των δεδομένων. Η τελική δομή του φακέλου φαίνεται στην Εικόνα 30 παρακάτω.



Εικόνα 30 Δομή φακέλου πειράματος

Αφού έχει δημιουργηθεί ο φάκελος του πειράματος, η πλατφόρμα μπαίνει σε μια συνεχόμενο βρόγχο όπου περιμένει και διαβάζει μηνύματα ή πακέτα μηνυμάτων από το μηχάνημα Meltio. Στην αρχή κάθε επιπέδου, ακριβώς αμέσως από την ενεργοποίηση των λέιζερ, το μηχάνημα ενεργοποιεί το Σήμα 2 το οποίο για την πλατφόρμα μεταφράζεται ως η έναρξη ενός επιπέδου. Μαζί με την ενεργοποίηση του σήματος γίνεται και η αποστολή δύο μηνυμάτων με την μορφή “LaserPower= {laser power value}” και “FeederSpeed= {wire_feed_rate}” τα οποία δίνουν στην πλατφόρμα την τιμή της ισχύς των λέιζερ αλλά και την ταχύτητα τροφοδοσίας υλικού την στιγμή που ξεκινάει η εναπόθεση. Μόλις γίνει αυτή η ενέργεια, ο βρόγχος ξεκινάει και η ροή των εργασιών περιγράφεται παρακάτω. Αρχικά η πλατφόρμα στέλνει ένα μήνυμα με την λέξη “LOADCELL” η οποία λαμβάνεται από το μηχάνημα το οποίο από τον κατασκευαστή του είναι ορισμένο να στέλνει ως απάντηση “LOADCELL= {loadcell_value}” και αναπαριστά την τιμή του αισθητήρα δύναμη στο άκρο της κεφαλής. Μόλις η πλατφόρμα λάβει την απάντηση, συλλέγει την εικόνα της συγκεκριμένης στιγμής από την κάμερα και αρχίζει την επεξεργασία της όπως έχει περιγραφεί στην παραπάνω παράγραφο. Με την εξαγωγή της τιμής της περιοχής τηγμένου υλικού αρχίζει η απεικόνιση και καταγραφή των δεδομένων. Στα δεξιά της οθόνης δίνονται δύο διαγράμματα γραμμής που παρουσιάζεται η τιμή του αισθητήρα δύναμης αλλά και το εμβαδόν της περιοχής τηγμένου υλικού. Μια

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής σημαντική σημείωση είναι ότι παρόλο που το εμβαδόν μετριέται σε pixels^2 , εδώ μεταφράζεται σε mm^2 πολλαπλασιάζοντας την αρχική τιμή με τον παράγοντα ($32 * 32 * 10^{-6}$) αφού το μήκος και το ύψος κάθε ρίxel έχει βρεθεί να αντιστοιχεί σε 32 μm . Τέλος, μετά την απεικόνιση των χαρακτηριστικών γίνεται η καταγραφή τους στο αντίστοιχο CSV αρχείο. Οι μεταβλητές που αποθηκεύονται φαίνονται στην Εικόνα 31.

```
{
  "timestamp": "timestamp",
  "layer_index": "number_of_layer",
  "loadcell": "current_loadcell_value",
  "melt_pool_area": "current_melt_pool_area",
  "laser_power": "laser_power_on_the_start",
  "wire_feed_rate": "wire_feed_rate_on_the_start",
  "robot_x": "robot_position_on_X-axis",
  "robot_y": "robot_position_on_Y-axis",
  "robot_z": "robot_position_on_Z-axis",
  "robot_speed": "robot_speed_on_the_start",
  "control_value": "values_for_PID_controller"
}
```

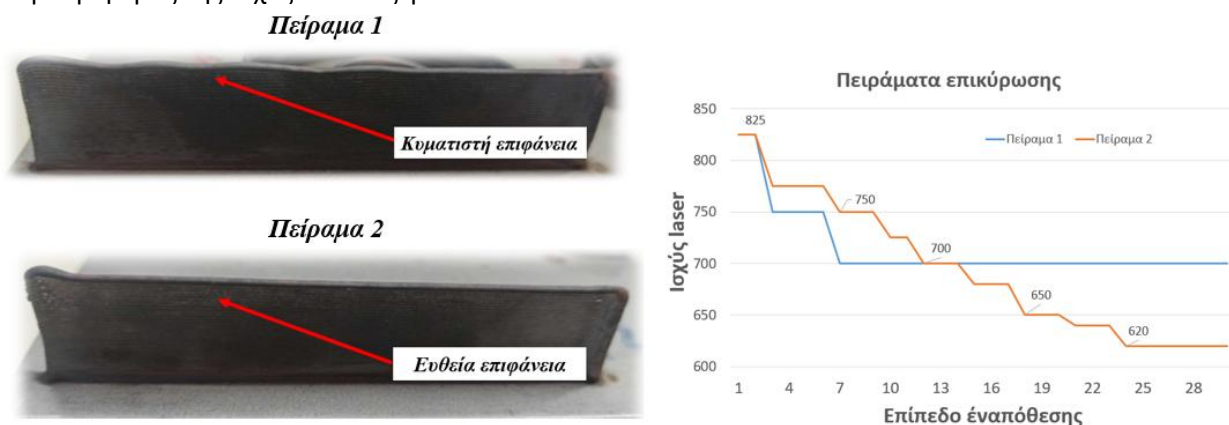
Εικόνα 31 Δεδομένα που καταγράφονται στο αρχείο CSV

Ο βρόγχος αυτός επαναλαμβάνεται έως ότου ενεργοποιηθεί στο Σήμα 4. Σε αυτή την περίπτωση, αλλάζει κατάσταση το Σήμα 2 και η εναπόθεση έχει τελειώσει για το συγκεκριμένο επίπεδο. Με την ενεργοποίηση του Σήμα 4 κλείνει ο φάκελος για το παρών επίπεδο εναπόθεσης και αρχίζει η αναμονή για το επόμενο επίπεδο. Ταυτόχρονα, στην περίπτωση που ο χρήστης έχει επιλέξει την χρήση του ελεγκτή της ισχύς των λέιζερ, γίνεται η εξαγωγή της μέσης τιμής του εμβαδού της περιοχής τηγμένου υλικού και η εύρεση της τιμής της ισχύς που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο επίπεδο ώστε να φτάσει το σύστημα σε ισορροπία. Σχετικά με τα μοντέλο μηχανικής μάθησης, τα δεδομένα τροφοδοτούνται ταυτόχρονα με την διεργασία και στην περίπτωση που βρεθεί κάποιο ελάττωμα δίνεται ως μήνυμα στο άνω δεξιό άκρο της οθόνης.

2.3.4.2 Πρώμη αξιολόγηση πλατφόρμας ποιοτικού ελέγχου και αποτελέσματα κανονικής λειτουργίας

Αφού δημιουργήθηκε η τελική πλατφόρμα, η δοκιμαστική φάση που είχε παρουσιαστεί στο Παραδοτέο 2.1 πραγματοποιήθηκε ξανά. Δύο πειράματα με τις παραμέτρους που παρουσιάστηκαν παραπάνω διενεργήθηκαν με την μόνη διαφορά να είναι στις τιμές της ισχύς των λέιζερ όπου στο πρώτο πείραμα, η ισχύς ξεκίνησε από τα 825 Watt και μειώθηκε μέχρι τα 700 Watt ενώ στο δεύτερο πείραμα η αρχική ισχύς παρέμεινε ίδια αλλά μειώθηκε σταδιακά μέχρι τα 620 Watt.

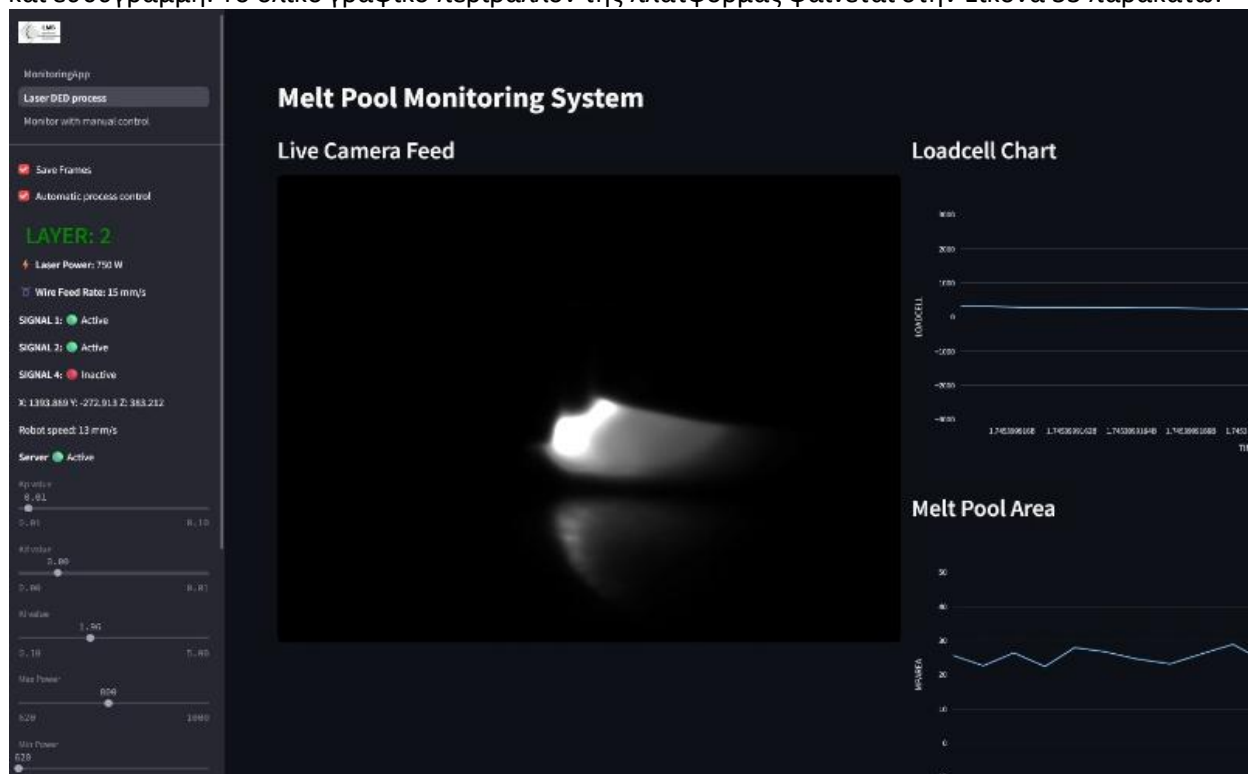
Στην Εικόνα 32 φαίνεται το φυσικό αποτέλεσμα των δύο πειραμάτων και τον γράφημα της συμπεριφοράς της ισχύς των λέιζερ.



Εικόνα 32 Πειράματα επικύρωσης του μοντέλου μηχανικής μάθησης

Στο πρώτο πείραμα, το μοντέλο κατάφερε να προβλέψει με ακρίβεια την εμφάνιση του φαινομένου του δορυφόρου. Όσον αφορά το φαινόμενο του stubbing, εντοπίστηκαν ενδείξεις προς το τελικό στάδιο της διεργασίας, συγκεκριμένα όταν η ισχύς έφτασε τα 700 Watt και μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Στο δεύτερο πείραμα, η πρόβλεψη για τα φαινόμενα δορυφόρου ήταν και πάλι επιτυχής. Ωστόσο, στην

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής περίπτωση του stubbing, το μοντέλο κατέγραψε ενδείξεις μόνο σε περιορισμένο εύρος ισχύος, μεταξύ 750 και 680 Watt. Αυτό υποδηλώνει πως, λόγω της σταδιακής μείωσης της ισχύος των laser, το φαινόμενο διορθώθηκε και τελικά εξαλείφθηκε. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται και από το φυσικό αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32 όπου στο πρώτο πείραμα, όπου το stubbing ήταν έντονο, παρατηρείται σημαντικός κυματισμός στην επιφάνεια, ενώ στο δεύτερο, η τελική επιφάνεια είναι εμφανώς πιο ομαλή και ευθύγραμμη. Το ολικό γραφικό περιβάλλον της πλατφόρμας φαίνεται στην Εικόνα 33 παρακάτω.



Εικόνα 33 Γραφικό περιβάλλον πλατφόρμας

Στο αριστερό μέρος της οθόνης φαίνονται οι παράμετροι του μηχανήματος Meltio, του ρομπότ αλλά και πληροφορίες της εργασίας όπως για παράδειγμα το επίπεδο που εναποτίθεται εκείνη την στιγμή όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 34.

2.3.5 Αναφορές

[1] Miedzinski, M. Materials for Additive Manufacturing by Direct Energy Deposition. 2017, Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology.

[2] Zapata, A.; Bernauer, C.; Stadter, C.; Kolb, C. G.; Zaeh, M. F. Investigation on the Cause-Effect Relationships between the Process Parameters and the Resulting Geometric Properties for Mechanical Engineering and Aeronautics Department - Manufacturing Sector Wire-Based Coaxial Laser Metal Deposition. Metals 2022.

[3] Stavropoulos, P.; Bikas, H.; Tzimanis, K.; Porevopoulos, N.; Pilagatti, A.N.; Atzeni, E.; Iuliano, L.; Salmi, A. Process window development of DED-LB/M process with coaxial wire for stainless steel AISI 316L. *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation* 2024, 7, 1–26. Published Online: April 29, 2024.



Εικόνα 34 Πληροφορίες και παράμετροι μηχανήματος

2.4 Λογισμικό για την δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης

Η παρούσα λύση προσφέρει ένα πλαίσιο δημιουργίας συνόλων δεδομένων μέσω μιας αλυσίδας εργαλείων προσομοίωσης. Το πλαίσιο χρησιμοποιείται για την δημιουργία συνθετικών εικόνων όπως π.χ. κατεργασμένων κομματιών και την εκμετάλλυσή τους από αλγορίθμους Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) με στόχο την εφαρμογή τους σε εφαρμογές οπτικής αναγνώρισης. Η μέθοδος και αλληλουχία παραγωγής συνθετικών δεδομένων και εκπαίδευσης μοντέλων TN θα ενσωματωθεί και προσφερθεί μέσω μιας ενοποιημένης πλατφόρμας.

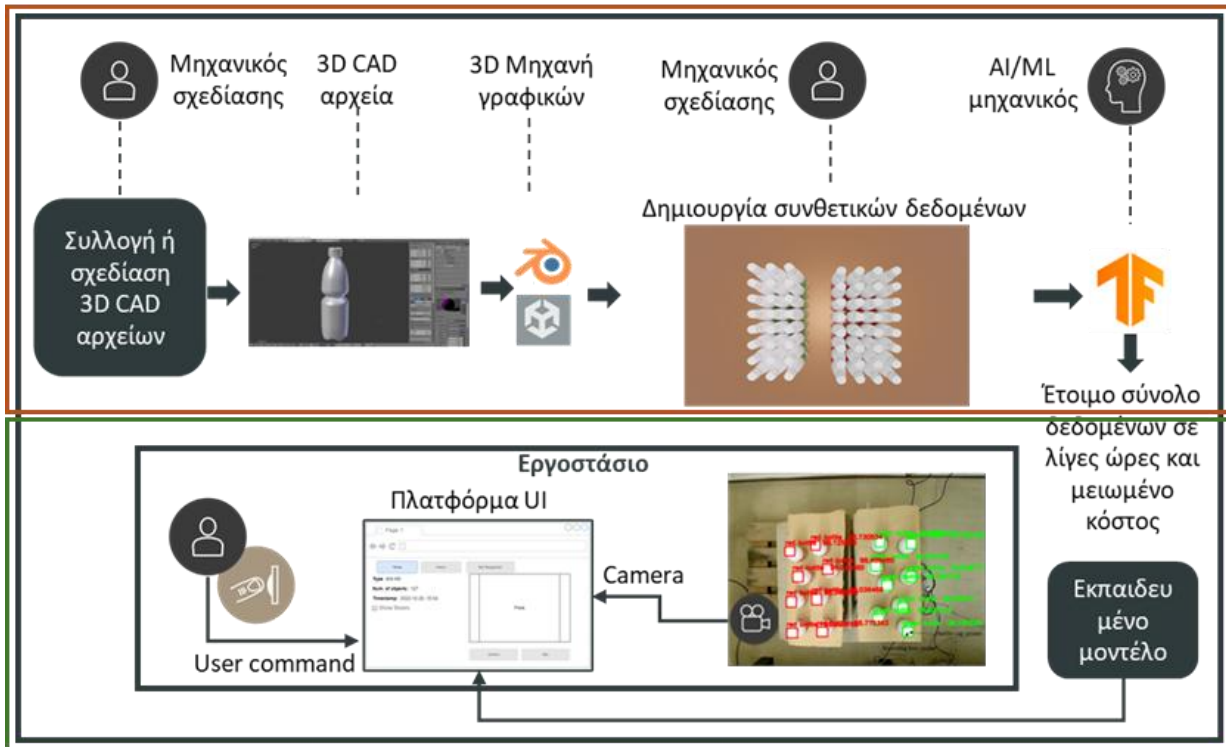
2.4.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Για την ανάπτυξη της εν λόγω λύσης, ο κύριος εταίρος (Εργαστήριο Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού – LMS) έχει συντάξει ένα πλάνο εργασιών ανάπτυξης. Όπως αναφέρεται παρακάτω, η λύση αναπτύσσεται γύρω από 9 κύριες ομάδες εργασίες οι οποίες αντιστοιχούν στις κάτωθι ενέργειες:

1. **Μοντελοποίηση εργαστηριακού σεναρίου σε Graphic Engine:** Η εν λόγω ενέργεια αφορά την ανάπτυξη κώδικα και λογισμικού με στόχο την αναπαράσταση ενός πραγματικού μηχανολογικού προβλήματος σε περιβάλλον προσομοίωσης (Graphic Engine).
2. **Τροποποίηση αλγορίθμου παραγωγής συνθετικών δεδομένων:** Ο υπάρχων αλγόριθμος παραγωγής συνθετικών δεδομένων (εικόνων) απαιτεί εξατομίκευση ώστε να προσεγγίζει το εν λόγω μηχανολογικό πρόβλημα.
3. **Παραγωγή συνθετικών εικόνων και εκπαίδευση αλγορίθμων TN:** Αξιοποίηση της αλληλουχίας παραγωγής συνθετικών δεδομένων με στόχο την δημιουργία συνθετικών εικόνων. Το παραγόμενο σύνολο δεδομένο θα εκμεταλλευτεί μετέπειτα από αλγορίθμους TN (Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα) ανοιχτού κώδικα με στόχο την εκπαίδευση και ανάπτυξη ενός λογισμικού αναγνώρισης προϊόντων.
4. **Πρώτη επαλήθευση αλγορίθμων TN:** Το παραγόμενο μοντέλο του προηγούμενου βήματος δοκιμάζεται αρχικά σε συνθετικά δεδομένα που δεν έχει ξανασυναντήσει κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του και προσεγγίζουν τον πραγματικό πιλότο.
5. **Βελτιώσεις αρχικής έκδοσης:** Τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος αξιολογούνται και επιβάλλονται μέτρα βελτίωσης των μοντέλων TN και των συνθετικών δεδομένων. Τέτοια μέτρα αφορούν την βελτιστοποίηση ρεαλισμού των δεδομένων με τροποποιήσεις του περιβάλλοντος προσομοίωσης ή εξατομίκευση των μοντέλων TN και των παραμέτρων εκπαίδευσης τους.
6. **Ανάπτυξη πλατφόρμας συνθετικής παραγωγής δεδομένων:** Ανάπτυξη μιας web πλατφόρμας που θα εμπεριέχει την μέθοδο παραγωγής συνθετικών δεδομένων και εκπαίδευσης μοντέλων TN. Σε αυτό το στάδιο στήνονται βασικές ανάγκες μιας web πλατφόρμας (στοιχεία αποθήκευσης, γενικό περιβάλλον χρήστη και ενδιάμεσα επίπεδα επικοινωνίας).
7. **Ενσωμάτωση αλγορίθμων TN στην πλατφόρμα και παραγωγή τελικής λύσης:** Οι αλγόριθμοι παραγωγής συνθετικών δεδομένων καθώς και αυτοί της εκπαίδευσης και αξιοποίησης μοντέλων TN με χρήση βιομηχανικών καμερών, ενσωματώνονται με την web πλατφόρμα, παράγοντας την τελική λύση.
8. **Νέα παραγωγή συνθετικών εικόνων και εκπαίδευση μοντέλων TN:** Η τελική έκδοση της λύσης δοκιμάζεται σε δεδομένα επαλήθευσης όπως αυτά του βήματος 4 και αξιολογείται η επιτυχία των βελτιωτικών κινήσεων.

Στην παρακάτω εικόνα προσφέρεται μια γενική επισκόπηση της λύσης και των δύο κυρίων φάσεων ανάπτυξης της. Η 1^η φάση καλύπτει τα προαναφερθέντα βήματα 1-4, ενώ η 2η φάση τα βήματα 5-8. Το κύριο κομμάτι ανάπτυξης κατά το πρώτο ήμισυ της ΕΕ2 για την παρούσα λύση αφοσιώνεται στην παραγωγή συνθετικών δεδομένων και την εκπαίδευση μοντέλων TN και παρουσιάστηκε στο παραδοτέο Π2.1. Στο παρόν παραδοτέο προσφέρεται μια ανασκόπηση των διαδικασιών υλοποίησης της 1^{ης} λύσης και ενδελεχής παρουσίαση των διαδικασιών υλοποίησης της 2^{ης} φάσης αναφορικά με την ανάπτυξη του περιβάλλοντος χρήστη και την βελτιστοποίηση της επίδοσης των αλγορίθμων TN.

1^η φάση ανάπτυξης



2^η φάση ανάπτυξης

Εικόνα 35 Παραστατική αρχιτεκτονική εφαρμογής συνθετικής παραγωγής δεδομένων

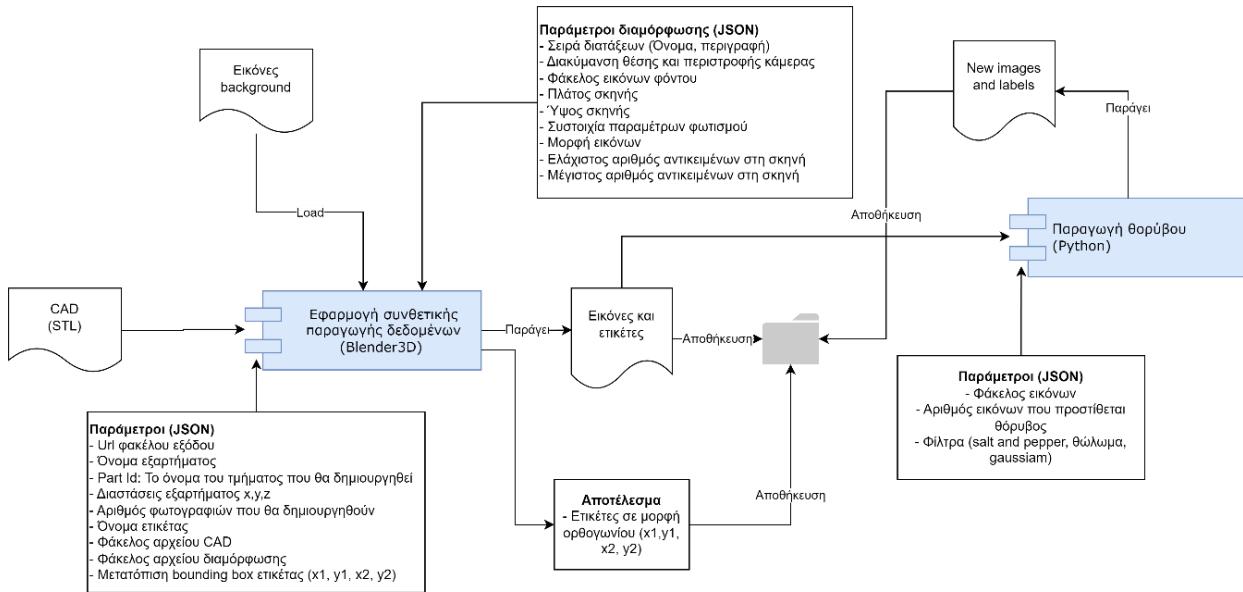
2.4.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η εφαρμογή παραγωγής συνθετικών δεδομένων απαρτίζει την βάση της λύσης, προσφέροντας στους τελικούς της χρήστες την δυνατότητα να προσομοιώσουν προβλήματα και αντικείμενα του πραγματικού κόσμου στον ψηφιακό και να τα απαθανατίσουν ψηφιακά με την μορφή συνθετικών εικόνων. Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 36) και η υλοποίηση της βασίζεται καθολικά στην γλώσσα ανοιχτού κώδικα Python, αρχεία ανοιχτού τύπου JSON και μια βάση δεδομένων τύπου SQL για την αποθήκευση των εισαγόμενων και εξαγόμενων στοιχείων. Τα στοιχεία εισόδου της εφαρμογής είναι ποικίλα και χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Τρισδιάστατα αρχεία σχεδίου των αντικειμένων (3D CAD): εισάγονται στην εφαρμογή (σε μορφή .stl - stereolithography) τα σχεδιαστικά αρχεία των αντικειμένων τα οποία επιθυμεί ο χρήστης να αναπαραστήσει.
- Εικόνες φόντου (background): εισάγονται εικόνες που θα πλαισιώσουν την ψηφιακή σκηνή και θα προσδώσουν ρεαλισμό στην συνθετική εικόνα.
- Στοιχεία αντικειμένων: απαιτείται μονάχα η πληροφορία ονομασίας του αντικειμένου και της ετικέτας τους. Λοιπά στοιχεία όπως διαστάσεις αντικειμένου στην σκηνή, μέγεθος ετικέτας (bounding box) κλπ. Υπολογίζονται αυτόματα.
- Στοιχεία παραγωγής εικόνων: Αφορά το σύνολο των στοιχείων που καθορίζουν την μορφή του συνόλου δεδομένων (αριθμός εικόνων, διαστάσεις σκηνής, παράμετροι ψηφιακής κάμερας, μορφή εικόνων, αριθμός αντικειμένων στην σκηνή κ.α.).
- Στοιχεία προσθήκης θορύβου: Η εφαρμογή δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να αυξήσουν το μέγεθος του dataset με τεχνικές data augmentation όπως την προσθήκη θορύβου. Ο χρήστης λοιπόν, θα έχει την δυνατότητα να επιλέγει παραμέτρους σχετικές όπως φίλτρα θορύβου και τον αριθμό εικόνων που θέλει να παράγει.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Τα παραπάνω στοιχεία μεταφέρονται στην εφαρμογή με μορφή JSON και θα εισάγονται από τον χρήστη μέσω του κεντρικού περιβάλλοντος χρήστη (User Interface) της ενοποιημένης πλατφόρμας. Κύριο αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός συνόλου συνθετικών εικόνων, καθώς και οι ετικέτες (bounding boxes) επισημάνσης τους, το οποίο θα ικανοποιεί τις πληροφορίες εισόδου του χρήστη. Το παραγόμενο σύνολο δεδομένων θα είναι απευθείας έτοιμο για εκπαίδευση από αλγόριθμους TN.

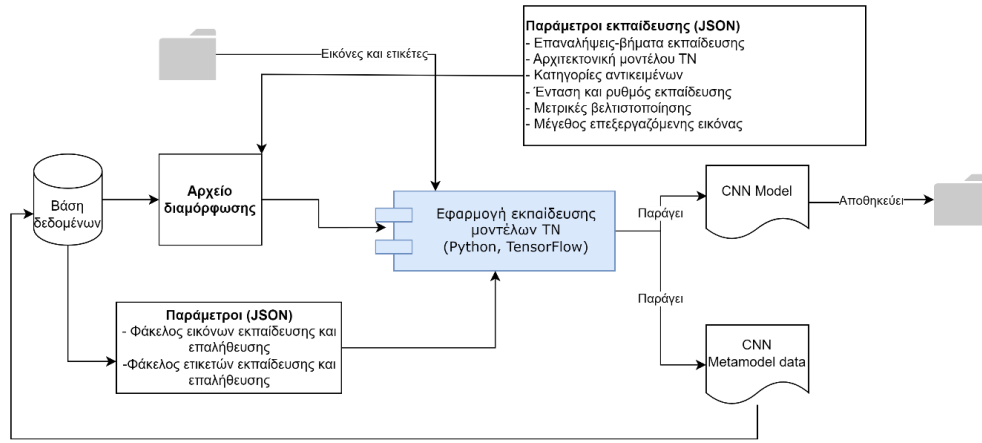


Εικόνα 36 Αρχιτεκτονική εφαρμογής παραγωγής συνθετικών δεδομένων

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 37) απεικονίζεται η αρχιτεκτονική της δεύτερης εφαρμογής που στεγάζει η πλατφόρμα της παρούσα λύσης. Η εν λόγω εφαρμογή αφορά την επιλογή, διαμόρφωση και εκπαίδευση μοντέλων TN και συγκεκριμένα Συνελκτικιών Νευρωνικών Δικτύων (CNNs). Η υλοποίηση της εφαρμογής βασίζεται στην βιβλιοθήκη TN της γλώσσας Python, TensorFlow ακολουθώντας κατά γράμμα τις οδηγίες και πρακτικές ανοικτού κώδικα που προσβλεύει. Η εφαρμογή απαιτεί ως είσοδο τα εξής στοιχεία:

- **Επιλογή μοντέλου:** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μέσα από μια ποικιλία προεπιλεγμένων CNNs.
- **Παράμετροι εκπαίδευσης:** η κατηγορία εμπεριέχει κύριες παραμέτρους εκπαίδευσης που πρέπει να ορίσει ο χρήστης για την σωστή εκπαίδευση των μοντέλων TN. Τέτοιες παράμετροι αφορούν τον αριθμό επαναλήψεων, στοιχεία αρχιτεκτονικής, κατηγορίες αντικειμένων (κλάσεις), ρυθμό εκπαίδευσης μετρικές βελτιστοποίησης και το μέγεθος εισαγωγής της εικόνας).
- **Δεδομένα εισόδου:** η κατηγορία εμπεριέχει ουσιαστικά το σύνολο συνθετικών εικόνων και τις ετικέτες επισημάνσης τους.
- Τα παραπάνω στοιχεία θα μεταφέρονται στην εφαρμογή με μορφή JSON και θα εισάγονται από τον χρήστη μέσω του κεντρικού περιβάλλοντος χρήστη (User Interface) της ενοποιημένης πλατφόρμας. Επιπλέον, θα υπάρχουν προεπιλεγμένες τιμές για αυτές τις παραμέτρους καθώς η επιλογή κάποιων από αυτές απαιτεί ιδιαίτερη εξειδίκευση στον τομέα της TN και μπορεί να δυσκολέψει τον χρήστη.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



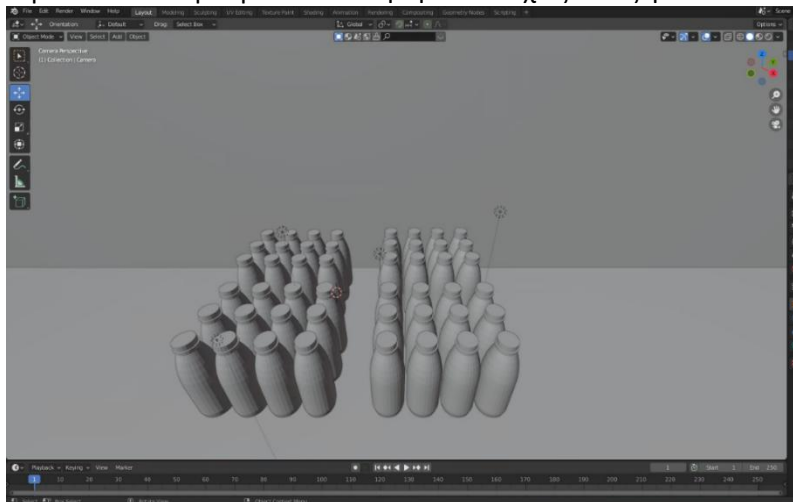
Εικόνα 37 Αρχιτεκτονική εφαρμογής εκπαίδευσης μοντέλων TN

2.4.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.4.3.1 Μοντελοποίηση εργαστηριακού σεναρίου

Πρώτο βήμα υλοποίησης της παρούσας λύσης αποτελεί η μοντελοποίηση πραγματικών αντικειμένων και συνθηκών σε γραφικό περιβάλλον. Για την ενέργεια αυτή προτιμήθηκε το περιβάλλον ανοιχτού κώδικα Blender3D, ένα από τα δημοφιλέστερα περιβάλλοντα στην επιστημονική κοινότητα λόγω της ευρείας παρεμβατικότητας που επιτρέπει. Η διαδικασία μοντελοποίησης σε πιλοτικό στάδιο ξεκινά με την δημιουργία μιας κενής σκηνής και την εισαγωγή κατ' εξακολούθηση των στοιχείων που την διαμορφώνουν όπως αντικείμενα, επίπεδα και εικόνες φόντου, χρώματα και υλικά. Η διαδικασία αυτή διενεργήθηκε μέσω του built-in Python API που προσφέρει το Blender3D και διαμορφώνεται μέσω του κεντρικού περιβάλλοντος χρήστη της πλατφόρμας καθιστώντας την διαδικασία πιο φιλική και βολική προς τους πελάτες της λύσης.

Ως παράδειγμα της μοντελοποίησης, το έργο ενασχολείται με μια πιλοτική εφαρμογή αναγνώρισης γαλακτοκομικών προϊόντων (με μορφή μπουκαλιών) με στόχο την οπτική τους αναγνώριση για θέματα ελέγχου ποιότητας και μεταφοράς μέσω ρομποτικών βραχιόνων. Τα μπουκάλια σε συνήθη περιπτώσεις βρίσκονται αρχικώς σε στοιχισμένες θέσεις και δεσμίδες ανάλογα με τον τύπο τους (συνήθως γεύση, ποιότητα κλπ.) Το παραπάνω σενάριο μοντελοποιήθηκε επιτυχώς όπως φαίνεται και στην Εικόνα 38.



Εικόνα 38 Μοντελοποίηση σκηνής στο γραφικό περιβάλλον Blender3D

2.4.3.2 Τροποποίηση αλγόριθμου παραγωγής συνθετικών δεδομένων

Η παραγωγή συνθετικών δεδομένων για να είναι αποδοτική και βολική, απαιτεί την αυτοματοποίηση αρκετών βημάτων και παραμέτρων. Σύμφωνα και με την Εικόνα 36, οι παράμετροι δημιουργίας συνθετικών δεδομένων, πρέπει να ορίζονται με τυπικό και αυτοματοποιημένο τρόπο. Για την εκτέλεση

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής της παραπάνω εργασίας, ο αναπτυξιακός εταίρος χρησιμοποίησε το built-in Python API του Blender3D. Η ανάπτυξη του εν λόγω στοιχείου αφορά την εισαγωγή των παραμέτρων παραγωγής του σύνολου δεδομένων όπως:

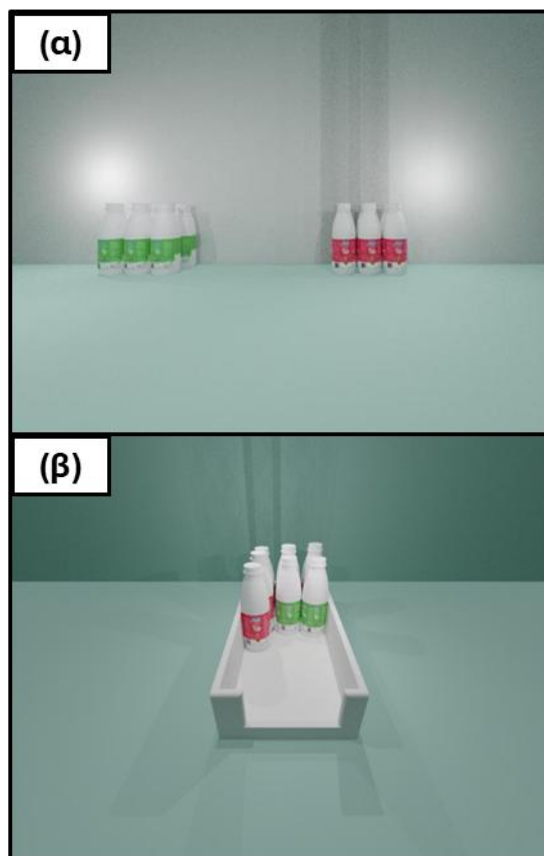
- Στοιχεία παραγωγής εικόνων: αριθμός εικόνων, διαστάσεις σκηνής, παράμετροι ψηφιακής κάμερας, μορφή εικόνων, αριθμός αντικειμένων στην σκηνή κ.α.
- Στοιχεία προσθήκης θορύβου (φίλτρα θορύβου και τον αριθμό εικόνων)
- Στοιχεία περιβάλλοντος (φόντο, φωτισμός κλπ.)

Σημαντικό κομμάτι της υλοποίησης του αλγόριθμου παραγωγής συνθετικών δεδομένων, είναι η παραμετροποίηση των παραπάνω στοιχείων ώστε να είναι εύκολα μεταβαλλόμενα από τον χρήστη τόσο σε θέματα εξατομίκευσης όσο και συμβατότητας. Η εξατομίκευση της τρισδιάστατης ψηφιακής σκηνής είναι απαραίτητη για την γενίκευση της εφαρμογής και την δυνατότητα ικανοποίησης πολλαπλών πιλοτικών εφαρμογών σε εμπορικό στάδιο. Ως συνέπεια, ο αλγόριθμος παραγωγής συνθετικών δεδομένων τροποποιήθηκε ώστε να λαμβάνει τιμές για τις εκάστοτε παραμέτρους εκπαίδευσης, χρησιμοποιώντας αρχεία τύπου JSON. Συγκεκριμένες παράμετροι και ενδεικτικές τιμές πάνω σε μια πρώτη, δοκιμαστική πιλοτική εφαρμογή παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

2.4.3.3 Παραγωγή συνθετικών εικόνων και εκπαίδευση αλγορίθμων TN

Στο πλαίσιο των ενεργειών βελτίωσης του Βήματος 5, δόθηκε έμφαση στην ενίσχυση του ρεαλισμού των παραγόμενων συνθετικών εικόνων, καθώς και στον εμπλουτισμό των σεναρίων που υποστηρίζονται από το σύστημα. Οι σχετικές βελτιώσεις στόχευσαν στην ενίσχυση της ποικιλίας, της ακρίβειας και της πρακτικής συνάφειας των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση και αξιολόγηση των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οι εξής παρεμβάσεις:

- Εστίαση στην αναγνώριση αντικειμένων πρώτης σειράς, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας σε σεναρία όπου μόνο τα προσκείμενα αντικείμενα είναι σχετικά προς ανάλυση.
- Επέκταση της δυνατότητας αναγνώρισης έως και 100 αντικειμένων σε μία μόνο εικόνα, ενισχύοντας την καταλληλότητα του συστήματος για πολύπλοκες σκηνές υψηλής πυκνότητας.
- Αύξηση του ρεαλισμού των παραγόμενων εικόνων, μέσω βελτιώσεων στο φωτισμό, την υφή, τις σκιές και τη σύνθεση των σκηνών προσομοίωσης, με στόχο την καλύτερη προσομοίωση πραγματικών συνθηκών παραγωγής.
- Προσθήκη δυνατότητας αναγνώρισης τύπου προϊόντων, επιτρέποντας όχι μόνο την ανίχνευση παρουσίας αντικειμένων, αλλά και την ταξινόμησή τους ανά κατηγορία ή ιδιότητα.
- Δημιουργία εικόνων σε μορφή παλέτας, προσφέροντας εναλλακτικές διατάξεις παρουσίασης προϊόντων, που προσεγγίζουν συγκεκριμένες βιομηχανικές ή εμπορικές εφαρμογές.



Εικόνα 39 Βελτιώσεις συνθετικών δεδομένων: α) Εστίαση στην αναγνώριση αντικειμένων πρώτης σειράς, β) Προσομοίωση πραγματικών συνθηκών παραγωγής

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Οι παραπάνω βελτιώσεις ενίσχυσαν τη χρησιμότητα και την ευελιξία της πλατφόρμας παραγωγής συνθετικών δεδομένων, καθιστώντας την πιο ικανή να υποστηρίξει διαφορετικά σενάρια χρήσης και ανάγκες μοντελοποίησης στον τομέα της μηχανικής όρασης.

2.4.3.4 Πρώτη επαλήθευση αλγορίθμων TN και βελτιώσεις επίδοσης αυτών

Δοκιμή και σύγκριση διαφόρων μοντέλων TN

Στο πλαίσιο των βελτιώσεων της αρχικής έκδοσης, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων αρχιτεκτονικών μοντέλων ανίχνευσης αντικειμένων με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης τόσο σε όρους ταχύτητας όσο και ακρίβειας. Συγκρίθηκαν 4 Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks – CNNs) με διαφορετικά πλεονεκτήματα όπως εξάγεται από τον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 1). Τα μοντέλα εκπαιδεύτηκαν με το ίδιο σύνολο συνθετικών δεδομένων όπως αυτά παράχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο και αξιολογήθηκαν σε ίδιες συνθήκες.

Πίνακας 1: Δοκιμή και σύγκριση διαφόρων μοντέλων TN

Μοντέλο	Ανιχνευμένα αντικείμενα	Χρόνος ανίχνευσης	Χρόνος εκπαίδευσης
SSD ResNet101 V1 FPN 1024x1024	42/42	112ms	1,5 ώρα
Faster R-CNN ResNet152 V1 1024x1024	42/42	320ms	1,5 ώρα
EfficientDet D4 1024x1024	42/42	118ms	2 ώρες
YOLOv9	42/42	65ms	1 ώρα

Όλα τα μοντέλα κατέγραψαν επιτυχία 100% στην ανίχνευση του συνόλου των αντικειμένων (42/42), υποδεικνύοντας ότι τα δεδομένα εκπαίδευσης ήταν κατάλληλα και επαρκώς παραμετροποιημένα. Ωστόσο, προέκυψαν διαφορές στον χρόνο ανίχνευσης και στον απαιτούμενο χρόνο εκπαίδευσης:

- Το μοντέλο YOLOv9 επέδειξε την ταχύτερη απόκριση (65ms) με τον μικρότερο χρόνο εκπαίδευσης (1 ώρα), καθιστώντας το ιδιαίτερα αποδοτικό για εφαρμογές με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου.
- Το μοντέλο EfficientDet D4 προσέφερε πολύ καλή ισορροπία μεταξύ ταχύτητας (118ms) και ακρίβειας, ωστόσο απαιτούσε περισσότερο χρόνο εκπαίδευσης (2 ώρες).
- Το μοντέλο SSD ResNet101 V1 FPN σημείωσε μέτρια απόδοση σε χρόνο ανίχνευσης (112ms) με επίσης σύντομο χρόνο εκπαίδευσης (1,5 ώρα).
- Το μοντέλο Faster R-CNN ResNet152 V1 παρότι εξίσου ακριβές, ήταν σημαντικά βραδύτερο (320ms), γεγονός που το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο.

2.4.3.5 Βελτιστοποίηση παραμέτρων εκπαίδευσης μοντέλου TN

Στο πλαίσιο της περαιτέρω βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος αναγνώρισης, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων με στόχο τη βελτιστοποίηση των υπερπαραμέτρων (hyperparameters) εκπαίδευσης του μοντέλου TN. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, εξετάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί βασικών παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την ταχύτητα σύγκλισης, τη γενίκευση και την ακρίβεια του μοντέλου. Οι δοκιμές περιλάμβαναν μεταβολές στο μέγεθος των παρτίδων (batch size), στον ρυθμό εκμάθησης (learning rate), στον αριθμό επαναλήψεων εκπαίδευσης (epochs), καθώς και στην επιλογή του βελτιστοποιητή (optimizer). Παράλληλα, αξιολογήθηκε η επίδραση της χρήσης ή μη τεχνικών επέκτασης δεδομένων (data augmentation), καθώς και η εφαρμογή διαφορετικών τιμών για τη μείωση των συντελεστών βαρύτητας (weight decay), η οποία επηρεάζει την ικανότητα γενίκευσης του μοντέλου. Το σύνολο των πειραμάτων και οι αντίστοιχες τιμές των υπερπαραμέτρων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Βελτιστοποίηση παραμέτρων εκπαίδευσης μοντέλου TN

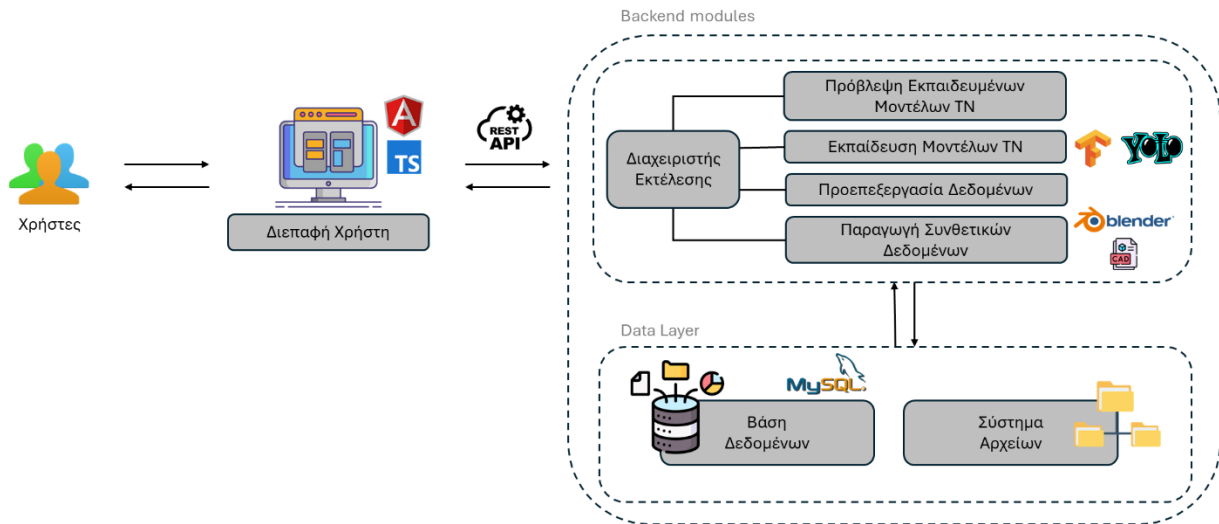
Παράμετρος	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3
Μέγεθος παρτίδας	32	16	8
Ρυθμός εκπαίδευσης	0.01	0.001	0.005
Επαναλήψεις εκπαίδευσης	75	200	100
Επέκταση συνόλου δεδομένων	Yes	No	Yes
Μείωση συντελεστών βαρύτητας	0.0001	0.0005	0.0001

Βελτιστοποιητής	SGD	Adam	Adam
-----------------	-----	------	------

Και οι τρεις δοκιμές απέδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια ανίχνευσης. Ωστόσο, η Δοκιμή 3 αναδείχθηκε ως η πλέον αποδοτική, προσφέροντας τον καλύτερο συνδυασμό ταχύτητας και ακρίβειας. Η ισορροπία μεταξύ παραμέτρων όπως η μέτρια τιμή ρυθμού εκμάθησης, η χρήση data augmentation και η επιλογή κατάλληλου βελτιστοποιητή συνέβαλαν καθοριστικά στη σταθερή και αποτελεσματική εκπαίδευση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα αυτής της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν για την τελική παραμετροποίηση του συστήματος, ενισχύοντας περαιτέρω την απόδοσή του σε συνθήκες κοντά στην πραγματική εφαρμογή.

2.4.3.6 Ανάπτυξη πλατφόρμας συνθετικής παραγωγής δεδομένων

Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας (βλ. Εικόνα 40) ακολουθεί μία modular και επεκτάσιμη προσέγγιση, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών υπομονάδων.



Εικόνα 40 Αρχιτεκτονική πλατφόρμας

- **Διεπαφή Χρήστη:** Υλοποιήθηκε με Angular και TypeScript, προσφέροντας ένα διαδικτυακό περιβάλλον για τον καθορισμό εργασιών και την παρακολούθηση της εκτέλεσής τους. Η επικοινωνία με το backend γίνεται μέσω RESTful APIs, διασφαλίζοντας την ομαλή ανταλλαγή δεδομένων και τον έλεγχο ροής.
- **Διαχειριστής Εκτέλεσης:** Αποτελεί τον κεντρικό συντονιστή, υπεύθυνο για τη διαχείριση των backend διεργασιών. Οργανώνει την εκτέλεση των εργασιών, εξασφαλίζοντας ότι όλα τα modules εκτελούνται με τη σωστή σειρά.
- **Δημιουργία Συνθετικών Δεδομένων:** Επικοινωνεί με την μηχανή 3D Blender και το Python API της, επιτρέποντας τη δημιουργία σκηνών, την προσομοίωση προβλημάτων, την παραγωγή εικόνων και την επισήμανσή τους.
- **Προεπεξεργασία Δεδομένων:** Επικοινωνεί με Python scripts που εκτελούν βασικά βήματα προετοιμασίας, όπως διαχωρισμό δεδομένων, μετατροπή μορφής δεδομένων και εμπλουτισμό σετ δεδομένων (data augmentation).
- **Εκπαίδευση Μοντέλων TN:** Χρησιμοποιεί frameworks μηχανικής μάθησης (TensorFlow, YOLO κλπ.) για την εκπαίδευση μοντέλων TN στα συνθετικά δεδομένα. Περιλαμβάνει εργαλεία ρύθμισης παραμέτρων, αποθήκευσης εκπαιδευμένων μοντέλων και παρακολούθησης της προόδου εκπαίδευσης.
- **Πρόβλεψη Εκπαιδευμένων Μοντέλων TN:** Χρησιμοποιεί τα εκπαιδευμένα μοντέλα για την επεξεργασία νέων δεδομένων και την πραγματοποίηση προβλέψεων. Υποστηρίζει τις αρχιτεκτονικές YOLO και TensorFlow και φροντίζει είτε για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στη διεπαφή χρήστη είτε για την αποθήκευσή τους για περαιτέρω ανάλυση.

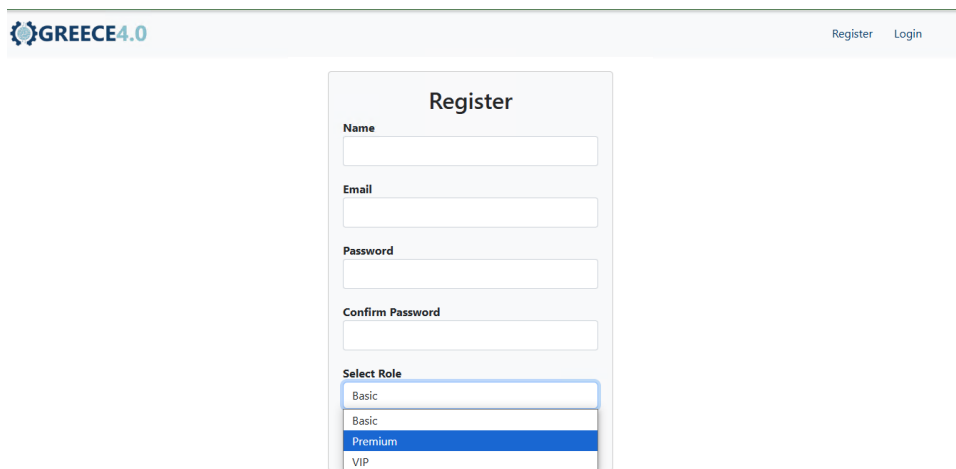
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- **Βάση Δεδομένων:** Υλοποιήθηκε με MySQL και παρέχει δομημένη και μόνιμη αποθήκευση δεδομένων, διαχειριζόμενη τις εισροές των χρηστών, τις ρυθμίσεις και τα αποτελέσματα.
- **Σύστημα Αρχείων:** Φιλοξενεί μη δομημένα δεδομένα, όπως πρωτογενείς εικόνες, συνθετικά δεδομένα, αρχεία εκπαιδευμένων μοντέλων και αποτελέσματα, υποστηρίζοντας τις αναγκαίες λειτουργίες ανάγνωσης και εγγραφής για όλα τα modules.

2.4.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

2.4.4.1 Τελική έκδοση λογισμικού

Όλα τα modules τα οποία περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες συνθέτουν μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα, η οποία δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να εκμεταλλευτεί πλήρως τη λειτουργικότητα του framework. Η πλατφόρμα υποστηρίζει τρεις διαφορετικούς τύπους χρηστών: (α) Basic User, (β) Premium User και (γ) VIP User, προσφέροντας διαφορετικά επίπεδα πρόσβασης ανάλογα με το προφίλ του καθενός. Για να χρησιμοποιήσει την πλατφόρμα, ο χρήστης πρέπει πρώτα να εγγραφεί επιλέγοντας τον τύπο χρήστη που επιθυμεί χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41 Εγγραφή νέου χρήστη στην πλατφόρμα και επιλογή τύπου χρήστη

Ο χρήστης μπορεί, μέσα από ένα ευέλικτο μενού, να επιλέξει την εργασία που θέλει να πραγματοποιήσει: παραγωγή συνθετικών δεδομένων, εκπαίδευση μοντέλου TN σε υπάρχον dataset, πλοήγηση στα υπάρχοντα datasets, ή πραγματοποίηση προβλέψεων με ήδη εκπαιδευμένα μοντέλα. Ανεξάρτητα από την επιλογή, ο χρήστης καλείται να δημιουργήσει ή να επιλέξει ένα περιβάλλον εργασίας (βλ. Εικόνα 42), το οποίο αποτελεί το σημείο αναφοράς για την εκτέλεση όλων των βημάτων.

Εικόνα 42 Επιλογή περιβάλλοντος εργασίας

Στην περίπτωση επιλογής παραγωγής συνθετικών δεδομένων, η πλατφόρμα καθοδηγεί τον χρήστη, ώστε να επιλέξει τις κατάλληλες παραμέτρους και να προσαρμόσει τα δεδομένα στις απαιτήσεις της εργασίας του. Προσφέρονται δυνατότητες για καθορισμό τύπων αντικειμένων, σκηνών, συνθηκών φωτισμού και άλλων κρίσιμων παραμέτρων (βλ. Εικόνα 43).

Εικόνα 43 Επιλογή παραμέτρων για την δημιουργία συνθετικών εικόνων

Η εκπαίδευση μοντέλων ΤΝ υποστηρίζεται με πληθώρα εργαλείων παραμετροποίησης, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να καθορίσει υπερπαραμέτρους όπως ρυθμό μάθησης, αριθμό εποχών, επιλογή τύπου μοντέλου (π.χ. YOLO, TensorFlow-based) και άλλες ρυθμίσεις, ώστε η διαδικασία εκπαίδευσης να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις κάθε έργου.

Εικόνα 44 Επιλογή σετ δεδομένων, μοντέλου TN και υπερπαραμέτρων για την εκπαίδευση ενός μοντέλου TN

Η πλατφόρμα παρέχει ακόμη τη δυνατότητα για πραγματοποίηση προβλέψεων χρησιμοποιώντας τα εκπαιδευμένα μοντέλα. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον τύπο οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων (όπως bounding boxes ή σημεία ανίχνευσης) καθώς και το επίπεδο αυστηρότητας των προβλέψεων, προσαρμόζοντας την ακρίβεια σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Τέλος, μέσω της επιλογής πλοήγησης στα datasets, ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε όλα τα υπάρχοντα datasets τα οποία έχουν δημιουργηθεί ή εισαχθεί στην πλατφόρμα, διευκολύνοντας την αξιοποίησή τους για νέες εργασίες.

2.4.4.2 Πρώιμη αξιολόγηση πλατφόρμας ποιοτικού ελέγχου και αποτελέσματα κανονικής λειτουργίας

Η μέχρι τώρα πρόοδος της λύσης αξιολογήθηκε ήδη από τα μέσα της ΕΕ2. Αυτό συνέβη με την προκαταρκτική ενασχόληση με την παραγωγή συνθετικών δεδομένων και εκπαίδευση μοντέλων TN για ένα απλό προκαταρκτικό σενάριο εφαρμογής. Σύμφωνα και με την Εικόνα 38, το έργο ενασχολείται με την πιλοτική οπτική αναγνώριση γαλακτοκομικών προϊόντων (με μορφή μπουκαλιών) σε θέματα ελέγχου ποιότητας και μεταφοράς μέσω ρομποτικών βραχιόνων. Η πιλοτική εφαρμογή αφορά την αναγνώριση ενός αριθμού μπουκαλιών και την εκτίμηση του αριθμού τους. Ως εκ τούτου, ορίστηκε μια κλάση αντικειμένων με όνομα «bottle». Ο αριθμός αντικειμένων της ψηφιακής σκηνής κυμάνθηκε από 0-100 αντικείμενα κατά την διαδικασία παραγωγής εικόνων, ενώ τα αντικείμενα χωρίστηκαν σε δύο κύριες παρτίδες όπως αντιπροσωπεύει και η Εικόνα 38. Η παραμετροποίηση της παραγωγής εικόνων (ομάδα Α) βασίστηκε κυρίως: α) στην τυχαιοποίηση της θέσης των αντικειμένων στο καρτεσιανό σύστημα, β) στην τυχαιοποίηση της θέσης της κάμερας που απαθανατίζει την ψηφιακή εικόνα, γ) στην διακύμανση του αριθμού αντικειμένων και δ) στην διακύμανση του φωτισμού των αντικειμένων από. Άλλες παράμετροι διαφοροποίησης των παραγόμενων εικόνων που εξετάστηκαν σε μικρότερο βαθμό είναι η επιλογή διαφόρων φόντων (background) και η επιλογή υλικού (προτιμήθηκε το πλαστικό χρώματος λευκού). Με την επιλογή αυτών των παραμέτρων και την εφαρμογή του αλγορίθμου παραγωγής συνθετικών δεδομένων (βλ. Εικόνα 36), δημιουργείται η ψηφιακή σκηνή της Εικόνα 38 χωρίς καμία απολύτως παρέμβαση με το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Blender3D.

Στην δεύτερη κατηγορία παραμέτρων (ομάδα Β) ανήκουν οι παράμετροι παραγωγής που σχετίζονται με την χρήση των δεδομένων για εκπαίδευση μοντέλων TN και είναι οι ακόλουθες: α) Αριθμός ανιχνεύσιμων αντικειμένων (δίνεται επιλογή στον χρήστη να επιλέξει αν θέλει όλα τα ορατά αντικείμενα να ανιχνεύονται από τον αλγόριθμο TN), β) Επιφάνεια ανίχνευσης αντικειμένου (δίνεται επιλογή στον χρήστη να επιλέξει ποια επιφάνεια/όγκος του αντικειμένου να ανιχνεύεται), γ) ανάλυση εικόνας η οποία

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής εδώ επιλέχθηκε σε μέγεθος 900x675 pixels, δ) αριθμός παραγόμενων εικόνων ο οποίος επιλέχθηκε σε αριθμό 2200 εικόνων.

Πίνακας 3: Παράμετροι παραγωγής συνθετικών εικόνων

Ομάδα	Παράμετρος	Περιγραφή
A	Αριθμός κλάσεων	1
	Αριθμός αντικειμένων	0-100
	Αριθμός παρτίδων	2 (μια παρτίδα ανά διαφορετικό τύπο μπουκαλιών)
	Παραμετροποίηση θέσης	Τυχαιοποίηση θέσης στο καρτεσιανό σύστημα
	Επιλογή φόντου	Τυχαία επιλογή από την βιβλιοθήκη του Blender
	Επιλογή υλικού	Λευκό πλαστικό
	Ρύθμιση φωτισμού	+/- 50% από τον φυσικό φωτισμό
B	Ρύθμιση κάμερας	Τυχαιοποίηση θέσης στο καρτεσιανό σύστημα κατά ποσοστό +/- 30% από την βέλτιστη θέση
	Ανιχνεύσιμα αντικείμενα στην σκηνή	Όλα τα μπουκάλια
	Ανιχνεύσιμη επιφάνεια κάθε αντικειμένου	Το πάνω μέρος (καπάκι του μπουκαλιού)
	Τύπος ετικετών	Ανίχνευση αντικειμένων (YOLO)
	Ανάλυση εικόνων	900x675
	Αριθμός εικόνων	2200

Με την χρήση του αλγορίθμου που βασίστηκε στην αρχιτεκτονική της Εικόνα 36, και τις παραμέτρους του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3), παράχθηκε ένας πλήρες σύνολο συνθετικών εικόνων μαζί με τις ετικέτες επισήμανσης των αντικειμένων, οι οποίες θα χρησιμεύσουν κατά την εκπαίδευση του μοντέλου TN που ακολουθεί.

Η προσέγγιση της παρούσας λύσης εκμεταλλεύεται Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNN), τα οποία αποτελούν την πλέον προηγμένη τεχνολογία για την οπτική αναγνώριση αντικειμένων και συναφείς εφαρμογές. Το συνθετικό σύνολο δεδομένων που δημιουργήθηκε, θα χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση ενός τέτοιου μοντέλου TN, με τις παραμέτρους εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν να παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Με βάση τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε το μοντέλο YOLO v9 (βλ. ενότητα 2.4.3.4). Για την εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η ολότητα του συνόλου δεδομένων, με τα δεδομένα να χωρίζονται κατά ποσοστό 80/20% σε δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης. Η συνολική διάρκεια της εκπαίδευσης τέθηκε στα 150 epochs (1,5 ώρα) ενώ σε κάθε βήμα πραγματοποιείται προσπέλαση όλων των εικόνων εκπαίδευσης, εισερχόμενες σε παρτίδες (batches) των 16. Η ανάλυση εκπαίδευσης των εικόνων διέφερε με αυτήν της φυσικής τους ανάλυσης και τέθηκε στα 480x480 pixels για ταχύτερη εκπαίδευση και χαμηλότερες υπολογιστικές ανάγκες.

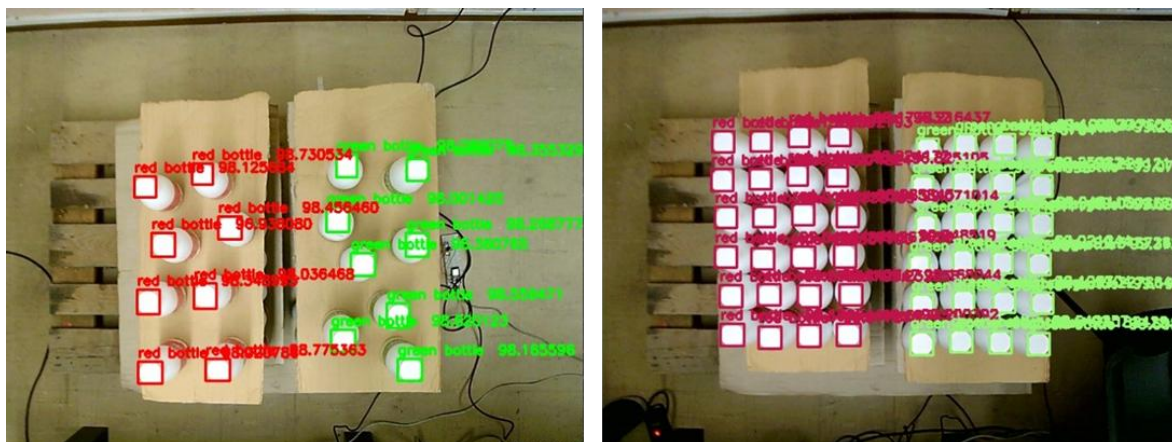
Πίνακας 4: Παράμετροι εκπαίδευσης Συνελικτικού Νευρωνικού Δικτύου

Παράμετρος	Τιμή
Μοντέλο CNN	YOLOv9
Αριθμός εικόνων ανά δέσμη εκπαίδευσης	16
Μέγεθος εισαγωγής εικόνας (pixels)	480x480
Ρυθμός εκπαίδευσης	0.00013
Συνολική διάρκεια/αριθμός εποχών εκπαίδευσης	100
Διαχωρισμός συνόλου δεδομένων (εκπαίδευσης και επαλήθευσης)	90/10

Αποτέλεσμα της φάσης εκπαίδευσης είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο CNN το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για οπτική αναγνώριση αντικειμένων μέσω ενός απλού αλγορίθμου, ο οποίος αναπτύχθηκε σε γλώσσα ανοιχτού κώδικα Python. Το εκπαιδευμένο μοντέλο αξιολογήθηκε σε πραγματικές εικόνες. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθώς και στις τρεις δοκιμές το μοντέλο εντόπισε με επιτυχία όλα τα αντικείμενα. Η ταχύτητα ανίχνευσης ήταν ικανοποιητική και ευθυγραμμίζεται με τις απαιτήσεις των βιομηχανικών εφαρμογών για ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο, ενώ και ο σχεδιασμός των bounding boxes παρουσίασε υψηλή ακρίβεια. Αναλυτικά τα αποτελέσματα σε κάθε δοκιμή φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμών εκπαιδευμένου μοντέλου σε πραγματικές εικόνες

Δοκιμή	Ανιχνευμένα Αντικείμενα	Χρόνος ανίχνευσης	Mean Intersection over Union
1	58/58	65ms	80%
2	15/15	65ms	95%
3	42/42	65ms	85%



Εικόνα 45 Ανίχνευση αντικειμένων σε πραγματική εικόνα

2.5 Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Εξοπλισμού στην Βιομηχανία 4.0

2.5.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η ανάπτυξη της λύσης έχει σχεδιαστεί και αναλυθεί σε επτά διακριτά στάδια υλοποίησης, με στόχο τη συστηματική οργάνωση της διαδικασίας ανάπτυξης σε σαφώς ορισμένα βήματα. Αρχικά, πραγματοποιείται η δημιουργία της πειραματικής υποδομής με χρήση βιομηχανικού εξοπλισμού, που περιλαμβάνει τη συλλογή και την αρχική εγκατάσταση του απαιτούμενου υλικού και των απαραίτητων αισθητήρων. Στη συνέχεια, η υποδομή διασυνδέεται με το υποσύστημα IoT μέσω της ανάπτυξης και του ελέγχου υπηρεσιών που επιτρέπουν τη διασύνδεση των αισθητήρων με την υπό ανάπτυξη λύση. Ακολουθεί η δημιουργία νέων βάσεων δεδομένων και αποθετηρίων για την αποθήκευση αρχείων και πληροφοριών που προκύπτουν από τη συλλογή δεδομένων. Στο επόμενο στάδιο εκτελούνται προσομοιώσεις, με την ενεργοποίηση λειτουργιών πάνω στα συλλεγόμενα δεδομένα. Έπειτα, πραγματοποιείται η εκπαίδευση των μοντέλων μηχανικής μάθησης της λύσης, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Ακολουθεί η εκτέλεση δοκιμαστικών σεναρίων μέσω της ολοκληρωμένης λύσης, με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργικότητάς της. Τέλος, η τελική λύση βελτιστοποιείται μέσω επανεξέτασης των αποτελεσμάτων και της διεπαφής, με στόχο τον εντοπισμό και τον σχεδιασμό των βέλτιστων δυνατών λειτουργιών.

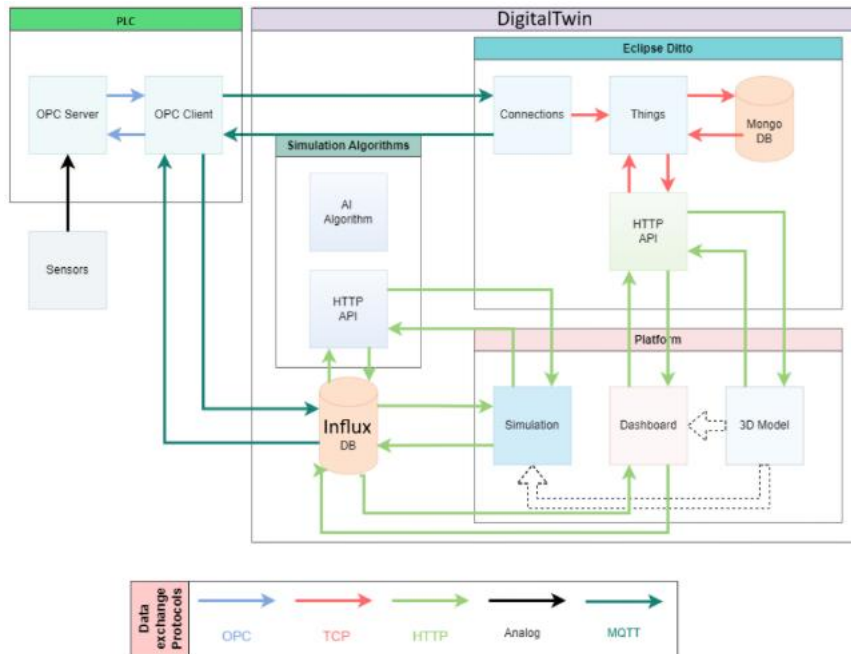
2.5.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της παρούσας λύσης μπορεί να συνοψιστεί μέσα από δύο διαγράμματα τα οποία περιγράφουν τόσο τα δομικά μέρη της αρχιτεκτονικής του υπό ανάπτυξη συστήματος όσο και την ροή πληροφορίας μεταξύ των υπό-συστημάτων που το συνθέτουν. Τα τέσσερα βασικά στοιχεία που συνθέτουν τη παραπάνω αρχιτεκτονική είναι τα εξής:

1. **Backend - Eclipse Ditto:** Αποτελεί ένα open-source project του Eclipse Foundation το οποίο επιτρέπει τη διαχείριση ψηφιακών διδύμων (digital twins) για συνδεδεμένες συσκευές στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Οι κύριες λειτουργίες του περιλαμβάνουν τη διαχείριση ψηφιακών διδύμων, συγχρονισμό δεδομένων, ενσωμάτωση και προσαρμογή IoT συσκευών, τη διαχείριση πολιτικών πρόσβασης καθώς και τη διασύνδεση υπηρεσίες Cloud. Σκοπός χρήσης του είναι η μείωση της πολυπλοκότητας διαχείρισης IoT δεδομένων, ο real-time συγχρονισμός φυσικών και ψηφιακών αντικειμένων καθώς και η διευκόλυνση ανάπτυξης λύσεων για μεγάλης κλίμακας εφαρμογών στο χώρο του IoT.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

2. **Frontend:** Η πλατφόρμα διαθέτει έναν δυναμικό και φιλικό προς τον χρήστη πίνακα ελέγχου, ο οποίος επιτρέπει την οπτική απεικόνιση και ανάλυση των δεδομένων που προέρχονται από το backend. Σχεδιασμένος με γνώμονα την αμεσότητα και την ευχρηστία, ο πίνακας προσφέρει μια διαδραστική εμπειρία, διευκολύνοντας τους χρήστες να κατανοούν και να αξιοποιούν τις πληροφορίες με αποτελεσματικό τρόπο.
3. **Simulation AI Backend:** Λειτουργεί ως ο κινητήρας ανάλυσης του Eclipse Ditto, επιτρέποντας την εκτέλεση προσομοιώσεων και την ενσωμάτωση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Μέσω της στενής διασύνδεσης του με το backend του Ditto, παρέχει προηγμένες δυνατότητες πρόβλεψης και ανάλυσης, αξιοποιώντας τόσο δεδομένα σε πραγματικό χρόνο όσο και ιστορικά δεδομένα. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει στο Ditto να μετατρέπει τα δεδομένα IoT σε πολύτιμες γνώσεις, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση λειτουργιών.
4. **InfluxDB Database:** Χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων χρονικών σειρών. Με εξειδίκευση στη διαχείριση μετρήσεων που αλλάζουν με τον χρόνο, διευκολύνει την παρακολούθηση συστημάτων, τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες IoT, την ανάλυση τάσεων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων από συνεχόμενες μετρήσεις μεγάλου όγκου. Υποστηρίζει γρήγορη αποθήκευση, queries σε πραγματικό χρόνο και αυτοματοποιημένη διαχείριση παλαιών δεδομένων μέσω retention policies.



Εικόνα 3.5.1: Αρχιτεκτονική προτεινόμενης λύσης

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική διαμορφώνει ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα για τη συλλογή, διαχείριση και απεικόνιση δεδομένων από ποικίλες πηγές, όπως αισθητήρες και SCADA συστήματα. Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών διασφαλίζεται μέσω ενός ανθεκτικού και ασφαλούς καναλιού που βασίζεται στο πρωτόκολλο MQTT, αξιοποιώντας servers και clients OPC UA.

Το Eclipse Ditto λειτουργεί ως κεντρική πλατφόρμα ψηφιακών διδύμων, παρέχοντας ένα συνεκτικό περιβάλλον για τη διαχείριση των δεδομένων που συλλέγονται. Αυτά αποθηκεύονται στην InfluxDB, η οποία προσφέρει υψηλή απόδοση στην επεξεργασία χρονοσειρών και επιτρέπει δυναμικές αναζητήσεις και αναλύσεις.

Για την περαιτέρω αξιοποίηση των δεδομένων, το σύστημα εφαρμόζει αλγορίθμους δεδομένων που επιτρέπουν τον εμπλουτισμό, τη βελτιστοποίηση και τη μετατροπή των πληροφοριών σε χρήσιμα insights. Στο τελικό στάδιο, ένας φιλικός προς τον χρήστη διαδραστικός πίνακας ελέγχου (dashboard) επιτρέπει την οπτικοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας ένα διαισθητικό περιβάλλον παρακολούθησης και ανάλυσης.

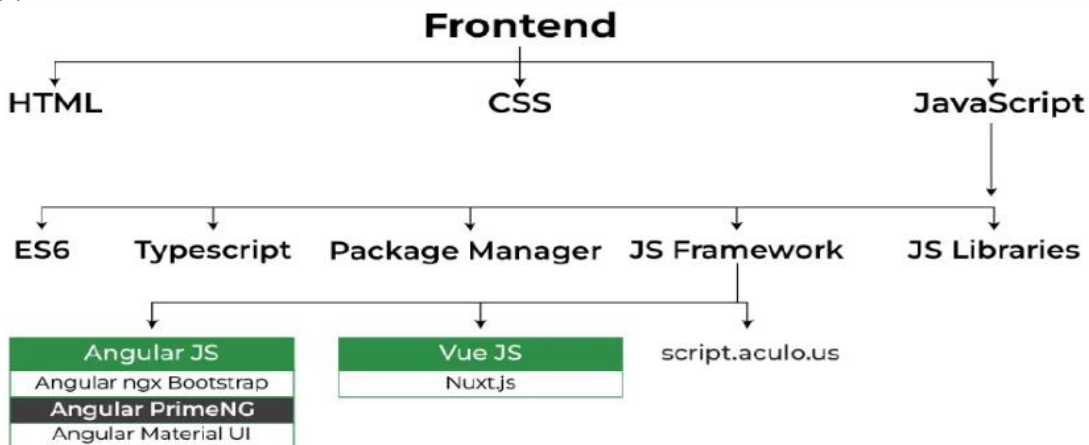
2.5.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Το Eclipse Ditto συνιστά ένα θεμελιώδες πλαίσιο για την ανάπτυξη και διαχείριση ψηφιακών διδύμων, επιτρέποντας την ενοποίηση φυσικών και εικονικών αντικειμένων σε μια ενιαία ψηφιακή αναπαράσταση. Κάθε οντότητα, είτε πρόκειται για αισθητήρα, μηχανήμα, διαδικασία ή πληροφοριακό σύστημα, μοντελοποιείται ως Thing, το οποίο διαθέτει ένα σύνολο από Features που αποτυπώνουν τις λειτουργίες και τις ιδιότητές του. Παράλληλα, η πλατφόρμα ενσωματώνει μηχανισμούς πολιτικών πρόσβασης (Policies), οι οποίοι επιτρέπουν την ακριβή διαχείριση των δικαιωμάτων χρηστών και συστημάτων. Επιπροσθέτως, τα πεδία thingId και attributes διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς το πρώτο λειτουργεί ως μοναδικό αναγνωριστικό ενός Thing, ενώ το δεύτερο υποστηρίζει τη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών του.

Η λειτουργικότητα του Ditto εκτείνεται πέραν της απλής αναπαράστασης αντικειμένων, καθώς υποστηρίζει την ενορχήστρωση και επεξεργασία δεδομένων. Μέσω της δυνατότητας σύνδεσης ετερογενών πηγών πληροφορίας, παρέχεται μια ολιστική και συνεκτική εικόνα των διαδικασιών. Ιδιαίτερα στον βιομηχανικό τομέα, η πλατφόρμα χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική διαχείριση δεδομένων IoT, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση επιχειρησιακών ροών, την έγκαιρη διάγνωση πιθανών δυσλειτουργιών και την εφαρμογή προγνωστικής συντήρησης. Με τον τρόπο αυτό, μειώνονται οι πιθανότητες απρογραμμάτιστων διακοπών και οι κίνδυνοι λειτουργικών βλαβών.

Όσον αφορά τη διεπαφή χρήστη, αυτή έχει αναπτυχθεί με το Angular framework σε συνδυασμό με τη βιβλιοθήκη PrimeNG, προσφέροντας ένα δυναμικό και διαδραστικό περιβάλλον παρακολούθησης και διαχείρισης δεδομένων. Η αξιοποίηση HTML και CSS εξασφαλίζει τη διαμόρφωση ενός σύγχρονου και εύχρηστου σχεδιασμού, ο οποίος ενισχύει την εμπειρία χρήστη και την οπτικοποίηση κρίσιμων πληροφοριών.

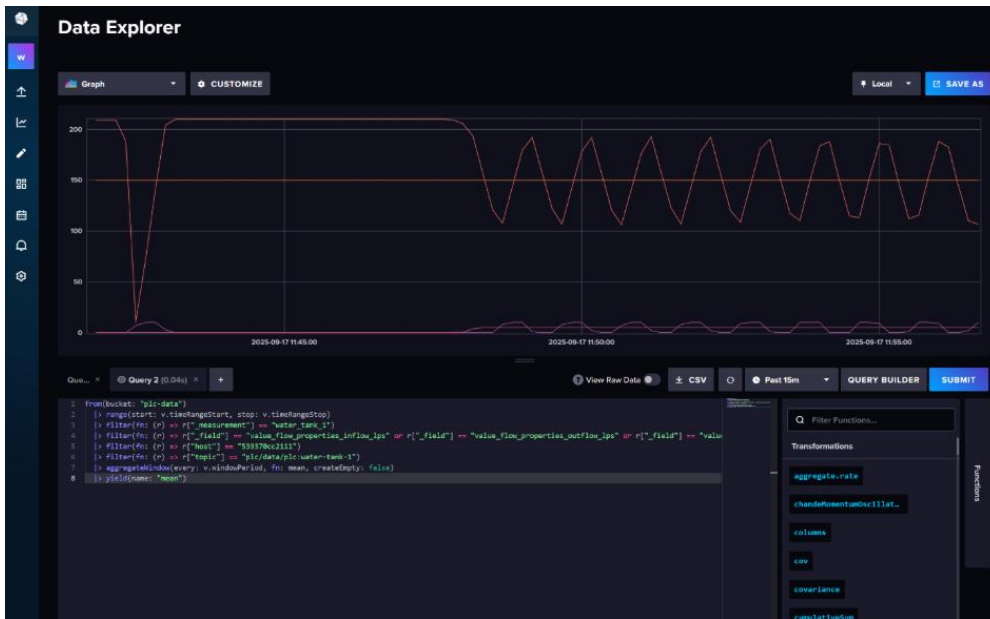
Το PrimeNG, ως ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκη διεπαφών για Angular, παρέχει εκτενή συλλογή προκαθορισμένων στοιχείων, όπως components, panels, overlays, menus και charts. Η χρήση του υποστηρίζει την ανάπτυξη εφαρμογών μίας σελίδας (single-page applications), όπου μόνο τμήματα της σελίδας ανανεώνονται δυναμικά με βάση την αλληλεπίδραση του χρήστη, αντί ολόκληρης της ιστοσελίδας. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της απόκρισης του συστήματος και της συνολικής χρηστικότητας της εφαρμογής, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει την ενσωμάτωση εξειδικευμένων λειτουργικοτήτων.



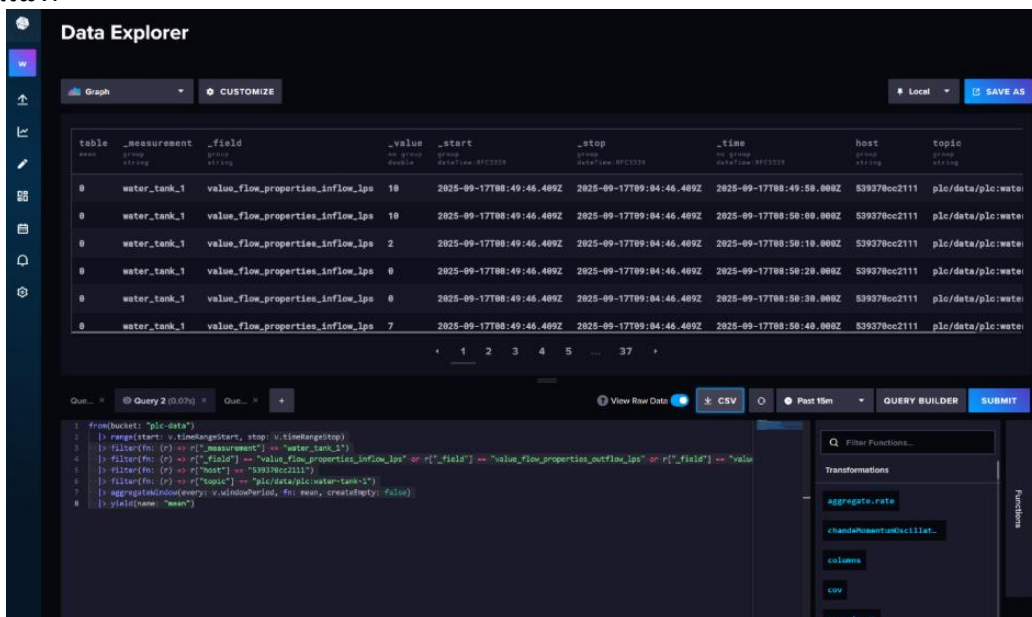
Εικόνα 3.5.2: Οικοσύστημα τεχνολογιών Angular

Για την αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων, η πλατφόρμα αξιοποιεί την InfluxDB, η οποία προσφέρει ευέλικτη διαχείριση δεδομένων χρονοσειρών, επιτρέποντας την αποτελεσματική αποθήκευση και ανάκτηση τόσο δομημένων όσο και ημι-δομημένων πληροφοριών.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

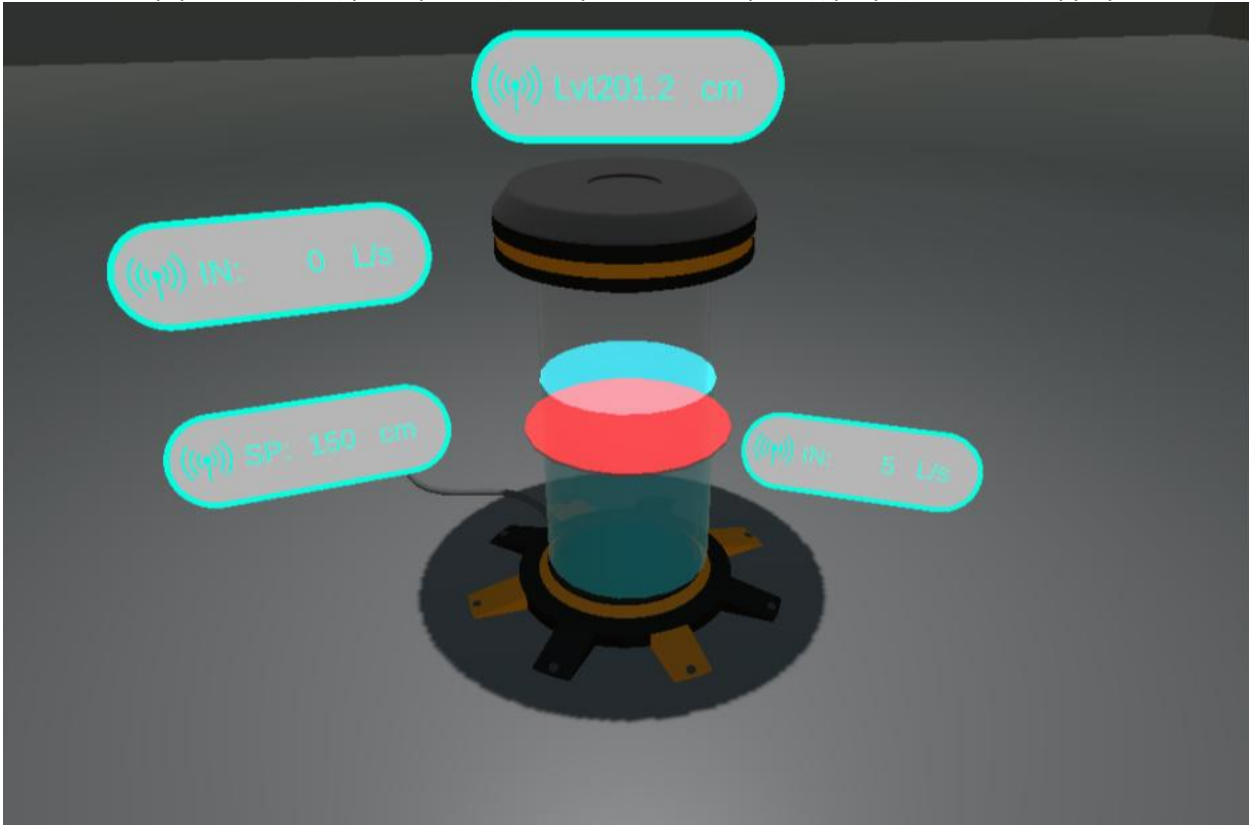


Η προτεινόμενη υποδομή βασίζεται στην ενσωμάτωση του Telegraf, της InfluxDB και του Grafana, δημιουργώντας ένα συνεκτικό σύστημα συλλογής, αποθήκευσης και ανάλυσης δεδομένων χρονικών σειρών. Ο Telegraf λειτουργεί ως agent συλλογής δεδομένων από PLCs, αισθητήρες και άλλα συστήματα, παρέχοντας αξιόπιστη αποστολή των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο προς την InfluxDB, η οποία αποτελεί εξειδικευμένη βάση δεδομένων χρονικών σειρών με δυνατότητα οργάνωσης δεδομένων σε measurements και fields και υποστήριξη προηγμένων λειτουργιών μέσω της γλώσσας Flux. Η αποθήκευση σε μορφή χρονικών σειρών επιτρέπει την αποτελεσματική εκτέλεση συγκεντρωτικών υπολογισμών, φιλτραρίσματος και ανάλυσης τάσεων. Η οπτικοποίηση και παρακολούθηση πραγματοποιείται μέσω του Grafana, το οποίο προσφέρει δυνατές διαδραστικών dashboards, ιστορικής αναπαράστασης δεδομένων και ειδοποιήσεων, ενισχύοντας την κατανόηση της δυναμικής λειτουργίας των συστημάτων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση μοντέλων μηχανικής μάθησης (ML) επιτρέπει τόσο την ανάλυση ιστορικών δεδομένων όσο και την επεξεργασία ζωντανών ροών, για εφαρμογές όπως πρόβλεψη επιπέδων δεξαμενών, ανίχνευση ανωμαλιών στις ροές και βελτιστοποίηση διαδικασιών. Η συνολική ροή Telegraf → InfluxDB → Grafana παρέχει, συνεπώς, ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για τη συλλογή, την αποθήκευση, την οπτικοποίηση και την έξυπνη αξιοποίηση των δεδομένων χρονικών σειρών, υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας συστημάτων.



Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Η χρήση της Unity 3D ως βασικού εργαλείου ανάπτυξης του εικονικού περιβάλλοντος παραγωγής επιτρέπει την αναπαράσταση και προσομοίωση σύνθετων βιομηχανικών διαδικασιών. Στο στάδιο της διαμόρφωσης, η Unity αξιοποιείται για τη δημιουργία τρισδιάστατων εικονικών χώρων με βάση το πρότυπο AutomationML, διασφαλίζοντας συμβατότητα με τα πρότυπα βιομηχανικού αυτοματισμού. Παράλληλα, μέσω της ενσωμάτωσης διεπαφών με το πρωτόκολλο MQTT της πλατφόρμας IoT και με έναν λογισμικό PLC, καθίσταται δυνατή η προσομοίωση της επικοινωνίας ανάμεσα στον βιομηχανικό εξοπλισμό, τις συσκευές IoT και την πλατφόρμα ελέγχου. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την αξιοπιστία του εικονικού περιβάλλοντος ως μέσο μελέτης, δοκιμών και επικύρωσης βιομηχανικών εφαρμογών.

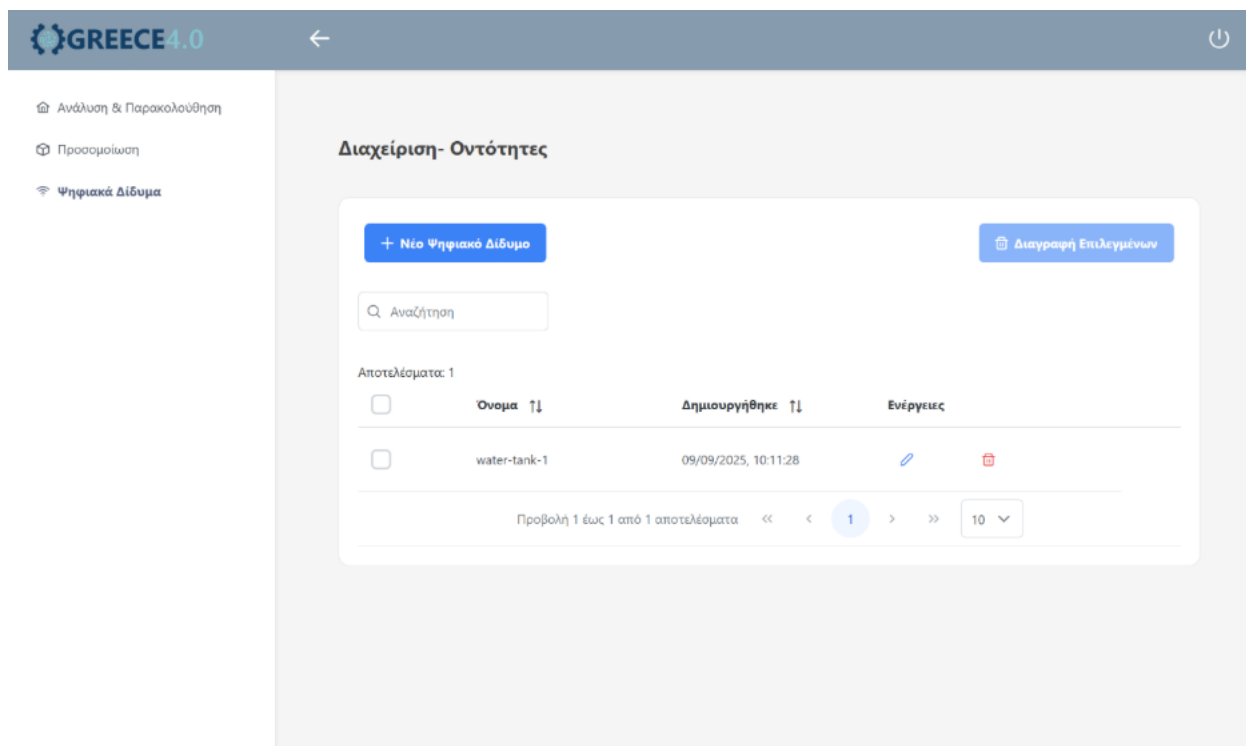
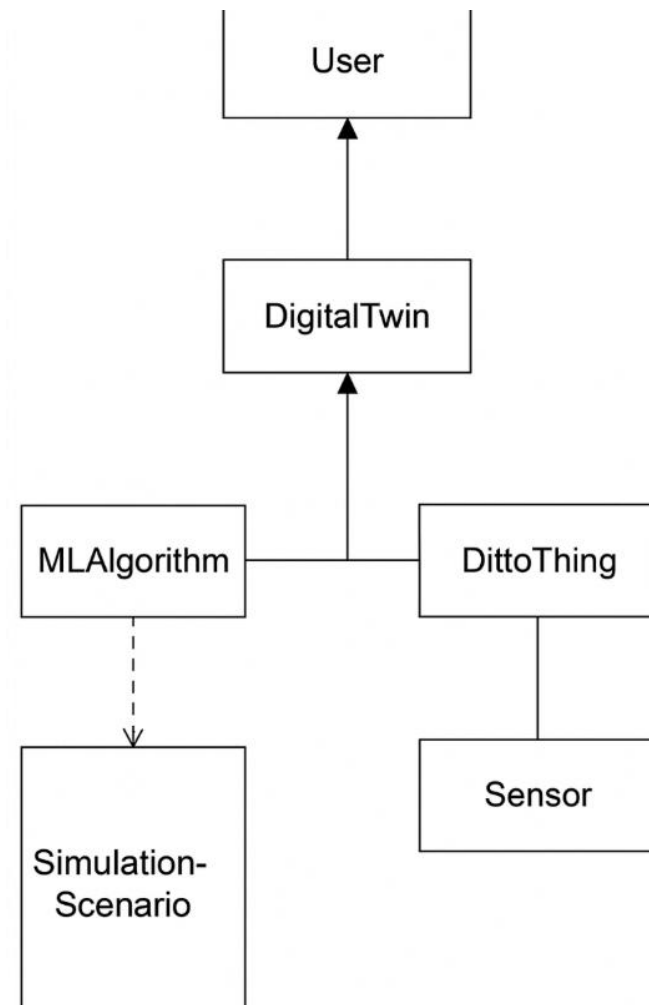


2.5.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

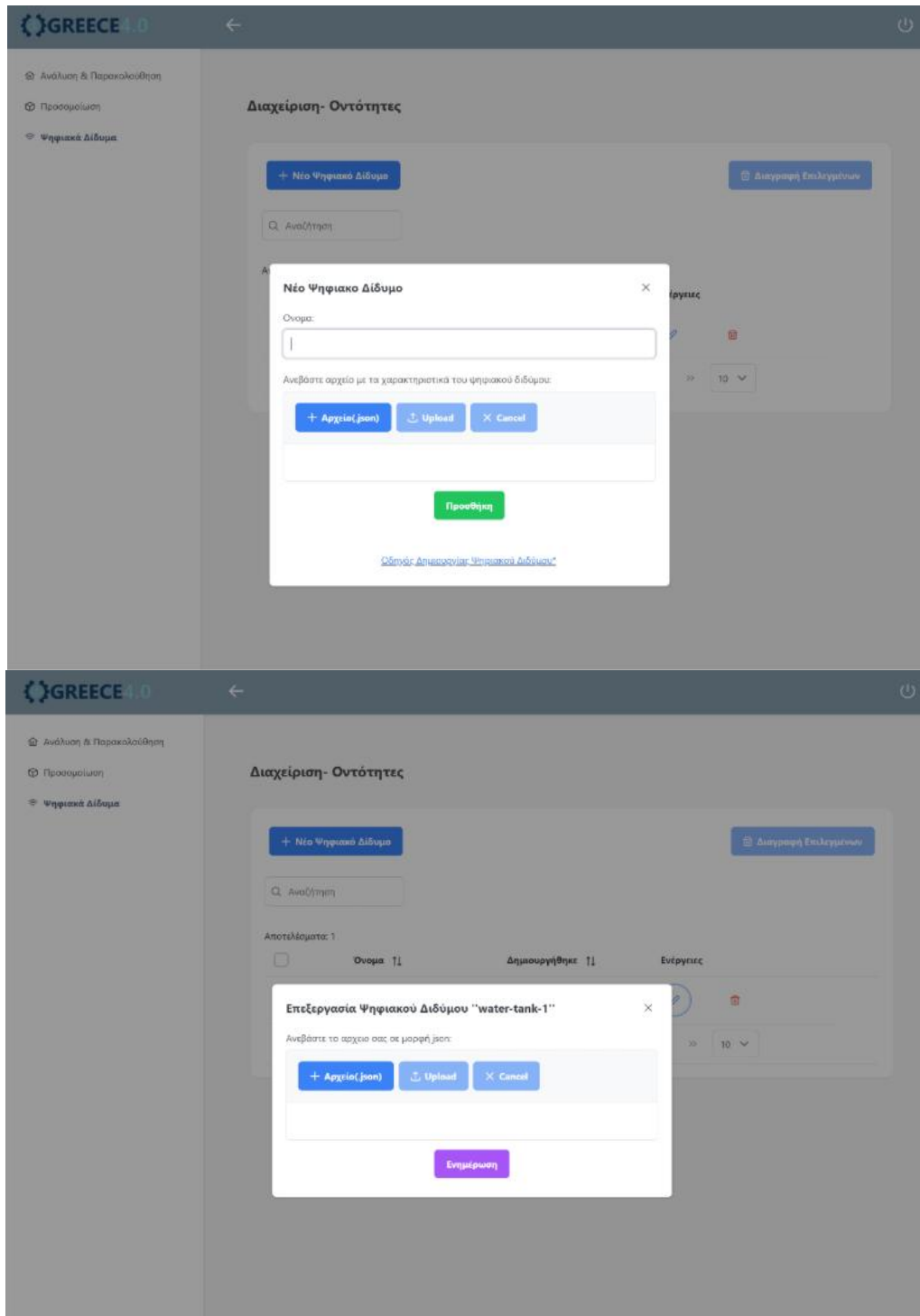
Στην τελική έκδοση, οι επιμέρους τεχνολογίες συνδυάζονται σε μία εύχρηστη διαδικτυακή πλατφόρμα. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα ψηφιακό δίδυμο, να συνδέσει τις ροές δεδομένων και έπειτα να παρακολουθεί την κατάστασή του. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας προσομοιώσεων με αλγορίθμους που αναπτύσσει ο ίδιος, με σκοπό τον έλεγχο της απόκρισης του συστήματος σε συγκεκριμένες καταστάσεις.

Το web περιβάλλον της πλατφόρμας παρέχει έναν ολοκληρωμένο μηχανισμό διαχείρισης χρηστών, δημιουργίας και παρακολούθησης ψηφιακών διδύμων, καθώς και υποστήριξης προσομοίωσης και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η διαδικασία σύνδεσης και πιστοποίησης (login authentication) υλοποιείται μέσω του Keycloak, επιτρέποντας ασφαλή έλεγχο ταυτότητας και διαχείριση δικαιωμάτων χρήστη. Μετά την εγγραφή και τον έλεγχο ταυτότητας, ο χρήστης έχει πρόσβαση στο μενού “Ψηφιακά Δίδυμα”, όπου μπορεί να δημιουργήσει νέα ψηφιακά δίδυμα και να συνδέσει κάθε αντικείμενο με έναν Ditto Thing, εξασφαλίζοντας την επικοινωνία με τον αντίστοιχο PLC. Το περιβάλλον υποστηρίζει πλήρες σύνολο CRUD (Create, Read, Update, Delete) operations, επιτρέποντας τη διαχείριση των ψηφιακών διδύμων καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

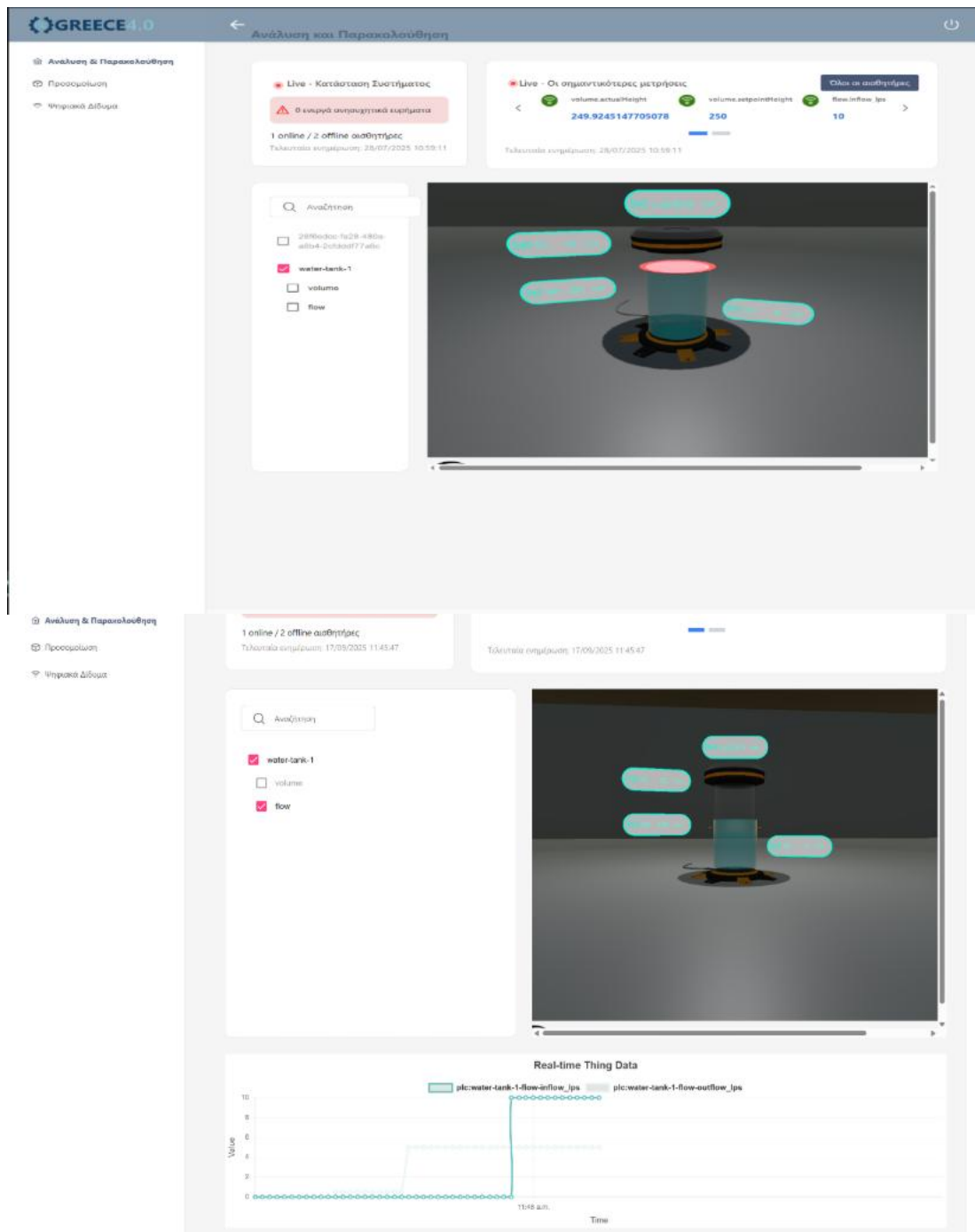


Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

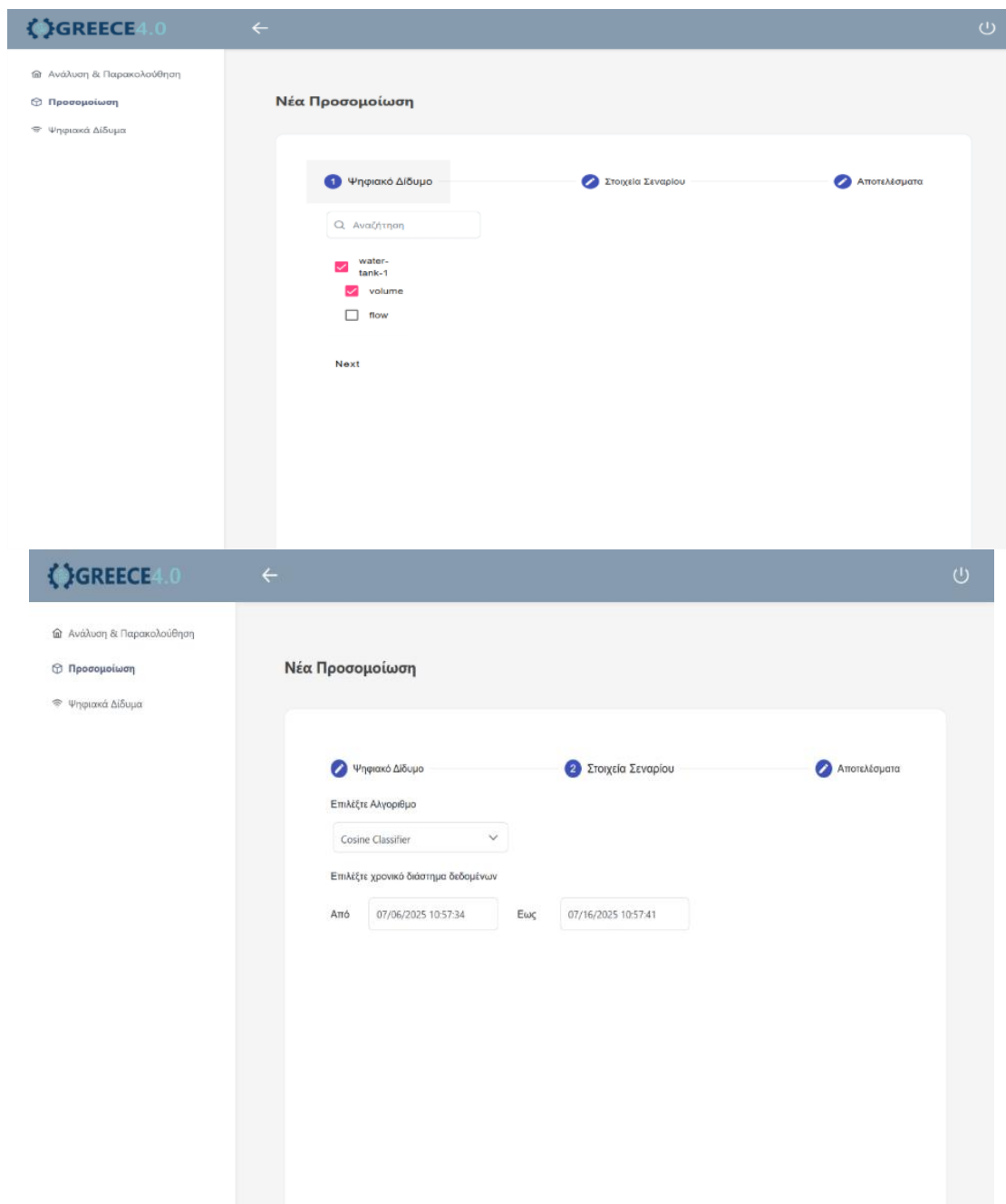


Το μενού “Ανάλυση και Παρακολούθηση” παρέχει εργαλεία για την παρακολούθηση αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από τον βιομηχανικό εξοπλισμό και τις συσκευές IoT. Μέσω διαδραστικών γραφημάτων και dashboards, ο χρήστης μπορεί να αξιολογεί τη λειτουργία των συστημάτων, να εντοπίζει αποκλίσεις και να λαμβάνει αποφάσεις βάσει δεδομένων.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Τέλος, το μενού “Προσομοίωση” επιτρέπει την εκτέλεση τρεχόντων σεναρίων παραγωγής σε εικονικό περιβάλλον. Οι λειτουργίες αυτές υποστηρίζονται από αλγόριθμους μηχανικής μάθησης (ML), οι οποίοι βελτιστοποιούν τη ροή της παραγωγής και επιτρέπουν προγνωστική ανάλυση, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των επιχειρησιακών διαδικασιών. Το συνδυασμένο περιβάλλον, μέσω της ολοκλήρωσης των τριών μενού, προσφέρει μια πλήρη λύση για τη διαχείριση, παρακολούθηση και προσομοίωση βιομηχανικών συστημάτων σε ψηφιακό επίπεδο.



2.6 Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Διαδικασιών στην Βιομηχανία 4.0

2.6.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

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. Εργασίες που έχουν ολοκληρωθεί για την παρούσα έκδοση της λύσης:

- Σχεδιασμός
 - Ορισμός AML μοντέλου γραμμής παραγωγής
 - Καθορισμός σεναρίων προσομοίωσης
- Δημιουργία και συγχρονισμός Ψηφιακού Διδύμου
 - Δημιουργία virtual world και VR μοντέλων

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Παραμετροποίηση DT εφαρμογής (AML2TB)
- Δημιουργία αρχικής εκδοχής διεπαφών/προτύπων
- Επαλήθευση προδιαγραφών/πρωτότυπου
- Έλεγχος και Επικαιροποίηση Συστήματος
 - Εκτέλεση σεναρίων προσομοίωσης
 - Επικαιροποίηση σεναρίων προσομοίωσης/σχεδιασμού
 - Βελτιστοποίηση virtual world framework και μοντέλων
 - Βελτιστοποίηση DT εφαρμογής (AML2TB)
 - Εκτέλεση σεναρίων προσομοίωσης
 - Βελτιστοποίηση τελικής λύσης

Η τελική λύση παρουσιάζεται αναλυτικά στις παρακάτω παραγράφους.

2.6.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Διαδικασία αυτόματης δημιουργίας και εγκατάστασης Ψηφιακού Διδύμου

Η τελική έκδοση του συστήματος αυτοματοποιεί τον κύκλο ζωής του Ψηφιακού Διδύμου (ΨΔ) από την αρχή έως το τέλος, καλύπτοντας ενέργειες από τη μοντελοποίηση του πραγματικού περιβάλλοντος παραγωγής έως τη δημιουργία, την ανάπτυξη και τη λειτουργία του ΨΔ. Τα βήματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

- **Βήμα 1: Μοντελοποίηση γραμμής παραγωγής:** Το AutomationML χρησιμοποιείται για τον τυπικό ορισμό της γραμμής παραγωγής, αξιοποιώντας το δωρεάν εργαλείο AutomationML Editor ¹ για αυτή την εργασία. Το ολοκληρωμένο μοντέλο του βιομηχανικού περιβάλλοντος ενσωματώνει όλες τις πληροφορίες σχετικά με βιομηχανικά μηχανήματα και υποδομές, το εσωτερικό δίκτυο μεταφορών και τις συσκευές ελέγχου, συμπεριλαμβανομένης της τοπολογίας τους στο χώρο εργασίας, των λειτουργιών τους, την τρισδιάστατη αναπαράστασή τους με αντικείμενα 3D (στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιούμε αρχεία URDF για ρομποτικές συσκευές και Unity Prefabs βασισμένα σε .FBX για άλλα μηχανήματα), καθώς και των κλήσεων των ελεγκτών (π.χ. διευθύνσεις ModBus ή κλήσεων σε API ελεγκτών ρομποτικών συστημάτων). Το πλήρως καθορισμένο μοντέλο αποθηκεύεται σε αρχείο AML σύμφωνα με την δομή της AutomationML, και θα χρησιμοποιηθεί ως βασική είσοδος για τα δύο επόμενα παράλληλα βήματα στη διαδικασία δημιουργίας του ΨΔ.
- **Βήμα 2α: Εξαγωγή εννοιών από το μοντέλο του βιομηχανικού περιβάλλοντος.** Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η σάρωση του αρχείου AML με σκοπό την εξαγωγή των βασικών εννοιών που περιγράφουν τη γραμμή παραγωγής. Αυτές περιλαμβάνουν τα μηχανήματα του εργοστασίου, τις λειτουργίες και δυνατότητές τους, τους ελεγκτές καθώς και τις διεπαφές που επιτρέπουν την ανάκτηση δεδομένων και την εκτέλεση εντολών. Οι πληροφορίες αυτές μετασχηματίζονται σε μια απλοποιημένη μορφή JSON, κατάλληλη για χρήση από τα επιμέρους υποσυστήματα του ΨΔ, και αξιοποιούνται για τη διαμόρφωση και αρχικοποίηση της πλατφόρμας του.
- **Βήμα 2β: Δημιουργία εικονικού κόσμου** Το αρχείο AML και οι ελεγκτές προγραμματιζόμενης λογικής (PLC/ρομποτικοί ελεγκτές) εισάγονται σε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία δημιουργίας του εικονικού τρισδιάστατου δίδυμου. Χτισμένο στην πλατφόρμα Unity 3D Engine, το σύστημα αναλύει το μοντέλο AML για να ανακατασκευάσει το περιβάλλον παραγωγής σε έναν εικονικό τρισδιάστατο χώρο, που περιλαμβάνει όλα τα βιομηχανικά συστήματα. Για την εξομίωση του ελέγχου των βιομηχανικών συστημάτων, η λύση υλοποιεί εικονικές μηχανές που εκτελούν OpenPLC (για βιομηχανικούς ελεγκτές) και ROS (για ρομποτικά συστήματα), αναπαράγοντας με ακρίβεια τη συμπεριφορά των φυσικών συσκευών αυτοματισμού.

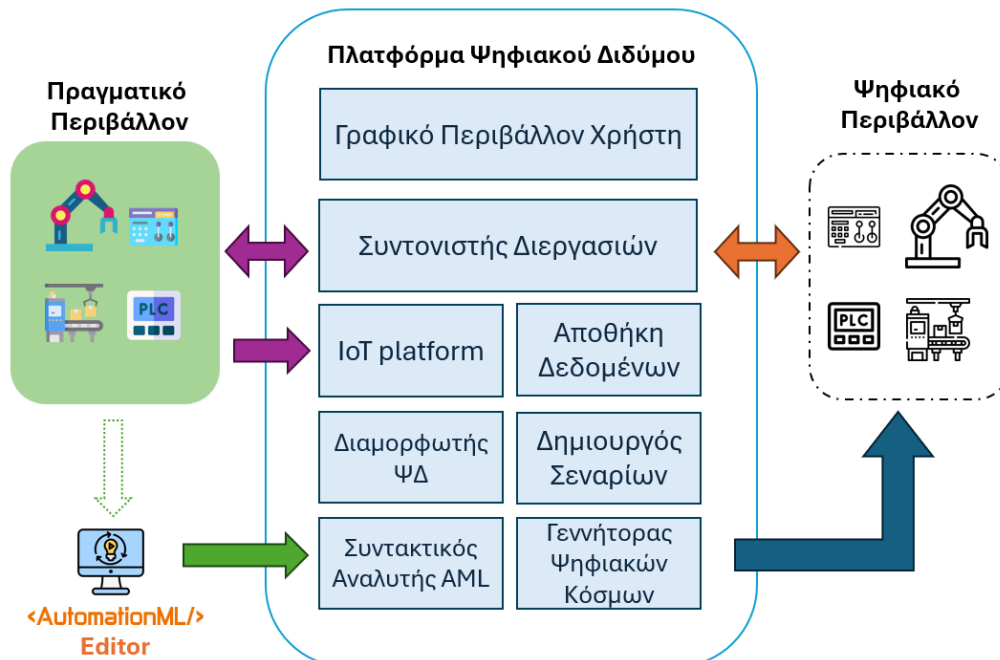
¹ <https://www.automationml.org/about-automationml/aml-tools/>

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- **Βήμα 3: Διαμόρφωση της πλατφόρμας Ψηφιακού Διδύμου.** Οι εξαγόμενες έννοιες από το αρχείο AML (βήμα 2α) εισάγονται στην πλατφόρμα ΨΔ, αρχικοποιώντας όλες τις παραμέτρους του συστήματος για τη συλλογή, την παρακολούθηση και την οπτικοποίηση των δεδομένων προς τον χρήστη. Η πλατφόρμα δημιουργεί αυτόματα δομές δεδομένων στη πλατφόρμα ThingsBoard, η οποία αναλαμβάνει την συλλογή δεδομένων, καθώς ως πλατφόρμα διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) υποστηρίζει πολλαπλά βιομηχανικά πρωτόκολλα, όπως ModBus, MQTT και HTTP. Σε αυτό το στάδιο, η πλατφόρμα του ΨΔ δημιουργεί αμφίδρομη σύνδεση τόσο με τα στοιχεία του φυσικού βιομηχανικού περιβάλλοντος όσο και με τις εικονικές αναπαραστάσεις τους, επιτρέποντας τη ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στον εικονικό κόσμο και την διαδραστική οπτικοποίηση τους.
- **Βήμα 4: Δημιουργία σεναρίων βιομηχανικών διαδικασιών** Αυτό το βήμα επικεντρώνεται στη δημιουργία ποικίλων σεναρίων παραγωγής που θα προσομοιωθούν στο εικονικό περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία δημιουργίας υποστηρίζεται από ένα μεγάλο γλωσσικό μοντέλο (Large Language Model - LLM), το οποίο έχει ρυθμιστεί ειδικά για το σκοπό αυτό. Το LLM αξιοποιεί την γνώση για τις βιομηχανικές δυνατότητες της γραμμής παραγωγής για να δημιουργήσει εναλλακτικά σενάρια διαδικασιών παραγωγής, τα οποία περιγράφονται τυπικά στη αναπαράσταση Business Process Model Notation (BPMN). Αυτά τα σενάρια που δημιουργούνται υποβάλλονται σε προσομοίωση και αξιολόγηση της απόδοσής τους στο εικονικό περιβάλλον του ΨΔ.
- **Βήμα 5: Επαναπρογραμματισμός του φυσικού βιομηχανικού περιβάλλοντος.** Στο τελικό βήμα, η επικυρωμένη διαδικασία παραγωγής, η οποία έχει δοκιμαστεί με επιτυχία στο εικονικό περιβάλλον, αναπτύσσεται στο φυσικό χώρο παραγωγής. Ο ενσωματωμένος μηχανισμός εκτέλεσης ροών εργασιών BPMN της πλατφόρμας του ΨΔ αναλαμβάνει τον συντονισμό της βιομηχανικής διαδικασίας, εκτελώντας τη ροή εργασίας μέσω κατάλληλων κλήσεων προς τις ρουτίνες των πραγματικών ελεγκτών των βιομηχανικών μηχανών και ρομποτικών συστημάτων που λειτουργούν στο εργοστάσιο.

Αρχιτεκτονική Ψηφιακού Διδύμου

Για την εκτέλεση της παραπάνω μεθοδολογικής διαδικασίας δημιουργήθηκε μια πλατφόρμα για Ψηφιακά Δίδυμα που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 46).



Εικόνα 46: Αρχιτεκτονική προτεινόμενης λύσης

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Όπως προαναφέρθηκε, το πραγματικό βιομηχανικό σύστημα, που περιλαμβάνει μηχανήματα, αισθητήρες, μηχανισμούς ενεργοποίησης και ελεγκτές, μοντελοποιείται αρχικά σύμφωνα με το πρότυπο της AutomationML. Το αρχείο AML που παράγεται περιλαμβάνει την περιγραφή των βιομηχανικών εξαρτημάτων της γραμμής παραγωγής, χρησιμοποιώντας ένα ιεραρχικό και διασυνδεδεμένο μοντέλο. Αυτό το αρχείο χρησιμεύει ως ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό σχέδιο, που κωδικοποιεί όλες τις απαιτούμενες έννοιες του πραγματικού κόσμου για τη δημιουργία του ΨΔ και αποτελεί τη βασική είσοδο για την αρχικοποίηση και τη λειτουργία της πλατφόρμας ΨΔ.

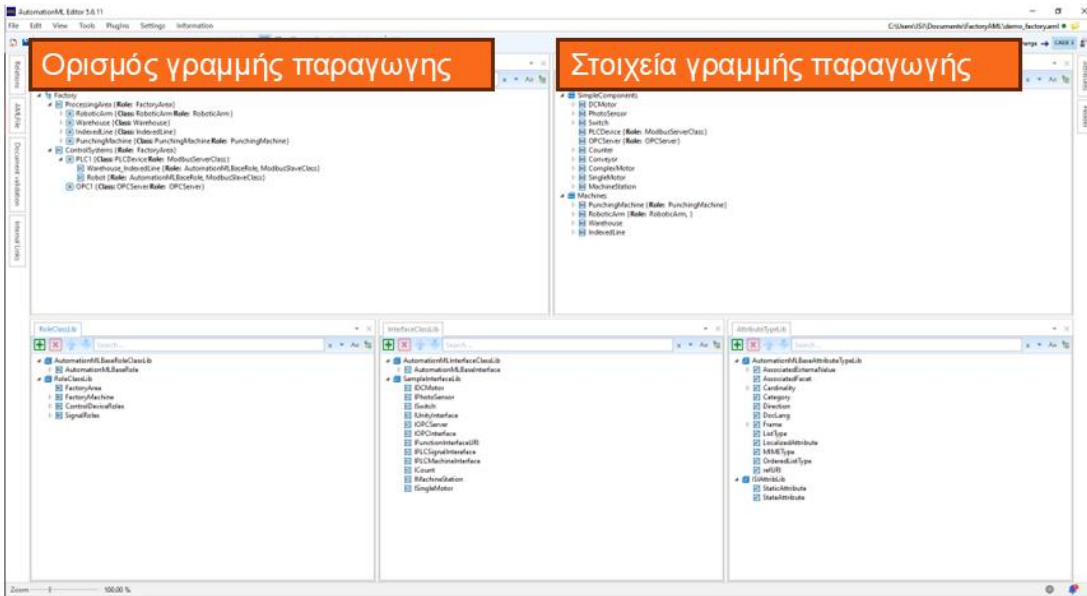
Η πλατφόρμα ΨΔ αποτελείται από τις ακόλουθες λειτουργικές μονάδες:

- Ο **Συντακτικός Αναλυτής της AML** είναι ένα λογισμικό που αναλύει το αρχείο AML και εξάγει βασικά δεδομένα σχετικά με τη βιομηχανική παραγωγή, όπως τον εξοπλισμό και τα συστήματα του χώρου παραγωγής, την τοπολογία τους, τις λειτουργικές δυνατότητες και τις διεπαφές εντολών των ελεγκτών τους, τα οποία και αποθηκεύει σε μια σειρά από JSON αρχεία.
- Ο **Γεννήτορας Ψηφιακών Κόσμων** δημιουργεί ένα ψηφιακό αντίγραφο του φυσικού περιβάλλοντος σε 3D στο Unity, δημιουργώντας εικονικές παρουσίες ελεγκτών, που μιμούνται τα αντίστοιχα πραγματικά.
- Ο **Διαμορφωτής του ΨΔ** ορίζει τον συντονιστή διεργασιών αρχικοποιώντας τις παραμέτρους λειτουργίας του και αναπτύσσοντας πρόσθετες επεκτάσεις επικοινωνίας για την αλληλεπίδραση μεταξύ πραγματικών και εικονικών ελεγκτών με τη χρήση προκατασκευασμένων προτύπων. Επιπλέον, καθορίζει τη δομή των δεδομένων και τις διεπαφές ανταλλαγής μηνυμάτων των μονάδων επικοινωνίας με την Πλατφόρμα Διαδικτύου των Πραγμάτων, ώστε να είναι δυνατή η ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τους φυσικούς ελεγκτές.
- Ο **Δημιουργός Σεναρίων** χρησιμοποιεί τεχνικές Παραγωγικής ΤΝ (Generative AI) για να συνθέσει πιθανά σενάρια παραγωγικής διαδικασίας με βάση τον ορισμό της πραγματικής παραγωγικής διαδικασίας. Αυτά τα σενάρια που δημιουργούνται με τη χρήση ΤΝ τυποποιούνται σε BPMN με βιομηχανικές συσκευές που λειτουργούν ως παράγοντες και ρουτίνες ελέγχου που ορίζουν τις εργασίες.
- Η **Πλατφόρμα Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT Platform)** αξιοποιεί την πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα ThingsBoard για τη σύνδεση σε πραγματικό χρόνο με φυσικούς αισθητήρες, πύλες και ελεγκτές που επιτρέπουν τη συνεχή συλλογή δεδομένων.
- Η **Αποθήκη Δεδομένων (Data Storage)** χρησιμοποιεί μια υβριδική αρχιτεκτονική, συνδυάζοντας μια βάση δεδομένων NoSQL (Cassandra DB) και μια σχεσιακή βάση δεδομένων (PostgreSQL) για την αποθήκευση γενικών δεδομένων και δεδομένων παραμετροποίησης, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες του φυσικού κόσμου.
- Ο **Συντονιστής Διεργασιών** χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό BPMN για τον συντονισμό των διαδικασιών παραγωγής σε φυσικά και εικονικά περιβάλλοντα. Κατά την εκτέλεση, αλληλεπιδρά δυναμικά με τις συσκευές πεδίου παράγοντας εντολές ελέγχου και συλλέγοντας ροές δεδομένων από αισθητήρες.
- Το **Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη (Graphical User Interface)** είναι βασισμένο στο διαδίκτυο και παρέχει ολοκληρωμένο έλεγχο του ΨΔ, επιτρέποντας στους χρήστες να παρακολουθούν δεδομένα πραγματικού χρόνου, να δημιουργούν και να προσομοιώνουν σενάρια διαδικασιών και να εφαρμόζουν επικυρωμένες αλλαγές απευθείας στο φυσικό χώρο εργασίας.

2.6.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Μοντελοποίηση Βιομηχανικού Περιβάλλοντος

Το βιομηχανικό παραγωγικό περιβάλλον μοντελοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο AutomationML (AML), μέσω μιας δομημένης αναπαράστασης που περιλαμβάνει τόσο τις φυσικές μηχανές όσο και τα συστήματα ελέγχου. Για τη μοντελοποίηση αυτή χρησιμοποιείται η εφαρμογή AutomationML Editor.



Εικόνα 47 Μοντελοποίηση γραμμής παραγωγής σε AutomationML

Το πρότυπο AML οργανώνει το εργοστάσιο σε δύο αλληλένδετες ιεραρχίες:

- **Φυσική ιεραρχία:** Παρέχει μια ενιαία και ενσωματωμένη αναπαράσταση των στοιχείων του εργοστασίου, από το συνολικό σύστημα έως τα επιμέρους εξαρτήματα. Περιλαμβάνει:
 - Γραμμές παραγωγής
 - Μηχανές (π.χ. ρομπότ),
 - Αισθητήρες
 - Κάθε οντότητα συνοδεύεται από επιπλέον δεδομένα που περιγράφουν τις λειτουργικές ιδιότητες, τις διεπαφές επικοινωνίας και τις τοπολογικές σχέσεις.
- **Ιεραρχία ελέγχου:** Αποτελεί μια λογική αναπαράσταση των πόρων αυτοματισμού, στην οποία τα PLC, οι βιομηχανικοί υπολογιστές και οι λειτουργίες του λογισμικού τους (όπως ο έλεγχος κίνησης και οι μηχανές κατάστασης) συνδέονται ρητά με τα φυσικά στοιχεία που τα διαχειρίζονται. Η αντιστοίχιση αυτή διασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα μεταξύ των κυβερνοφυσικών εξαρτημάτων και των αντίστοιχων τους στον πραγματικό κόσμο.

Ψηφιακό Αντίγραφο

Το ψηφιακό αντίγραφο της γραμμής παραγωγής δημιουργείται δυναμικά μέσα από τον Γεννήτορα Ψηφιακών Κόσμων που δέχεται ως είσοδο το AML αρχείο και εκτελεί τις εξής διαδικασίες:

- Δημιουργία του τρισδιάστατου αντιγράφου μέσα από μια ρουτίνα του Unity που σώρωνει το AML και τοποθετεί στον εικονικό χώρο τα μηχανήματα παραγωγής από προκατασκευασμένα 3D μοντέλο που περιέχουν και τις αντίστοιχες βιομηχανικές διεπαφές (ModBus, ROS).
- Δημιουργία εικονικών μηχανών που εξομοιώνουν την λειτουργία των βιομηχανικών ελεγκτών (OpenPLC, ROS)

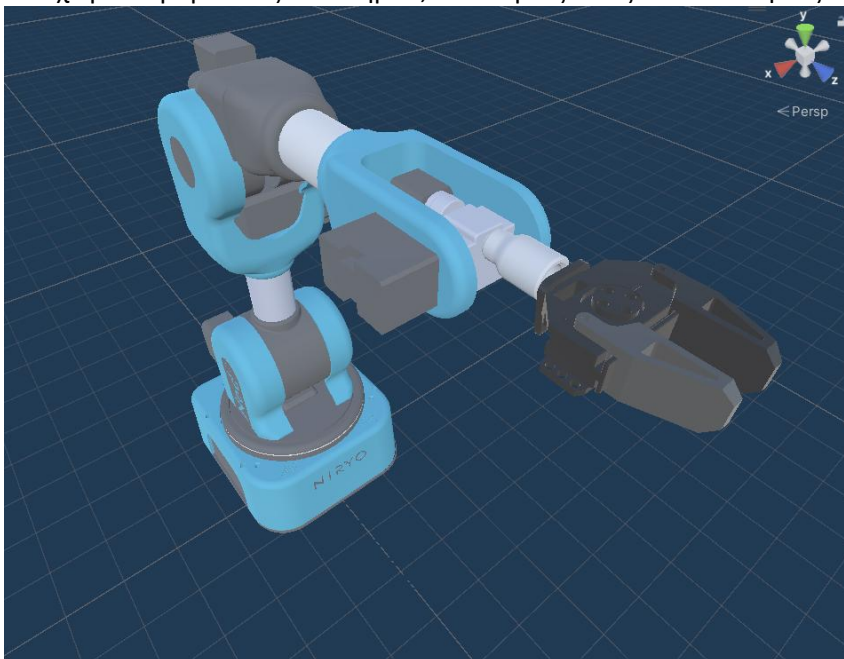
Πιο συγκεκριμένα, το Ψηφιακό αντίγραφο αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη:

- Τη μηχανή τρισδιάστατων κόσμων Unity, η οποία παρέχει πληθώρα λειτουργιών σχετική με βιντεοπαιχνίδια, και επομένως με τρισδιάστατα περιβάλλοντα και μηχανές φυσικής (physics engines), που είναι οι δύο κύριες λειτουργίες για τις οποίες έγινε η επιλογή της εξ αρχής.
- Το δεύτερο κομμάτι του που είναι απαραίτητο για το Ψηφιακό Δίδυμο είναι κάποιο ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) μεταξύ του ρομπότ και της μηχανής γραφικών. Επιλέξαμε να είναι το Robot Operating System (ROS), η έκδοση Noetic, καθώς είναι η καλύτερα υποστηριγμένη, φέρει πληθώρα δοκιρασμένων βιβλιοθηκών, και έχει τη καλύτερη συμβατότητα με το Unity. Τα πακέτα που περιγράφονται στη συνέχεια είναι φτιαγμένα για αυτή την έκδοση του ROS.
- Το τρίτο συνθετικό για τη πραγματοποίηση του ψηφιακού δίδυμου, είναι η βιβλιοθήκη Unity Robotics, η οποία εγκαθιστά στο Unity τη δυνατότητα να επικοινωνεί με το ROS, και επομένως να

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

ενταχθεί ως κόμβος (node) στο ROS. Το πακέτο που πετυχαίνει αυτή τη λειτουργία είναι το ROS TCP Connector, που επιτρέπει την ανευ περιορισμών ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του Unity και άλλων κόμβων του ROS. Είναι απαραίτητο στη μεριά που τρέχει το ROS (η εντολή roscore), να τρέχει το πακέτο ROS TCP Endpoint, το οποίο δημιουργεί έναν TCP Server, ώστε να επικοινωνήσει με τον TCP Connector που έχει εγκατασταθεί στο Unity. Τέλος, ένα σημαντικό επιπλέον πακέτο το οποίο εγκαταστάθηκε είναι το Unity URDF Importer, το οποίο επιτρέπει την μεταφόρτωση του Ned2 εκφρασμένου σε URDF μορφή αρχείου.

- Το τελευταίο συνθετικό, είναι το EasyModbusTCP.NET. Είναι μια βιβλιοθήκη για .NET βιβλιοθήκες ανάπτυξης εφαρμογών που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών ή ενσωματωμένων συστημάτων και PLCs για αυτοματισμούς στη βιομηχανία, υποστηρίζοντας τα πρωτόκολλα Modbus TCP, Modbus UDP και Modbus RTU. Εφόσον είναι για .NET βιβλιοθήκες ανάπτυξης, μπορεί να προστεθεί χωρίς προβλήματα στο Unity.
- Το URDF ή Unified Robot Description Format είναι μια μορφή XML που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των φυσικών και κινηματικών χαρακτηριστικών των ρομπότ. Τα αρχεία URDF είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα στη ρομποτική, ιδιαίτερα στο πλαίσιο του ROS, για τη μοντελοποίηση ρομπότ σε προσομοιώσεις και πραγματικές εφαρμογές. Ένα αρχείο URDF ορίζει διάφορα μέρη (ή "συνδέσμους") ενός ρομπότ και τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται μέσω "αρθρώσεων", επιτρέποντας στο λογισμικό να προσομοιώνει την κίνηση, να υπολογίζει την κινηματική του και να διαχειρίζεται τη δυναμική του σε περιβάλλοντα όπως το Gazebo, και στη δική μας περίπτωση το Unity. Αυτό το xml αρχείο συμπεριλαμβάνεται σε ένα φάκελο που εμπεριέχει αρχεία με τη τρισδιάστατη γεωμετρία κάθε άρθρωσης, καθώς και τα textures τους, έτσι ο URDF Importer διαβάζοντας το XML, το οποίο εμπεριέχει τα paths προς τα προαναφερθέντα αρχεία, δημιουργεί στον ψηφιακό χώρο το ρομπότ εξ ολοκλήρου, συνταιριάζοντας τα καταλλήλως.



Εικόνα 48: Το αποτέλεσμα της χρήσης του URDF Importer

Βασική Πλατφόρμα του Ψηφιακού Διδύμου

Η αρχιτεκτονική του συστήματος επικεντρώνεται σε μια δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του Συντονιστή Διεργασιών, που λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος συντονισμού και ευφυΐας, και μιας σουίτας υπηρεσιών ενδιάμεσου λογισμικού ειδικών για κάθε πρωτόκολλο, που λειτουργούν ως το κρίσιμο επίπεδο αφαίρεσης. Οι υπηρεσίες ενδιάμεσου λογισμικού έχουν σχεδιαστεί ως αρθρωτές, κοντεϊνεροποιημένες (containerized) εφαρμογές και κάθε μία από αυτές έχει δημιουργηθεί ειδικά για να επικοινωνεί με έναν συγκεκριμένο τύπο ελεγκτή μηχανής, όπως εκείνοι που συμμορφώνονται με τα πρωτόκολλα ROS ή Modbus. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός πως αυτές οι υπηρεσίες μπορούν να αλληλεπιδρούν απρόσκοπτα τόσο με το φυσικό υλικό στο εργοστάσιο όσο και με τους εικονικοποιημένους ελεγκτές εντός

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής του προσομοιωτή Unity, επιτρέποντας τη δημιουργία μιας τυποποιημένης Διεπαφής Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interface - API) για την επικοινωνία με τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος. Η εν λόγω διεπαφή καθοδηγείται από τα διάφορα συμβάντα του συστήματος και βασίζεται στο RESTful HTTP πρότυπο ανάπτυξης.

Η διαδικασία διαμόρφωσης και ανάπτυξης είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και βασίζεται στην εισαγωγή του αρχείου JSON το οποίο παράγεται από τον Συντακτικό Αναλυτή της AML και περιέχει τον πλήρη κατάλογο των διαθέσιμων μηχανών, τις λειτουργικές τους δυνατότητες και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Με αυτές τις πληροφορίες, αναπτύσσονται οι αντίστοιχες περιπτώσεις υπηρεσιών ενδιάμεσου υλικού.

Η αρχιτεκτονική των επιμέρους υποσυστημάτων που αποτελούν τον πυρήνα της πλατφόρμας του ΨΔ οργανώνεται σε δύο βασικά στοιχεία όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 49) :

- **Πλατφόρμα Ελέγχου:** Ο κεντρικός κόμβος για τη δημιουργία, εκτέλεση και διαχείριση σεναρίων.
- **Ενδιάμεσο Λογισμικό:** Ο ενδιάμεσος σύνδεσμος που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ της πλατφόρμας ελέγχου και των συστημάτων του εργοστασίου.

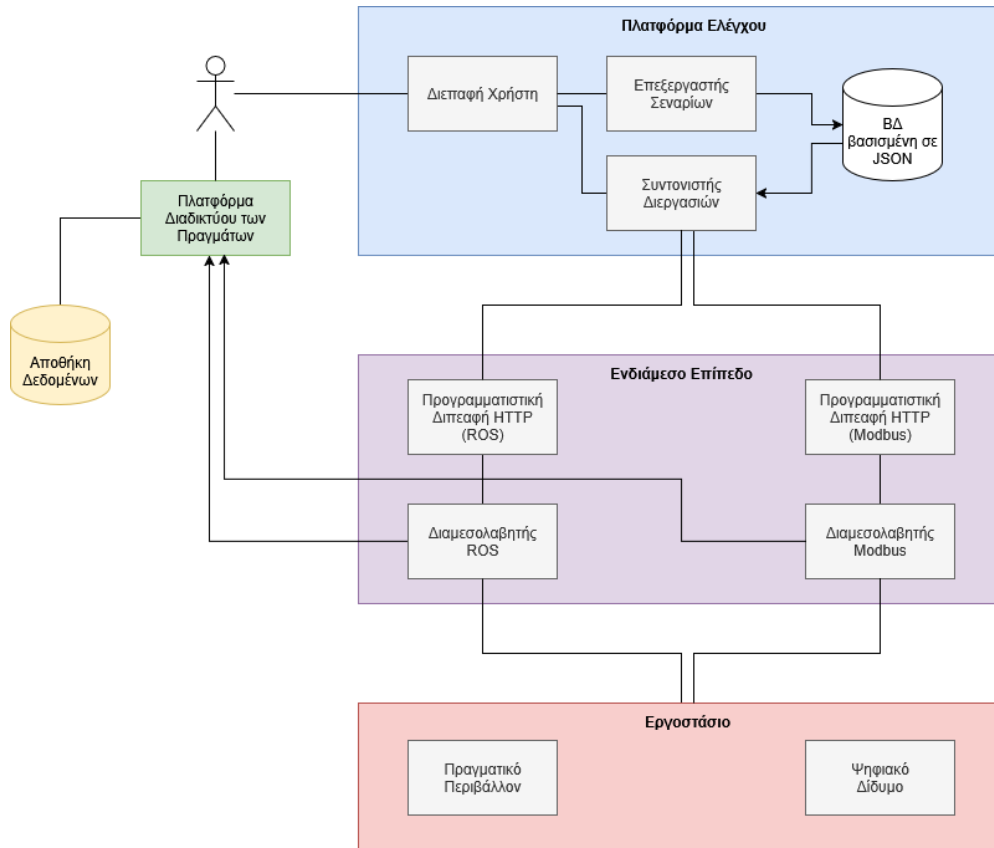
Η **Πλατφόρμα Ελέγχου** είναι το βασικό επίπεδο του συστήματος, υπεύθυνο για τη διαχείριση των αλληλεπιδράσεων των χρηστών, τη σχεδίαση και την εκτέλεση σεναρίων. Αποτελείται από τα ακόλουθα:

- **Διεπαφή Χρήστη:** Παρέχει το περιβάλλον αλληλεπίδρασης για τους χρήστες.
- **Επεξεργαστής Σεναρίων:** Συνδέει το γραφικό περιβάλλον των χρηστών με το Δημιουργό Σεναρίων που περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.
- **Συντονιστής Διεργασιών:** Εκτελεί τα καθορισμένα σενάρια, διασφαλίζοντας ότι οι εντολές μεταδίδονται στα κατάλληλα συστήματα.
- **Βάση δεδομένων:** Αποθηκεύει τα σενάρια και τις ρυθμίσεις σε δομημένη, επαναχρησιμοποιήσιμη μορφή JSON.

Η πλατφόρμα ελέγχου επικοινωνεί με το ενδιάμεσο λογισμικό για την αποστολή και λήψη δεδομένων προς και από τα συστήματα του εργοστασίου. Αυτό το ενδιάμεσο επίπεδο διευκολύνει την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ της πλατφόρμας ελέγχου και των φυσικών και ψηφιακών στοιχείων απλοποιώντας τις πολύπλοκες λειτουργίες των πρωτοκόλλων σε επίπεδο συσκευών και παρέχοντας μια τυποποιημένη διεπαφή για την πλατφόρμα ελέγχου:

- **Προγραμματιστική Διεπαφή HTTP (ROS):** Επιτρέπει τη διασύνδεση της πλατφόρμας με το διαμεσολαβητή για το πρωτόκολλο ROS.
- **Προγραμματιστική Διεπαφή HTTP (Modbus):** Επιτρέπει τη διασύνδεση της πλατφόρμας με το διαμεσολαβητή για το πρωτόκολλο Modbus.
- **Διαμεσολαβητής ROS:** Διαχειρίζεται την επικοινωνία και τον έλεγχο των φυσικών και των ψηφιακών ρομποτικών συσκευών στο εργοστάσιο. Ακόμα αποστέλλει διαρκώς πληροφορίες για την κατάσταση των συσκευών στην πλατφόρμα ThingsBoard για οπτικοποίηση και αποθήκευση.
- **Διαμεσολαβητής Modbus:** Επιτελεί τις ίδιες λειτουργίες με το διαμεσολαβητή ROS για τις απλούστερες συσκευές του εργοστασίου που επικοινωνούν μέσω του πρωτοκόλλου Modbus.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 49: Αρχιτεκτονική Συστημάτων της πλατφόρμας του ΨΔ

Όπως αναφέρθηκε ήδη για την οπτικοποίηση και αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγονται στην αρχιτεκτονική της λύσης έχουν προβλεφθεί δύο ακόμα επιμέρους υποσυστήματα:

- **Πλατφόρμα Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT Platform):** Πρόκειται για μια διεπαφή οπτικοποίησης όπου οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν τις λειτουργίες του εργοστασίου σε πραγματικό χρόνο και βασίζεται στην πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα ThingsBoard.
- **Αποθήκη Δεδομένων (Data Storage):** Συλλέγει και αποθηκεύει δεδομένα από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο πραγματικό περιβάλλον για ιστορική ανάλυση και λειτουργική αξιολόγηση. Για τη λειτουργία της συνδυάζει μια βάση δεδομένων NoSQL (Cassandra DB) και μια σχεσιακή βάση δεδομένων (PostgreSQL)

Μόλις ολοκληρωθεί η φάση διαμόρφωσης, το σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση λειτουργίας, όπου πλέον προσφέρει δύο διακριτούς τρόπους για τη διαχείριση του εργοστασίου: μια πλήρως εικονική λειτουργία για την εκτέλεση πειραματικών σεναρίων αποκλειστικά εντός του προσομοιωτή Unity και μια στενά συνδεδεμένη λειτουργία όπου το ψηφιακό δίδυμο αντικατοπτρίζει το φυσικό εργοστάσιο διαβάζοντας ζωντανά δεδομένα αισθητήρων. Ο Συντονιστής Διεργασιών είναι υπεύθυνος για την εκτέλεση των BPMN σεναρίων υψηλού επιπέδου εκδίδοντας εντολές στις κατάλληλες υπηρεσίες ενδιάμεσου λογισμικού, οι οποίες στη συνέχεια μεταφράζουν αυτές τις αφηρημένες οδηγίες στη γλώσσα του ελεγκτή-στόχου. Καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το ενδιάμεσο λογισμικό παρέχει αμφίδρομη ροή πληροφοριών, αναφέροντας σημαντικά συμβάντα του κύκλου ζωής (όπως ολοκλήρωση εργασιών ή σφάλματα) στον Συντονιστή Διεργασιών. Παράλληλα, αυτές οι υπηρεσίες μεταδίδουν συνεχώς τηλεμετρία από τους αισθητήρες χαμηλού επιπέδου μέσω του πρωτοκόλλου MQTT σε μια στην πλατφόρμα του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Η εν λόγω πλατφόρμα αξιοποιείται για την ζωντανή οπτικοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας σε διαμορφώσιμα ταμπλό, την καταγραφή ιστορικών δεδομένων για την ανάλυση της απόδοσης και την αποσφαλμάτωση του συστήματος, καθώς και την αυτόματη δημιουργία προειδοποιήσεων βάσει κανόνων για την προληπτική ανίχνευση σφαλμάτων.

Σε ό,τι αφορά στις υπηρεσίες που προσφέρονται στον τελικό χρήστη, η πλατφόρμα ελέγχου συνδέει πραγματικά συστήματα και τα ψηφιακά τους δίδυμα, επιτρέποντας τη δημιουργία, παρακολούθηση και

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής εκτέλεση σεναρίων. Οι χρήστες αλληλεπιδρούν με το σύστημα μέσω ενός πίνακα ελέγχου ThingsBoard, ο οποίος προσφέρει λειτουργίες απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιείται ακόμα και ως αποθετήριο για τα παραγόμενα δεδομένα.

Η πλατφόρμα ελέγχου επικοινωνεί με τους φυσικούς και ψηφιακούς δίδυμους μέσω εξειδικευμένων Διαμεσολαβητών και Προγραμματιστικών Διεπαφών. Για τα φυσικά συστήματα, επικοινωνεί με τον διαμεσολαβητή ROS μέσω μιας διεπαφής βασισμένης στο πρωτόκολλο HTTP ειδικά σχεδιασμένης για αυτές τις συσκευές. Ο διαμεσολαβητής ROS διαχειρίζεται τις αλληλεπιδράσεις τόσο με τον φυσικό δίδυμο όσο και με τον ψηφιακό, χειρίζεται εντολές και αποκτά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από το υλικό. Είναι υλοποιημένος σε γλώσσα προγραμματισμού Python και λειτουργεί συλλέγοντας αυτά τα δεδομένα από έναν κόμβο ROS ο οποίος δημιουργείται ειδικά για αυτό τον σκοπό κατά την αρχικοποίηση του συστήματος. Παρομοίως, για τα συστήματα που χρησιμοποιούν ελεγκτές PLC, η πλατφόρμα συνδέεται μαζί τους μέσω μιας διαφορετικής HTTP διεπαφής συμβατής με το διαμεσολαβητή Modbus. Ο συγκεκριμένος διαμεσολαβητής έχει υλοποιηθεί επίσης σε γλώσσα Python με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης PyModbus ενώ και οι δύο διεπαφές έχουν δημιουργηθεί με το μικροπλαίσιο ανάπτυξης Flask.

Η αρχιτεκτονική εξασφαλίζει την συνεχή ροή δεδομένων. Οι χρήστες ορίζουν σεναρία μέσω του πίνακα ελέγχου, ο οποίος προωθεί τις εισόδους στην πλατφόρμα ελέγχου για επεξεργασία. Ο Διαχειριστής Διεργασιών ανακτά τις αποθηκευμένες ρυθμίσεις, εκτελεί ροές εργασίας και αλληλεπιδρά με τους διαμεσολαβητές για την υλοποίηση ενεργειών. Τα δεδομένα και η ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο από τους φυσικά συστήματα και τους ΨΔ επιστρέφουν στην πλατφόρμα ελέγχου και απεικονίζονται στον πίνακα ελέγχου του ThingsBoard, παρέχοντας στον χρήστη πλήρη εποπτεία της λειτουργίας του συστήματος.

Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε ώστε να είναι προσαρμόσιμο και να μπορεί να προσφέρει μια απρόσκοπτη ενσωμάτωση φυσικών και ψηφιακών συστημάτων. Ο Δημιουργός Σεναρίων προσφέρει στους χρήστες μεγάλη ευελιξία στη δημιουργία και δοκιμή διάφορων λύσεων καθώς προσφέρει τη δυνατότητα για την επέκταση της πλατφόρμας ελέγχου με νέες συσκευές και λειτουργίες. Διατηρεί τρεις βασικές οντότητες οι οποίες αποθηκεύονται στη μορφή εγγράφων JSON, επιλογή η οποία έγινε με γνώμονα την συμβατότητα και τη μετέπειτα ενσωμάτωση στο υπάρχον σύστημα του γνωστού λογισμικού Ditto που αποσκοπεί στην ευκολότερη παρακολούθηση συσκευών και τη δημιουργία σχετικών εφαρμογών. Οι οντότητες αυτές είναι οι παρακάτω:

- **Συσκευές:** πρόκεινται για τις διεπαφές ελέγχου των διάφορων μηχανών. Παράδειγμα εγγράφου συσκευής:

```
{
  "id": "1",
  "name": "Warehouse",
  "manufacturer": "Fischer Technik",
  "model": "Warehouse",
  "date_added": "2024-10-07",
  "controller": {
    "interface": "modbus",
    "address": "127.0.0.1:5000",
    "plc": "0"
  }
}
```

- **Ρουτίνες:** ή αλλιώς οι εντολές για την εκτέλεση μεμονωμένων ενεργειών. Παράδειγμα εγγράφου ρουτίνας:

```
{
  "id": "2",
  "device": "1",
  "name": "Store to Warehouse",
}
```

```

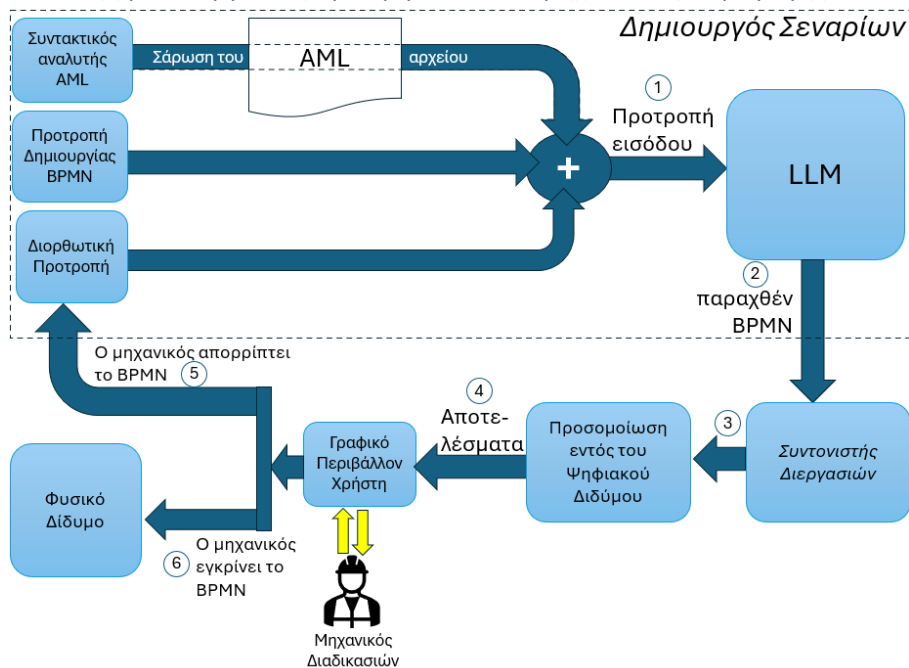
    "date_added": "2024-10-07",
    "commands": [
      {
        "coil": 82,
        "value": true
      }
    ],
    "finish": [],
    "timeout": 30
  }

```

- **Σενάρια:** που δεν είναι παρά ένας συνδυασμός των διάφορων λειτουργικότητων για την εκτέλεση μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας. Στην Εικόνα 53 οι αναγνώστες μπορούν να βρουν ένα παράδειγμα σεναρίου σε μορφή BPMN.

Δημιουργία και εκτέλεση σεναρίων βιομηχανικών διαδικασιών

Τα τέσσερα βασικά στοιχεία του συστήματος — Δημιουργός Σεναρίων, Συντακτικός Αναλυτής AML, Συντονιστή Διεργασιών και Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη— συνεργάζονται για την αυτόματη δημιουργία διαδικασιών που μπορούν να κατασκευαστούν, την ψηφιακή επικύρωσή τους μέσω του ΨΔ και την ανάπτυξη ροών εργασίας εγκεκριμένων από μηχανικούς παραγωγής.



Εικόνα 50: Διαδικασία δημιουργίας σεναρίων βιομηχανικών διεργασιών με χρήση GAI

Η Εικόνα 50 δείχνει το εύρος του βρόχου δημιουργίας διεργασιών. Σε αυτή την περίπτωση, ο Γεννήτορας Σεναρίων περιλαμβάνει τρεις διαφορετικούς παράγοντες, οι οποίοι διαμορφώνουν την προτροπή εισόδου στο LLM, το κεντρικό δομικό στοιχείο του Δημιουργού Σεναρίων. Οι πληροφορίες που προέρχονται από τον αναλυτή AML συνδυάζονται με τη Προτροπή Δημιουργίας BPMN, ένα μήνυμα που ενημερώνει ρητά το LLM να συμμορφώνεται με το πρότυπο BPMN όταν το δημιουργεί σε μορφή XML. Το τελικό στοιχείο της προτροπής εισόδου είναι η Διορθωτική Προτροπή, η οποία παρέχεται από έναν ανθρώπινο επόπτη και υποδεικνύει συγκεκριμένες απαιτήσεις ή παρέχει διορθώσεις ή προτάσεις αλλαγών σχετικά με το BPMN που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη επανάληψη (Transition- TR 1). Στο TR 2, το LLM παράγει ένα απλό αρχείο BPMN, το οποίο διαβιβάζεται στον Συντονιστή Διεργασιών για επικύρωση και προεπεξεργασία. Ακολουθεί η προσομοίωση (TR 3), η οποία περιγράφει με ακρίβεια τη διαδικασία από την αρχή έως το τέλος, καταγράφοντας την κίνηση των μηχανημάτων και άλλων παραγόντων, όπως ρομπότ και ανθρώπινο προσωπικό, καθώς και ενημερώνοντας συνεχώς τα σχετικά

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής σήματα στο PLC και σε άλλους εμπλεκόμενους ελεγκτές (TR 4). Ένας μηχανικός διεργασιών εποπτεύει την προσομοίωση καθώς αυτή εξελίσσεται. Ο μηχανικός, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μπορεί να αποφασίσει ανά πάσα στιγμή ότι η διαδικασία παράγει το επιθυμητό αποτέλεσμα και μπορεί να επιλέξει να τροποποιήσει τη Διορθωτική Προτροπή και να δημιουργήσει ένα ενημερωμένο BPMN (TR 5). Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επικυρωθούν από τον μηχανικό, η διαδικασία αποθηκεύεται στον Συντονιστή Διεργασιών, όπου είναι διαθέσιμη για εκτέλεση στο φυσικό περιβάλλον.

2.6.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Η τελική έκδοση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία και εγκατάσταση του ΨΔ ενός αντίγράφου-μικρογραφίας 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 51.



Εικόνα 51: Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής και Ψηφιακού διδύμου

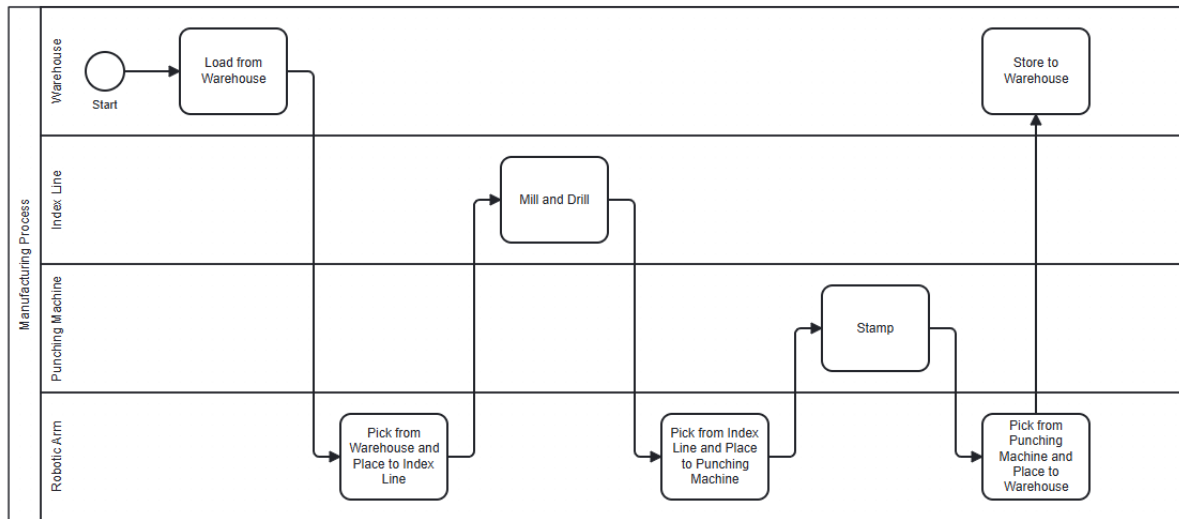
Για τις ανάγκες των δοκιμών, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.



Εικόνα 52: Σενάριο εκτέλεσης Ψηφιακού Διδύμου

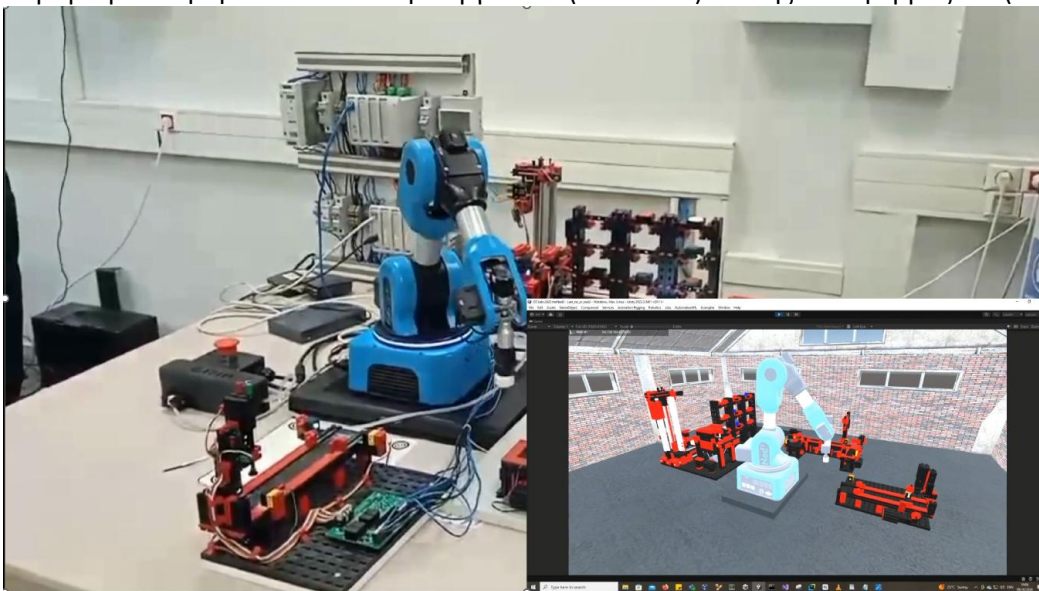
Η διαδικασία αποτυπώθηκε στο παρακάτω BPMN διάγραμμα:

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



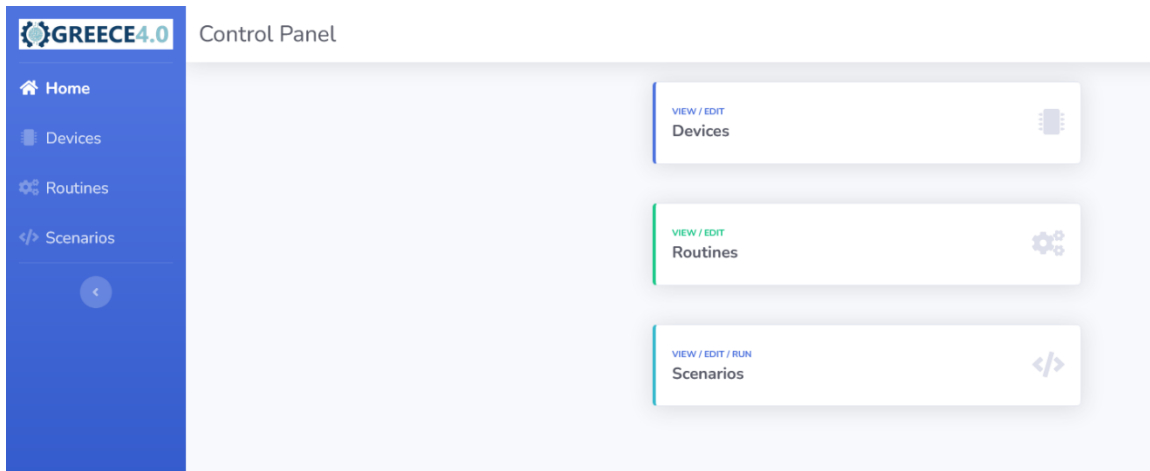
Εικόνα 53: Παραγωγική διαδικασία αποτυπωμένη σε BPMN

Στη συνέχεια εκτελέστηκε η διαδικασία δημιουργίας του Ψηφιακού Διδύμου (Εικόνα 51), συμπεριλαμβάνοντας τη δημιουργία του εικονικού αντιγράφου της γραμμής παραγωγής, την αυτόματη παραμετροποίηση του Συντονιστή Διεργασιών (Εικόνα 55) και της πλατφόρμας IoT (Εικόνα 56).

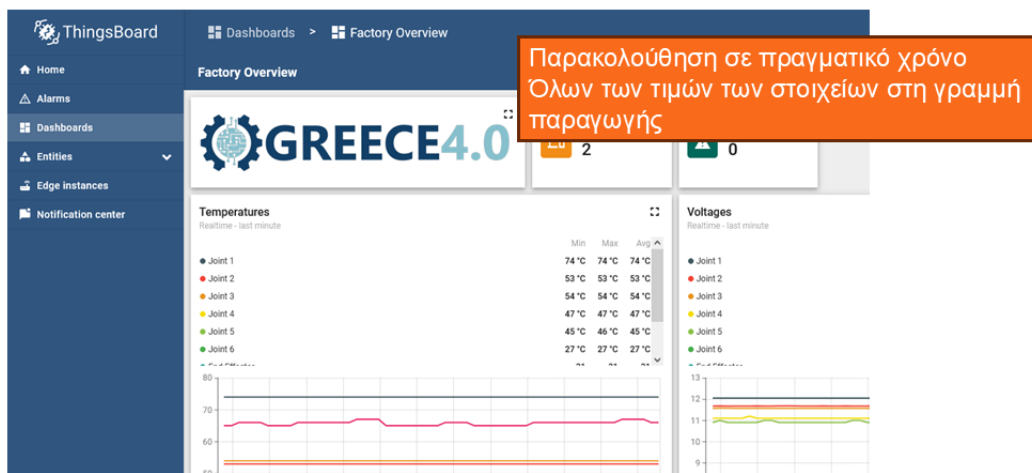


Εικόνα 54: Παρακολούθηση λειτουργίας της πραγματικής γραμμής παραγωγής μέσω του Ψηφιακού Διδύμου

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 55 Γραφική διεπαφή χρήστη του Ψηφιακού Διδύμου



Εικόνα 56 Παρακολούθηση εκτέλεσης σεναρίου μέσω Πλατφόρμας IoT

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

2.7.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η παρούσα λύση βασίζεται σε δύο κύριους άξονες: Την σχεδίαση και υλοποίηση της πύλης συλλογή δεδομένων, η οποία λαμβάνει πληροφορίες μέσω διαφόρων βιομηχανικών πρωτοκόλλων, και την ανάπτυξη της IIoT πλατφόρμας, η οποία είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία, απεικόνιση και διαχείριση των δεδομένων αυτών. Επιπλέον, έχει αναπτυχθεί σχεσιακή βάση δεδομένων (SQL) για την αποθήκευση των καταγεγραμμένων μετρήσεων. Τα βασικά στάδια του έργου διαμορφώθηκαν ως εξής:

- Υλοποίηση προγραμμάτων συλλογής δεδομένων: Στο στάδιο αυτό αναπτύχθηκαν εφαρμογές που επιτρέπουν την επικοινωνία με βιομηχανικές συσκευές μέσω ετερογενών πρωτοκόλλων, όπως MQTT και OPC UA. Ο στόχος είναι αδιάλειπτη και έγκυρη μεταφορά δεδομένων προς την πύλη.
- Ανάπτυξη πύλης συλλογής δεδομένων: Η πύλη λειτουργεί ως ενδιάμεσος μηχανισμός μεταφοράς και επεξεργασίας δεδομένων μεταξύ των συσκευών πεδίου (field devices) και της κεντρικής πλατφόρμας. Σχεδιάστηκε ώστε να υποστηρίζει επικοινωνία πολλαπλών πρωτοκόλλων, επεξεργασία σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και διατήρηση της ακεραιότητας των δεδομένων.
- Υλοποίηση κεντρικής πλατφόρμας IIoT: Η πλατφόρμα υλοποιήθηκε με τεχνολογίες cloud και edge computing, παρέχοντας ολοκληρωμένες δυνατότητες οπτικοποίησης, αποθήκευσης,

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

επεξεργασίας και διαχείρισης των συλλεγόμενων δεδομένων. Ενσωματώνει διαδραστικά dashboards, συστήματα ειδοποιήσεων και αναλυτικά εργαλεία.

- Διεξαγωγή δοκιμαστικών σεναρίων: Μέσα από σενάρια προσομοίωσης και ελεγχόμενες πειραματικές συνθήκες, αξιολογήθηκε η ορθότητα και η λειτουργικότητα της πλατφόρμας, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία της σε πραγματικές συνθήκες παραγωγής.
- Οριστική βελτιστοποίηση της λύσης: Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, προχώρησε η τελική φάση βελτιώσεων, που περιλάμβανε ενίσχυση της απόδοσης, της ασφάλειας, της επεκτασιμότητας, αλλά και της εργονομίας της διεπαφής.

Η ολοκλήρωση των παραπάνω σταδίων οδήγησε στη διαμόρφωση μια πλήρως λειτουργικής και τεχνολογικά ώριμης λύσης, ικανής να προσαρμόζεται σε διαφορετικά περιβάλλοντα και ανάγκες του βιομηχανικού χώρου. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η τελική αρχιτεκτονική της λύσης, όπως αυτή διαμορφώθηκε μετά την ολοκλήρωση της υλοποίησης και τις απαιτούμενες δοκιμές.

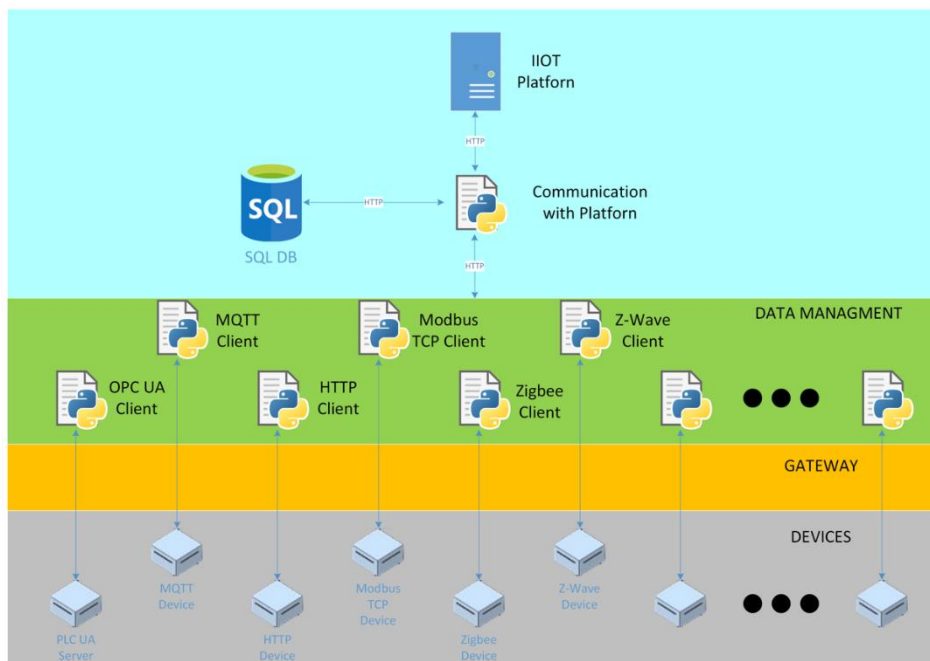
2.7.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Στην τελική υλοποίηση της λύσης, έχουν ολοκληρωθεί και τεθεί σε λειτουργία τα δύο κύρια υποσυστήματα: η πλατφόρμα IIoT και η πύλη συλλογής δεδομένων. Για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με τη χρήση βιομηχανικού λογικού ελεγκτή (PLC), ο οποίος αποστέλλει δεδομένα προς την πλατφόρμα μέσω διαφορετικών βιομηχανικών πρωτοκόλλων.

Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί ενδιάμεσα λογισμικά-γέφυρες που λαμβάνουν τα δεδομένα από κάθε πρωτόκολλο ξεχωριστά και τα προωθούν προς μία κεντρική εφαρμογή, υπεύθυνη για την ορθή εισαγωγή τους στη βάση της πλατφόρμας. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η ενιαία μορφοποίηση και η σταθερή ροή δεδομένων από το πεδίο προς το σύστημα ανάλυσης.

Η IIoT πλατφόρμα έχει εγκατασταθεί σε εξυπηρετητή με λειτουργικό Linux, με πλήρη υποστήριξη για λειτουργεία και σε εικονικό περιβάλλον (Virtual Machine), εφόσον απαιτηθεί. Έχει αποδοθεί μοναδικό domain name και έχει καταχωρηθεί σε δημόσια DNS, επιτρέποντας την απομακρυσμένη πρόσβαση από οποιοδήποτε σημείο σε σύνδεση στο διαδίκτυο.

Τα εργαλεία και οι υπηρεσίες συλλογής δεδομένων μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από τον εξυπηρετητή της πλατφόρμας, φιλοξενούμενα σε ξεχωριστά μηχανήματα. Η επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων γίνεται μέσω ασφαλών διαύλων δικτύου, καθιστώντας την λύση ευέλικτη, κατανεμημένη και επεκτάσιμη.



Εικόνα 57 - Αρχιτεκτονική Λύσης IIoT

2.7.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

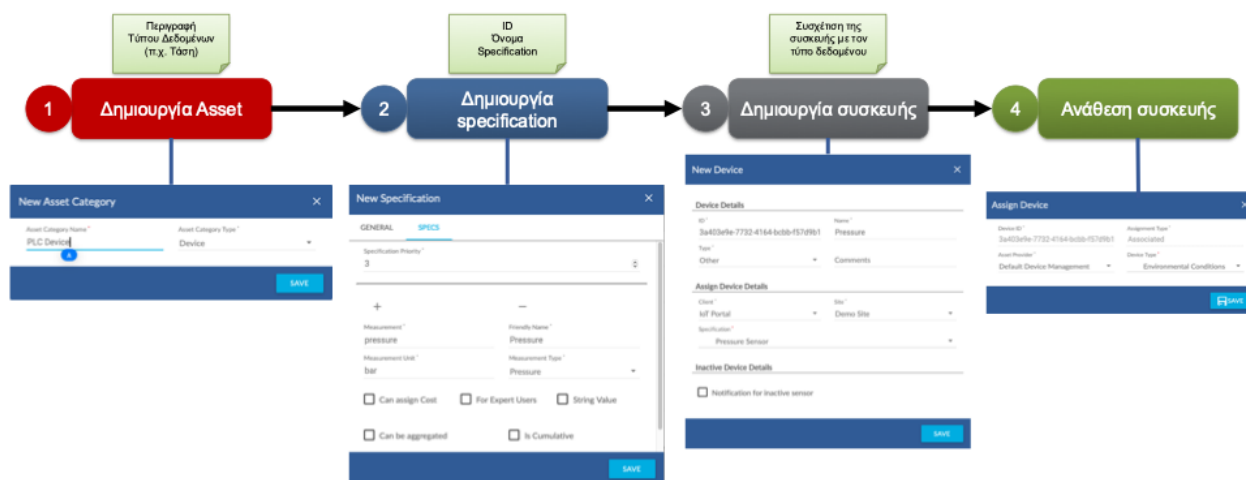
Σε συνέχεια της ενδιάμεσης έκδοσης η τελική μορφή της πλατφόρμας ενσωματώνει όλες τις βασικές λειτουργίες που είχαν παρουσιαστεί, προσφέροντας ταυτόχρονα νέα, πιο δυναμικά και δυναμικά εργαλεία διαχείρισης, εποπτείας και απεικόνισης δεδομένων. Η πλατφόρμα συνεχίζει να υποστηρίζει:

- Επίπεδα πρόσβασης ανά χρήστη, με προσαρμοσμένα δικαιώματα για προβολή, διαχείριση συσκευών ή τροποποίηση του συστήματος.
- Διαλειτουργικότητα μέσω υποστήριξης πρωτοκόλλων όπως MQTT, OPC UA και Modbus, καθώς και RESTful APO για διασύνδεση με εξωτερικά συστήματα όπως ERP/MES.
- Αρχιτεκτονική μικροϋπηρεσιών για ευκολία στην συντήρηση και επέκταση.
- Βάση δεδομένων Big Data με δυνατότητα αποθήκευσης και ταχύτητα ανάκτησης μεγάλων όγκων πληροφορίας.
- Εξαγωγή δεδομένων σε διάφορες μορφές (CSV, JSON), καθώς και εργαλεία δημιουργίας αναφορών.

2.7.3.1 Διαδικασία προσθήκης συσκευών

Η προσθήκη και διαχείριση νέων συσκευών γίνεται πλέον μέσα από ένα καθοδηγούμενο περιβάλλον τεσσάρων βημάτων.

1. **Δημιουργία Asset:** Ορισμός της γενικής οντότητας (π.χ. μηχανή, σταθμός, υποσύστημα) στην οποία θα ενταχθεί η συσκευή.
2. **Δημιουργία Specification:** Καθορισμός των χαρακτηριστικών και των μεταβλητών που θα παρακολουθούνται από την συσκευή (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, στάθμη).
3. **Δημιουργία συσκευής:** Δημιουργία της ψηφιακής αναπαράστασης της φυσικής συσκευής στην πλατφόρμα.
4. **Ανάθεση συσκευής:** Αντιστοίχιση της συσκευής στο κατάλληλο Asset και ενεργοποίηση της για λήψη δεδομένων.



Εικόνα 58 – Διαδικασία Προσθήκης Συσκευών

2.7.3.2 Δυναμικός Πίνακας Ελέγχου (Dashboard)

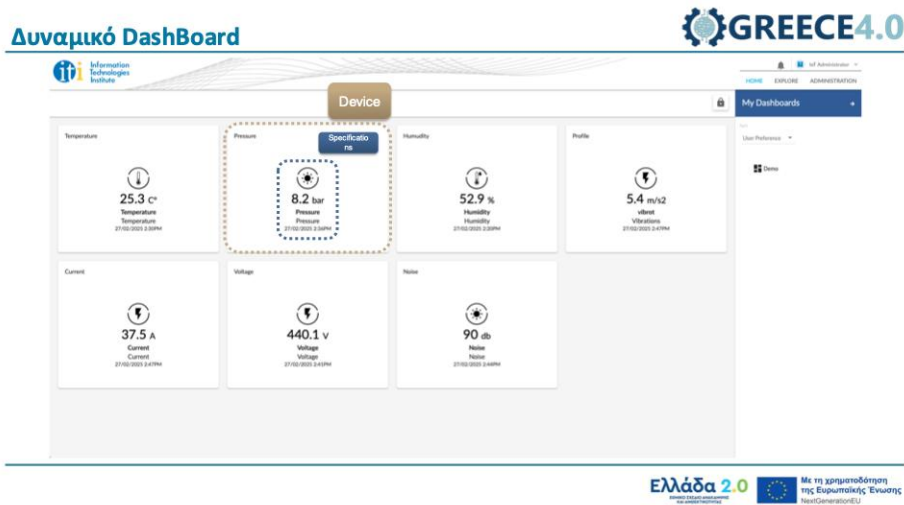
Ένα από τα σημαντικότερα νέα χαρακτηριστικά είναι η δυνατότητα δημιουργίας προσαρμοσμένων dashboards από κάθε χρήστη. Ο χρήστης μπορεί να:

- Επιλέξει ποια δεδομένα θέλει να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο
- Εισάγει widgets για κάθε μεταβλητή, με επιλογές όπως:
 - Numeric Widget για άμεση τιμή
 - Live Chart Widget για διαρκή παρακολούθηση σε γραφική μορφή

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Bar Chart Widget, Pie Chart Widget, Bubble Widget κ.α. για πιο σύνθετη ή συγκριτική απεικόνιση.

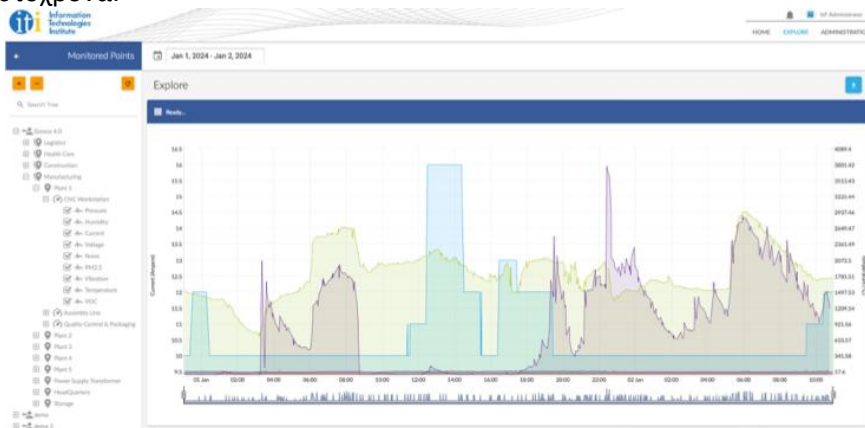
Η διάταξη των widget είναι πλήρως παραμετροποιήσιμη, προσφέροντας ένα εργαλείο εποπτείας που προσαρμόζεται απόλυτα στις ανάγκες κάθε χρήστη και περίπτωσης.



Εικόνα 59 Δυναμικός Πίνακας Ελέγχου (Dashboard)

2.7.3.3 Ιστορική Ανάλυση μέσω Explore Tab

Μέσα από την καρτέλα Explore ο χρήστης έχει πρόσβαση σε χρονοσειρές τιμών από μία οι περισσότερες πηγές, με δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος και προβολή πολλαπλών μεταβλητών ταυτόχρονα.



Εικόνα 60 Ιστορική Ανάλυση μέσω Explore Tab

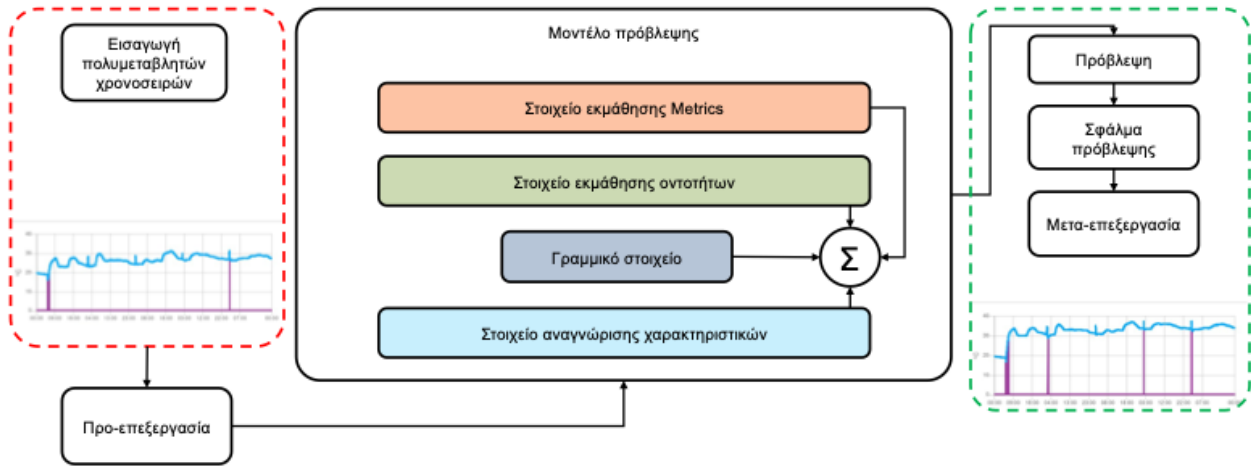
2.7.3.4 Εφαρμογή μοντέλων μηχανικής μάθησης

Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της πλατφόρμας, αναπτύχθηκαν και ενσωματώθηκαν μοντέλα μηχανικής μάθησης τα οποία αξιοποιούν τα ιστορικά δεδομένα από τους αισθητήρες για δύο βασικές λειτουργίες: Πρόβλεψη των μελλοντικών μετρήσεων και ανίχνευση ανωμαλιών.

Τα μοντέλα εκπαιδεύτηκαν με χρήση ιστορικών δεδομένων από μεταβλητές όπως θερμοκρασία, πίεση, τάση και ένταση ενέργειας. Η πρόβλεψη τιμών δίνει την δυνατότητα για προληπτική συντήρηση και προβλεπτικό έλεγχο διεργασιών, βελτιώνοντας την συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Οι ανωμαλίες που εντοπίζονται μπορούν να οδηγήσουν σε ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο προς τον χρήστη και αυτόματη σήμανση των σημείων στον dashboard ή τις χρονοσειρές.

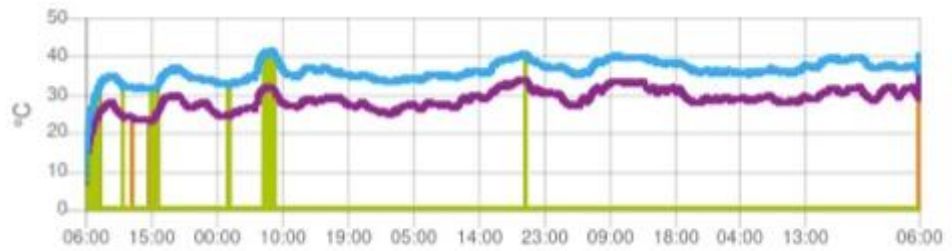
Μια γραφική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του μοντέλου πρόβλεψης καθώς και τα και κάποια αποτελέσματα των μοντέλων παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

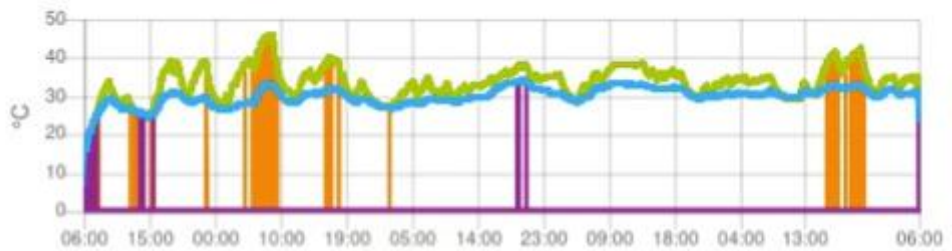


Εικόνα 61 Μοντέλο Πρόβλεψης

Θερμοκρασία 1
 Θερμοκρασία 2
 Ανωμαλία 1
 Ανωμαλία 2



Θερμοκρασία 1
 Θερμοκρασία 2
 Ανωμαλία 1
 Ανωμαλία 2



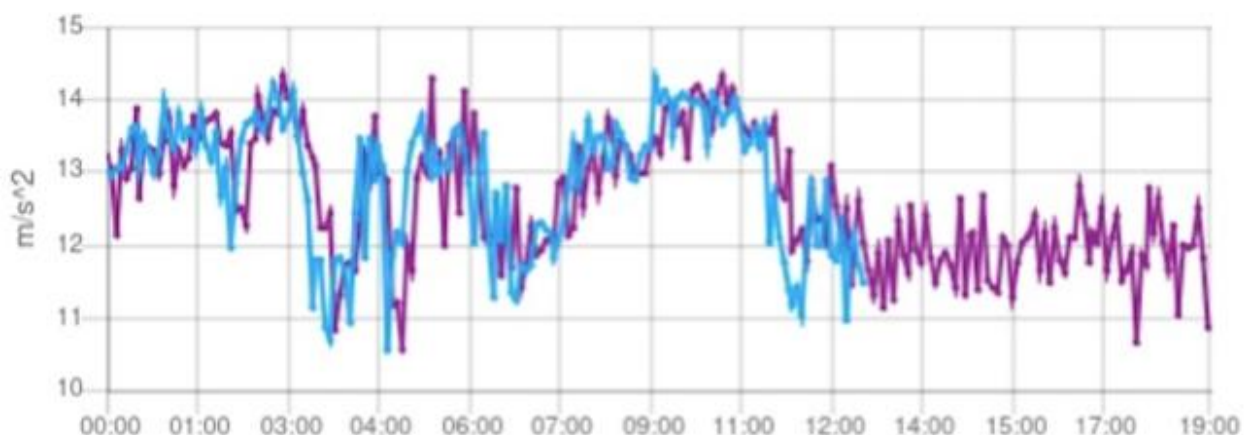
Εικόνα 62 – Ανίχνευση Ανωμαλιών

Θερμοκρασία Πρόβλεψη



Εικόνα 63 – Πρόβλεψη θερμοκρασίας

Δόνηση Πρόβλεψη



Εικόνα 64 Πρόβλεψη Δόνησης

2.7.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Η τελική έκδοση την λύσης περιλαμβάνει πλήρως λειτουργική πλατφόρμα IIoT με ενσωματωμένη πύλη συλλογής δεδομένων, σύστημα αποθήκευσης, δυνατότητες δυναμικής οπτικοποίησης, καθώς και υπηρεσίες μηχανικής μάθησης για πρόβλεψη και ανίχνευση ανωμαλιών. Το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία και αξιολογήθηκε μέσω ενός ολοκληρωμένου παραδείγματος χρήσης, με χρήση προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC) και συνθετικών, αλλά ρεαλιστικών, δεδομένων αισθητήρων. Σε αυτό το σενάριο ο ελεγκτής λαμβάνει τιμές από εισόδους που προσομοιώνουν πραγματικούς βιομηχανικούς αισθητήρες. Οι τιμές αποθηκεύονται εσωτερικά και αποστέλλονται στην πλατφόρμα μέσω του πρωτοκόλλου OPC-UA. Οι μεταβλητές που καταγράφηκαν περιλαμβάνουν:

- Πίεση Αέρα
- Θερμοκρασία
- Υγρασία Περιβάλλοντος
- Ένταση Ρεύματος
- Τάση Ρεύματος
- Επίπεδα Θορύβου
- Επίπεδα Δόνησης
- Ποιότητα Αέρα

Η πλατφόρμα λαμβάνει τα δεδομένα και τα οργανώνει βάσει τοποθεσίας και σταθμών εργασίας. Για το παράδειγμα, δημιουργήθηκε η εικονική δομή Greece 4.0, με επιμέρους περιοχές όπως Manufacturing, Logistics, Health Care, κ.ά. Οι αισθητήρες καταχωρήθηκαν στη μονάδα CNC Workstation, της περιοχής Manufacturing.

Οι τιμές απεικονίστηκαν μέσω του δυναμικού πίνακα ελέγχου με διαφορετικά widgets (π.χ. live charts, αριθμητικά πλαίσια, συγκριτικά γραφήματα κ.ά.).

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

2.8.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η συγκεκριμένη λύση αποτελείται από τρία υποσυστήματα, εκ των οποίων τα δύο αφορούν εφαρμογές και το τρίτο την υποδομή Industrial IoT, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η ανταλλαγή πληροφοριών

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

μεταξύ των εφαρμογών. Η διαδικασία ανάπτυξης ξεκινά με τη δημιουργία του βασικού συστήματος Industrial IoT, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα της συλλογής και διαχείρισης δεδομένων. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται η εφαρμογή XR-Viewer και ακολουθεί η διασύνδεσή της με την υποδομή IoT, ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση και αξιοποίηση των συλλεγόμενων δεδομένων. Παράλληλα, δημιουργούνται νέες βάσεις δεδομένων για την αποθήκευση αρχείων και σχετικών πληροφοριών που παράγονται από τη λειτουργία του συστήματος. Στο επόμενο στάδιο υλοποιείται η εφαρμογή XR-Creator, η οποία υποστηρίζει τη δημιουργία και διαχείριση ψηφιακού περιεχομένου, ενώ ενσωματώνονται πρότυπα ψηφιακού διδύμου για τη συσχέτιση του φυσικού και του ψηφιακού συστήματος. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την εκτέλεση δοκιμαστικών σεναρίων μέσω της ολοκληρωμένης λύσης και τη βελτιστοποίηση της τελικής υλοποίησης, μέσω αξιολόγησης των αποτελεσμάτων και ανασχεδιασμού επιμέρους λειτουργιών όπου απαιτείται.

Τα δύο βασικά κομμάτια ανάπτυξης της λύσης είναι η εφαρμογή XR-Creator, η οποία επιτρέπει την δημιουργία εικονικών σεναρίων, και η εφαρμογή XR-Viewer η οποία αναπαράγει τα εν λόγω σεναρία σε συσκευές επαυξημένης πραγματικότητας. Εκτός από τις δύο βασικές εφαρμογές χρειάζεται η δημιουργία μίας πρότυπης βιομηχανικής υποδομής με σκοπό την προσομοίωση ροών δεδομένων καθώς και η δημιουργία βάσεων δεδομένων για την αποθήκευση αυτών των στοιχείων. Πιο αναλυτικά στο χρονοδιάγραμμα περιγράφονται τα παρακάτω στάδια

- Δημιουργία βασικού συστήματος Industrial IoT: Το σύστημα πρέπει να προσομοιώνει τις ροές δεδομένων που υπάρχουν σε βιομηχανικά περιβάλλοντα με σκοπό να παρέχονται ρεαλιστικά δεδομένα στα υπόλοιπα συστήματα. Με σκοπό την αύξηση της ποικιλίας των δεδομένων, κατά την ανάπτυξη του συγκεκριμένου συστήματος θα δοθεί σημασία στην χρήση βιομηχανικών προτύπων μετάδοσης πληροφορίας και όχι στην χρήση βιομηχανικού εξοπλισμού καθώς αυτός παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία στην ελληνική βιομηχανία.
- Δημιουργία XR-Viewer: Η εφαρμογή XR-Viewer θα επιτρέπει στους χρήστες να αναπαράγουν τα σεναρία μέσα από συσκευές επαυξημένης πραγματικότητας. Οι χρήστες θα μπορούν να δουν όλα τα βήματα της διαδικασίας, καθώς και να καταναλώσουν το οπτικοακουστικό υλικό που έχει συσχετιστεί με το εκάστοτε σενάριο. Κάθε σενάριο περιγράφεται σε δύο JSON αρχεία, το ένα περιγράφει τις διαδικασίες, ενώ το άλλο έχει τις πληροφορίες του οπτικοακουστικού υλικού.
- Διασύνδεση IIoT με την εφαρμογή XR-Viewer: Μέσα από την διασύνδεση με το IIoT σύστημα η εφαρμογή XR-Viewer θα παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να ενσωματώσει δεδομένα από πραγματικές πηγές μέσα στα σεναρία εκπαίδευσης.
- Δημιουργία βάσεων δεδομένων: Για την σωστή λειτουργία του συστήματος πρέπει να δημιουργηθούν βάσεις δεδομένων τόσο για τα σεναρία που θα δημιουργούν οι χρήστες όσο και για το οπτικοακουστικό υλικό που θα θέλουν να προσθέσουν σε αυτά.
- Δημιουργία XR-Creator: Η εφαρμογή XR-Creator επιτρέπει στον χρήστη την δημιουργία εικονικών σεναρίων μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος. Στο περιβάλλον του XR-Creator, ο χρήστης μπορεί να περιγράψει το εκάστοτε σενάριο με την χρήση κάποιων ειδικά διαμορφωμένων nodes. Μέσα από το εύχρηστο και απλό περιβάλλον οι χρήστες θα μπορούν να δημιουργούν τα σεναρία εκπαίδευσης στα οποία θα μπορούν να ενσωματώσουν οπτικοακουστικό υλικό όπως αρχεία κειμένου, εικόνες, βίντεο και τρισδιάστατα μοντέλα.
- Εφαρμογή προτύπων ψηφιακού διδύμου στην περιγραφή των επιμέρους στοιχείων: Ακολουθώντας τα πρότυπα οντοτήτων των ψηφιακών διδύμων, θα δημιουργηθεί ένα ενδιάμεσο επίπεδο στο οποίο όλες οι πληροφορίες θα ομογενοποιούνται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη επέκταση του συστήματος σε επιπλέον ροές δεδομένων ενώ παράλληλα θα διασφαλίζει την σταθερή λειτουργία του συστήματος.
- Εκτέλεση δοκιμαστικών σεναρίων: Μετά την ολοκλήρωση των συστημάτων θα εκτελεστούν κάποια δοκιμαστικά σεναρία, σε εργαστηριακό περιβάλλον, στα οποία θα γίνεται η δημιουργία των σεναρίων και η κατανάλωσή τους μέσα από τις αντίστοιχες εφαρμογές. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό των όποιων διορθώσεων χρίζει το σύστημα τόσο ως προς την ευχρηστία όσο και ως προς την σταθερότητά του.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Βελτιστοποίηση τελικής λύσης: Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμαστικών σεναρίων θα γίνει η τελική βελτιστοποίηση του συστήματος η οποία θα διορθώνει ελαττώματα που αναγνωρίστηκαν.

2.8.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Οι εφαρμογές **XR-Creator** και **XR-Viewer** αναπτύχθηκαν εντός ενός κοινού Unity Project, ωστόσο η εσωτερική τους δομή διαχωρίζεται σε τρία μέρη: **Common** (κοινά στοιχεία), **Creator** και **Viewer**. Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός υλοποιήθηκε με στόχο τη σωστή ανάπτυξη και τη διευκόλυνση της μελλοντικής επεκτασιμότητας της εφαρμογής.

Κοινά Στοιχεία (Common)

Στο κοινό τμήμα περιλαμβάνονται τα εξής:

1. **ServerManager**: Κλάση που υλοποιεί το πρότυπο Singleton και συγκεντρώνει όλες τις συναρτήσεις για την αλληλεπίδραση με τον server, αξιοποιώντας coroutines και callbacks για την περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων.
2. **Media**: Abstract κλάση με όλες τις βασικές πληροφορίες και λειτουργίες σχετικές με τα αρχεία που αποθηκεύονται στον server, επιτρέποντας την εύκολη προσθήκη νέων τύπων αρχείων στο μέλλον.
3. **SoundMedia**: Κλάση για τη διαχείριση αρχείων ήχου (mp3, wav).
4. **VideoMedia**: Κλάση για τη διαχείριση αρχείων βίντεο (mp4).
5. **ModelMedia**: Κλάση για τη διαχείριση τρισδιάστατων μοντέλων (fbx).
6. **DocumentMedia**: Κλάση για τη διαχείριση αρχείων κειμένου (pdf).
7. **ImageMedia**: Κλάση για τη διαχείριση εικόνων (png, jpg, jpeg).

Για την εφαρμογή XR-Creator έχουν δημιουργηθεί οι παρακάτω κλάσεις:

1. **ResourcesManager**: Διαχειρίζεται τα στοιχεία των Media, παρέχοντας λειτουργίες δημιουργίας, φόρτωσης, διαγραφής και προβολής.
2. **UIManager**: Διαχειρίζεται τα γραφικά στοιχεία του UI και συνδέει τα UI στοιχεία με τις λειτουργίες των managers.
3. **GraphHandler**: Υπεύθυνη για τη λειτουργία του γραφήματος (δημιουργία, διαγραφή, ένωση κόμβων).
4. **GraphSerializer**: Παρέχει μεθόδους για τη δημιουργία, αποθήκευση και ανάγνωση των αρχείων JSON που περιγράφουν τις διαδικασίες (procedures).
5. **Node**: Abstract κλάση που περιέχει τη λογική διαχείρισης των γραφικών στοιχείων των κόμβων, αποτελώντας τη βάση για εξειδικευμένες κλάσεις κόμβων.
6. **Connection**: Βασική κλάση για τη σύνδεση κόμβων μεταξύ τους. Υποστηρίζει την περαιτέρω εξειδίκευση μέσω abstract μεθόδων.
7. **OperationNode, StepNode, ActionNode**: Κλάσεις που κληρονομούν από το Node και προσθέτουν επιπλέον πληροφορίες για τα operation, step, και action αντίστοιχα.
8. **MediaUI**: Abstract κλάση για την απεικόνιση γραφικών στοιχείων κάθε τύπου Media στο UI.

Για την εφαρμογή XR-Viewer έχουν δημιουργηθεί οι παρακάτω κλάσεις:

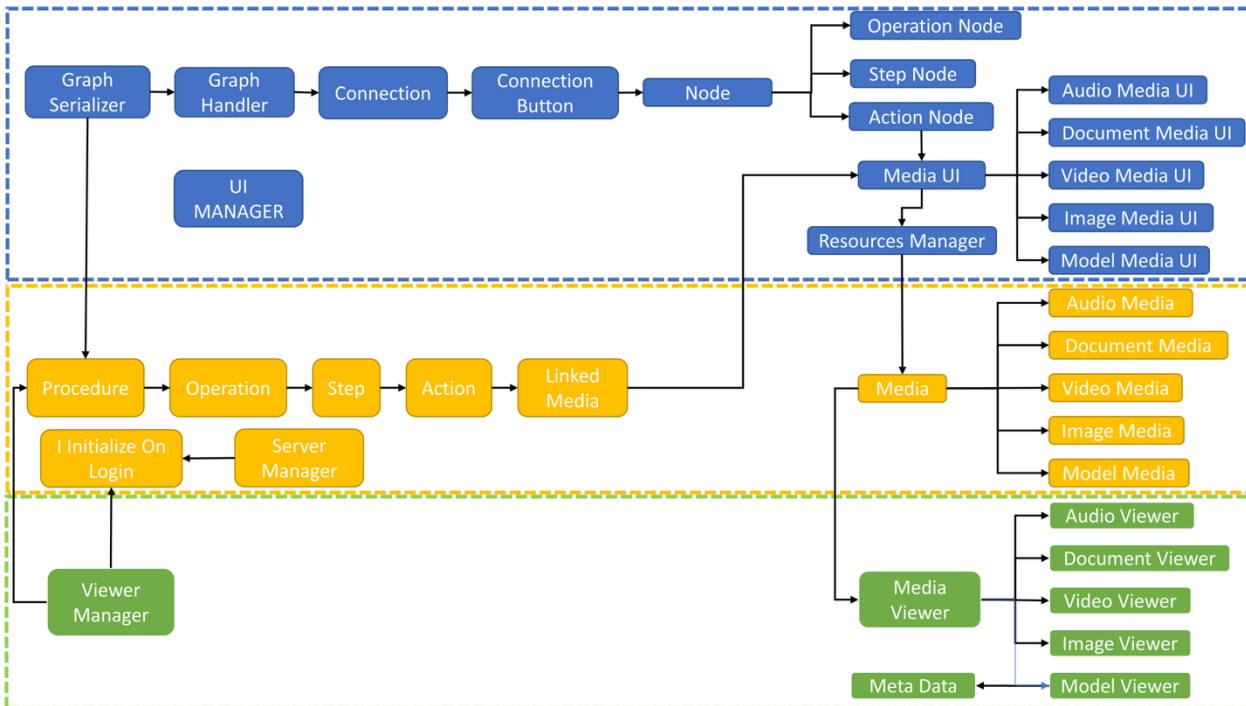
1. **ViewerManager**: Κεντρική κλάση ελέγχου της εφαρμογής, υπεύθυνη για τη φόρτωση και την προβολή των διαδικασιών και των media.
2. **MediaViewer**: Abstract κλάση για τη φόρτωση και δημιουργία στοιχείων Media. Κάθε τύπος media έχει δική του κλάση που εξειδικεύει τις λειτουργίες (π.χ. αναπαραγωγή βίντεο, προβολή PDF).

Για κάθε τύπο media δημιουργούνται:

- Μία βασική κλάση με τις κύριες πληροφορίες.
- Μία κλάση για το Creator (MediaUI).
- Μία κλάση για το Viewer (MediaViewer).

Στο παρακάτω απλοποιημένο διάγραμμα κλάσεων φαίνονται οι βασικές κλάσεις όλου του project.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 65 Απλοποιημένο διάγραμμα κλάσεων

2.8.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Ανάλυση XR-Creator

Δημιουργία διαδικασίας

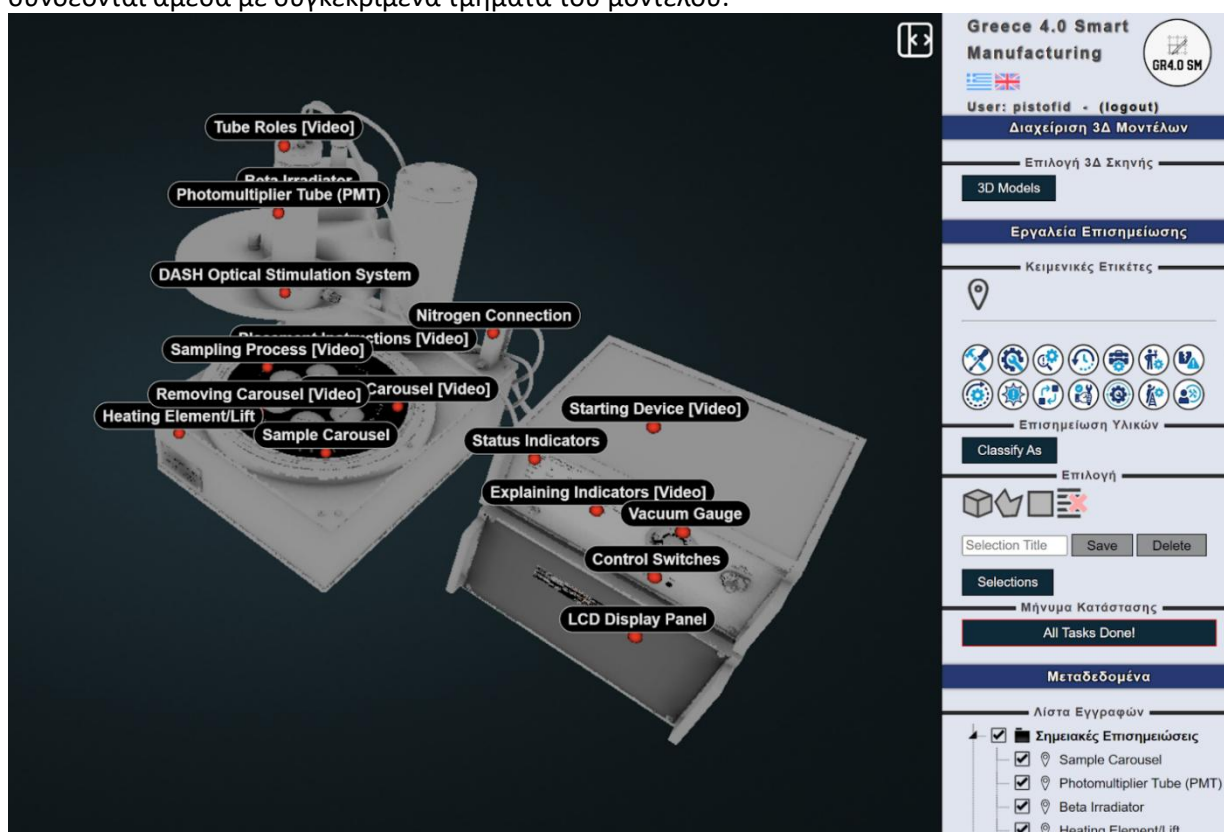
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην εφαρμογή XR-Creator ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει-περιγράψει τις διαδικασίες που θέλει μέσω διαγραμμάτων κόμβων. Στο περιβάλλον, μετά την εισαγωγή στο λογαριασμό του, ο χρήστης μπορεί να εισάγει και να παραμετροποιήσει τρία ήδη κόμβων, κόμβος λειτουργιών, κόμβος βήματος και κόμβος δράσης. Έπειτα μπορεί να τους συνδέσει και να τους αριθμήσει με σκοπό να περιγραφεί σωστά η διαδικασία. Τέλος, μόνο στους κόμβους δράσης, ο χρήστης μπορεί να προσθέσει οπτικοακουστικό υλικό. Μετά το τέλος αυτής της διαδικασίας μπορεί να ονομάσει και να ανεβάσει την διαδικασία στον server έτσι ώστε να είναι διαθέσιμη και στην εφαρμογή XR-Viewer.

Προσθήκη και διαχείριση οπτικοακουστικού υλικού

Στην εφαρμογή XR-Creator γίνεται η διαχείριση του οπτικοακουστικού υλικού. Ο χρήστης μπορεί να ανεβάσει αρχεία 5 τύπων: εικόνες, βίντεο, αρχεία κειμένου, τρισδιάστατα μοντέλα και αρχεία ήχου. Αυτή η διαδικασία πρέπει να γίνεται πριν την δημιουργία της διαδικασίας για να εμφανίζονται όλα κατά την δημιουργία του γραφήματος. Το οπτικοακουστικό υλικό δεν αναφέρεται σε μία διαδικασία, αντίθετα, το οπτικοακουστικό υλικό είναι καθολικό για κάθε χρήστη. Αυτό γίνεται για την διευκόλυνση του χρήστη σε περίπτωση που υπάρχει κοινό υλικό για πολλές διαδικασίες.

Στην περίπτωση των τρισδιάστατων μοντέλων, μπορούν να δημιουργηθούν μέσω του Annotator επιπλέον πληροφορίες. Ο Annotator είναι μία διαδικτυακή εφαρμογή η οποία προσφέρει δυνατότητες φωτο-ρεαλιστικής απεικόνισης 3D ψηφιακών αντιγράφων βιομηχανικού εξοπλισμού, με στόχο την ακριβή και λεπτομερή αναπαράστασή τους. Η λειτουργία αυτή βασίζεται στην τεχνολογία Potree, η οποία αξιοποιείται για την αποτελεσματική διαχείριση και απόδοση των 3D μοντέλων σε μορφή point clouds με υψηλή ποιότητα και πολυπλοκότητα. Ο σχεδιασμός του συστήματος στοχεύει στη διατήρηση της πλήρους ανάλυσης του 3D μοντέλου, ώστε να επιτρέπει στους χρήστες να παρατηρούν με ακρίβεια κάθε λεπτομέρεια, συμπεριλαμβανομένων των επιμέρους εξαρτημάτων, των συνδέσεων και των λειτουργικών μερών του εξοπλισμού. Το εργαλείο υποστηρίζει τον εμπλουτισμό του 3D μοντέλου με σημασιολογικά μεταδεδομένα που αποτυπώνουν σημεία ενδιαφέροντος για εκπαιδευτικούς σκοπούς και υποστήριξη εργασιών σχετικών με τον υπό μελέτη εξοπλισμό. Μέσω ενός κατάλληλα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής διαμορφωμένου συνόλου κωδικοποιημένων επισημειώσεων/annotations, που περιλαμβάνει εικονίδια και ετικέτες, είναι εφικτή η αναπαράσταση διαφορετικών τύπων πληροφοριών. Η διεπαφή επισημείωσης επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση και διαχείριση των σημάνσεων στο 3D μοντέλο. Υποστηρίζονται βασικές ενέργειες διαχείρισης, όπως προσθήκη, μετακίνηση και αφαίρεση σημείων, καθώς και η δυνατότητα ενημέρωσης των σχετικών metadata. Η προτεινόμενη λειτουργία ενισχύει σημαντικά τη χρησιμότητα του ψηφιακού αντιγράφου ως μέσου εκπαίδευσης και υποστήριξης, επιτρέποντας στους χρήστες να κατανοούν άμεσα τη χωρική κατανομή των τμημάτων του εξοπλισμού, καθώς και του ρόλου τους στις επιμέρους διαδικασίες που απαιτούνται στο πλαίσιο συντήρησης, συναρμολόγησης και χρήσης. Το περιβάλλον χωρίζεται σε δύο κύρια τμήματα: (α) την 3D αναπαράσταση του εξοπλισμού και (β) το πλαινό πάνελ ελέγχου. Στο κεντρικό τμήμα της οθόνης εμφανίζεται το λεπτομερές 3D μοντέλο του εξοπλισμού με τα βασικά του στοιχεία και εξαρτήματα του να είναι σαφώς ορατά. Το πάνελ ελέγχου περιλαμβάνει διάφορες λειτουργίες για τη δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση επισημειώσεων που συνδέονται άμεσα με συγκεκριμένα τμήματα του μοντέλου.



Εικόνα XXX: 3D περιβάλλον της εφαρμογής Annotator.

Το σύστημα διαθέτει δυνατότητες επισημείωσης που επιτρέπουν στον χρήστη να εμπλουτίσει το 3D ψηφιακό αντίγραφο με σημειακές επισημειώσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποιημένα εικονίδια. Αυτά επιλέγονται και τοποθετούνται στο επιθυμητό σημείο της γεωμετρίας του μοντέλου. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τη δημιουργία πλούσιου εκπαιδευτικού υλικού που συνδυάζει οπτικές ενδείξεις με συγκεκριμένες θέσεις στον εξοπλισμό, διευκολύνοντας την κατανόηση των λειτουργιών και των απαιτήσεων από τους χρήστες.



Εικόνα 66 Εργαλεία της εφαρμογής Annotator

Βιβλιοθήκη Εικονιδίων Επισημείωσης:

1. **Σημεία Επισκευής** - Επισημαίνει περιοχές που συχνά χρειάζονται επισκευή ή αντικατάσταση εξαρτημάτων.
2. **Ρυθμίσεις Συστήματος** - Δηλώνει σημεία όπου απαιτούνται ρυθμίσεις παραμέτρων και βαθμονόμηση συστήματος.
3. **Κρίσιμα Σημεία Ελέγχου** - Επισημαίνει περιοχές που απαιτούν υποχρεωτικό έλεγχο πριν την έναρξη λειτουργίας.
4. **Προγραμματισμένες Ενέργειες** - Υποδεικνύει σημεία όπου εκτελούνται αυτόματες, χρονικά προγραμματισμένες λειτουργίες.
5. **Κιτ Εργαλείων Συντήρησης** - Επισημαίνει περιοχές όπου απαιτούνται συγκεκριμένα εργαλεία για τεχνική συντήρηση.
6. **Σημεία Ανθρώπινης Παρέμβασης** - Επισημαίνει περιοχές που απαιτούν χειρωνακτική παρέμβαση ή ρύθμιση από τον χειριστή.
7. **Εύθραυστα Εξαρτήματα** - Επισημαίνει περιοχές με εξαρτήματα που σπάνε εύκολα και χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή στο χειρισμό.
8. **Αυτόματη Επαναφορά Συστήματος** - Υποδεικνύει περιοχές όπου το σύστημα επαναφέρεται αυτόματα στην αρχική κατάσταση.
9. **Κεντρικά Σημεία Ελέγχου** - Υποδεικνύει περιοχές που αποτελούν κεντρικούς κόμβους για τον έλεγχο του συστήματος.
10. **Διαδικασίες Swap/Exchange** - Υποδεικνύει περιοχές όπου απαιτείται ανταλλαγή θέσεων ή στοιχείων του συστήματος.
11. **Πιστοποιημένες Εργασίες** - Δηλώνει περιοχές όπου οι εργασίες πρέπει να εκτελούνται από πιστοποιημένο προσωπικό.
12. **Αυτοδιάγνωση και Αυτοδιόρθωση** - Επισημαίνει εξαρτήματα με δυνατότητες αυτόματης διάγνωσης και διόρθωσης.
13. **Κάθετες Διαδικασίες Εγκατάστασης** - Δηλώνει σημεία όπου απαιτούνται εργασίες εγκατάστασης ή αποσυναρμολόγησης σε ύψος.
14. **Απαιτήσεις Εξειδίκευσης** - Υποδεικνύει σημεία που χρειάζονται εξειδικευμένο προσωπικό με τεχνικές γνώσεις.

Το εργαλείο επιτρέπει στον χρήστη να προσθέσει εμπλουτισμένο κειμενικό περιεχόμενο σε οποιοδήποτε σημείο του 3D μοντέλου. Το περιεχόμενο αυτό μπορεί να αποτελεί από ένα απλό κείμενο, μέχρι και ένα πλήρως μορφοποιημένο διαδικτυακό περιεχόμενο.

Τα παραγόμενα δεδομένα από τον Annotator μπορούν να εξαχθούν και να φορτωθούν ως μεταδεδομένα στα αρχεία μοντέλων στον XR-Creator εμπλουτίζοντας έτσι παραπάνω τις πληροφορίες περιγραφής της εκάστοτε διαδικασίας

Ανάλυση XR-Viewer

Η εφαρμογή XR-Viewer της τελικής έκδοσης αναπτύχθηκε για την πλατφόρμα του Quest. Μέσω του Quest ο χρήστης μπορεί να βλέπει μέσω Passthrough AR την εκάστοτε διαδικασία δηλαδή τόσο την περιγραφή της σε λειτουργίες, βήματα και δράσεις όσο και το οπτικοακουστικό υλικό. Για κάθε τύπο έχει δημιουργηθεί ένα αντίστοιχο αντικείμενο με σκοπό την βέλτιστη αναπαραγωγή του. Η χρήση της εφαρμογής έχει διατηρηθεί όσο το δυνατόν ευκολότερη ενώ παράλληλα αξιοποιείται η δυνατότητα Hand Tracking του Quest 3. Αυτό διευκολύνει την αναπαραγωγή του υλικού σε οποιοδήποτε περιβάλλον καθώς δεν χρειάζεται η χρήση εξοπλισμού στα χέρια του χρήστη. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα στοιχεία για κάθε είδος οπτικοακουστικού υλικού όπως αυτό εμφανίζεται στην εφαρμογή XR-Viewer.

2.8.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση της τελικής έκδοσης εκτελέστηκε ένα δοκιμαστικό σενάριο. Το σενάριο αυτό δεν είναι ρεαλιστικό και δεν περιγράφει κανονική διαδικασία. Ο σκοπός του σεναρίου είναι να ελέγχει όλες τις λειτουργίες της εφαρμογής και όλες τις περιπτώσεις χρήσης. Έτσι, δημιουργήθηκε μία διαδικασία η οποία διαθέτει πολλά βήματα και όλα τα ήδη του οπτικοακουστικού υλικού.

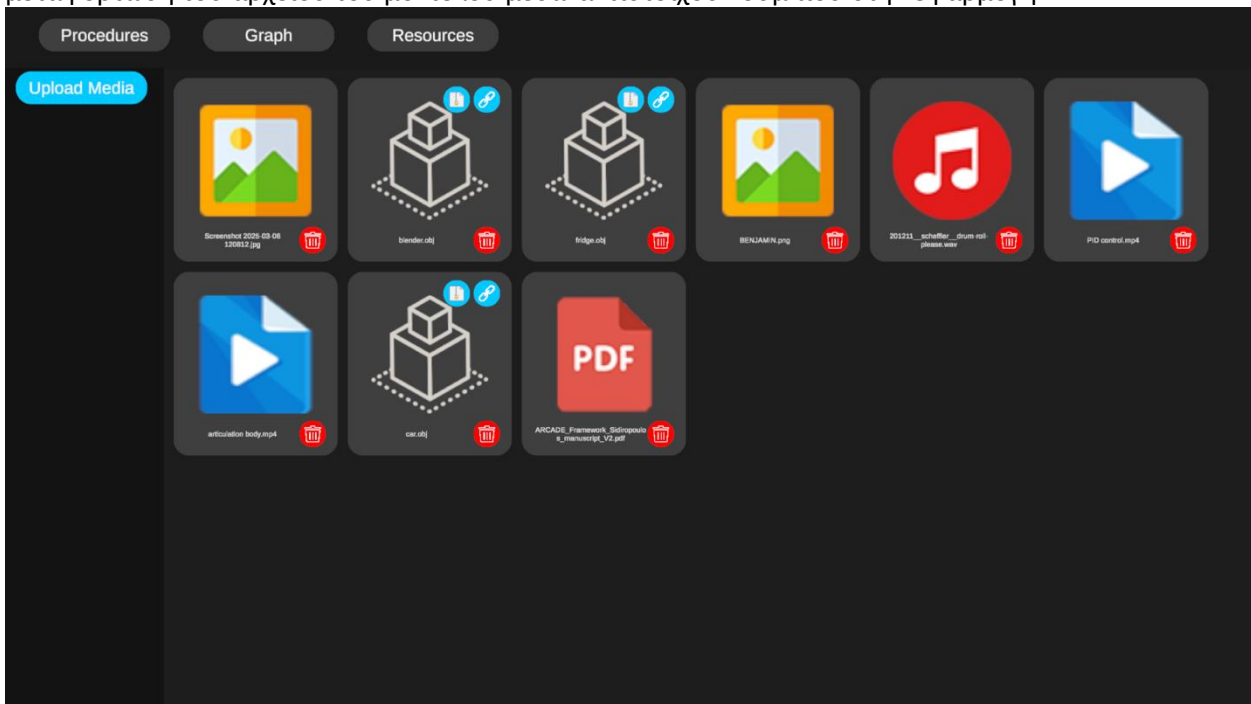
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Πιο συγκεκριμένα, το σενάριο αφορά την χρήση του “Risø TL/OSL Reader”. Το όργανο **Risø TL/OSL Reader** είναι ένα προηγμένο εργαστηριακό σύστημα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση θερμοφωταύγειας (TL) και οπτικά διεγερμένης φωταύγειας (OSL) σε διάφορα υλικά, όπως γεωλογικά δείγματα, αρχαιολογικά ευρήματα και δοσιμετρικούς δείκτες. Κατασκευάζεται από το Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας και αποτελεί διεθνές σημείο αναφοράς στους τομείς της χρονολόγησης ιζημάτων και αντικειμένων, καθώς και της δοσιμετρίας ακτινοβολίας. Η λειτουργία και ο χειρισμός του Risø TL/OSL Reader υποστηρίζονται από εξειδικευμένο λογισμικό που επιτρέπει τον πλήρη αυτοματισμό των διαδικασιών, τον προγραμματισμό ακολουθιών μέτρησης και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Χάρη στην ευελιξία και την αξιοπιστία του, το όργανο αυτό αποτελεί βασικό εργαλείο σε ερευνητικά εργαστήρια που ασχολούνται με τη γεωχρονολόγηση, την αρχαιομετρία, τη δοσιμετρία ακτινοβολίας και τη μελέτη ιδιοτήτων υλικών.

Στο δοκιμαστικό σενάριο περιγράφονται οι βασικές λειτουργίες του οργάνου μέσω εικόνων και βίντεο. Επιπλέον, υπάρχει ένα λεπτομερές τρισδιάστατο μοντέλο στο οποίο έχουν προστεθεί metadata μέσω του Annotator. Τέλος, παρέχονται και κάποια επίσημα εγχειρίδια χρήσης του οργάνου.

XR-Creator

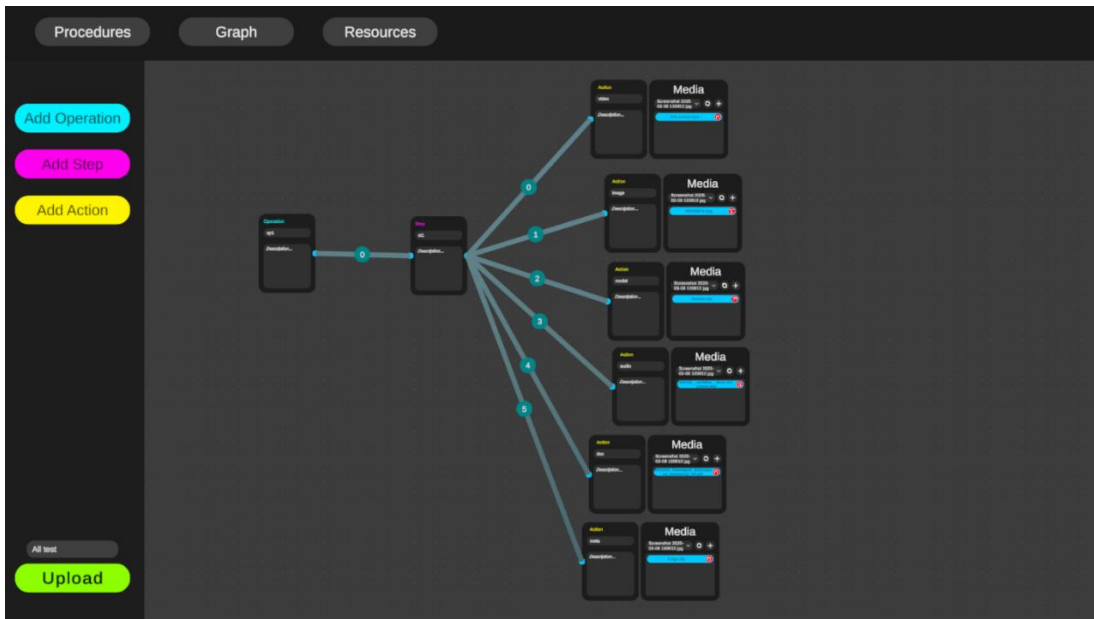
Το πρώτο βήμα είναι η συλλογή και η μεταφόρτωση όλου το οπτικοακουστικού υλικού στην εφαρμογή XR-Creator. Αυτό γίνεται από το αντίστοιχο πάνελ στην εφαρμογή όπως φαίνεται παρακάτω. Στην περίπτωση των μοντέλων, τα μεταδεδομένα μπορούν να προστεθούν στα μοντέλα μετά την μεταφόρτωση του αρχείου του μοντέλου μέσω αντίστοιχου κουμπιού στην εφαρμογή.



Εικόνα 67 Εισαγωγή οπτικοακουστικού υλικού στην εφαρμογή XR-Viewer

Έπειτα μπορεί να ξεκινήσει η περιγραφή της διαδικασίας μέσω του γραφήματος. Αφού προσθέσουμε τους απαιτούμενους κόμβους μπορούμε να προσθέσουμε και το οπτικοακουστικό υλικό. Τέλος μπορούμε να ονομάσουμε και να ανεβάσουμε την διαδικασία στον server.

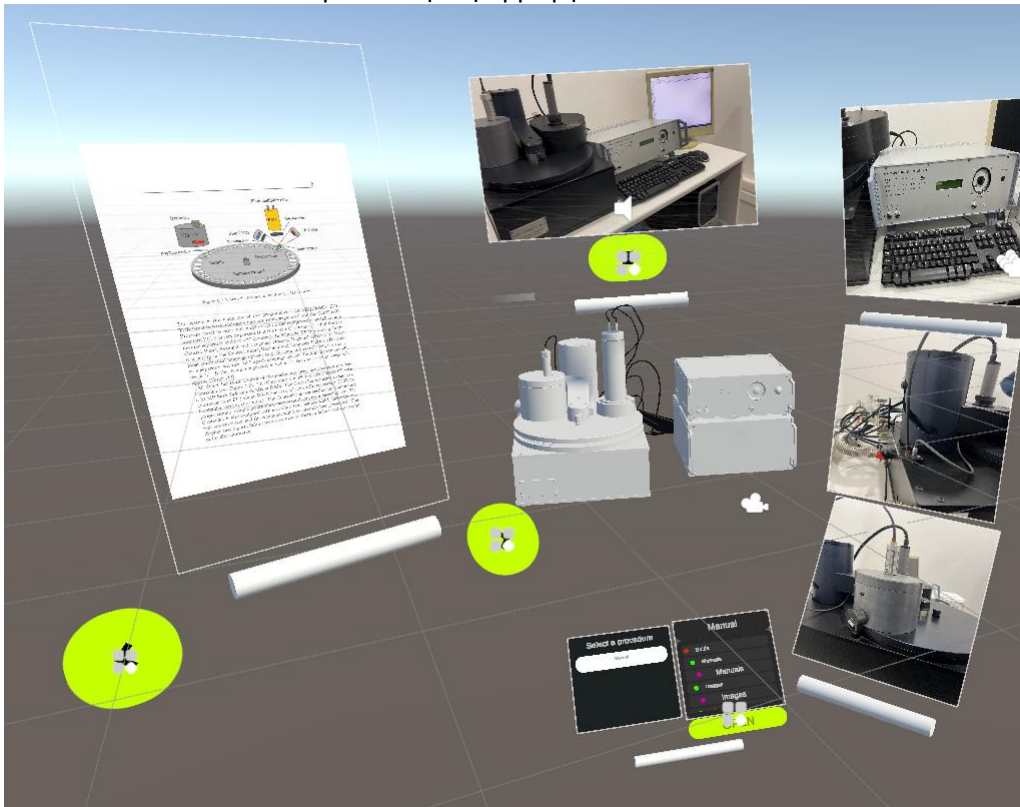
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 68 Παράδειγμα περιγραφής σεναρίου στην εφαρμογή XR-Creator

XR-Viewer

Στην εφαρμογή XR-Viewer μπορούμε να δούμε ότι δημιουργήσαμε επιτυχώς την διαδικασία. Μέσω του UI μπορούμε να έχουμε μία προεπισκόπηση της διαδικασίας η οποία μας εμφανίζει το σύνολο των λειτουργιών, βημάτων και δράσεων που περιγράφουν την διαδικασία, χωρίς όμως την παρουσία του οπτικοακουστικού υλικού. Αν θέλουμε να αναπαράγουμε το υλικό πρέπει να επιλέξουμε και να “ανοίξουμε” την διαδικασία. Αυτό ξεκινάει την λήψη των απαιτούμενων αρχείων τα οποία θα εμφανιστούν έπειτα μπροστά στον χρήστη. Έπειτα ο χρήστης μπορεί να επιλέγει την δράση την οποία θέλει να δει και αυτό θα εμφανίζει μόνο το αντίστοιχο οπτικοακουστικό υλικό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το οπτικοακουστικό υλικό μέσα στην εφαρμογή XR-Viewer.



Εικόνα 69 Παράδειγμα οπτικοακουστικού υλικού στην εφαρμογή XR-Viewer

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

2.9.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Σκοπός της παρούσας τεχνολογικής λύσης είναι η ανάπτυξη λογισμικού για την αυτοματοποιημένη και ταχεία επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής, καθώς και για την δυναμική διαχείριση προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής, “χαρτογραφώντας” τα βασικά δομικά στοιχεία του δικτύου παραγωγής και αναδιατάσσοντας κατάλληλα τις ροές του με βάση τις ανάγκες που προκύπτουν δυναμικά. Η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει αναλυθεί και μελετηθεί διεξοδικά και έχει επαληθευτεί σε διαφορετικά σενάρια μελετώντας μια πληθώρα παραμέτρων [1], [2]. Έχοντας καθορίσει τις βασικές προδιαγραφές της λύσης και υλοποιήσει ένα αρχικό πρωτότυπο στα πλαίσια των παραδοτέων Π1.2 και Π2.1 αντίστοιχα, η τρέχουσα αναφορά συνοψίζει την λειτουργικότητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της τελικής έκδοσης της εργαλειοθήκης, εστιάζοντας στην υλοποίησή της ως ανοιχτό λογισμικό έτοιμο προς χρήση ως τοπική εφαρμογή (χωρίς εξαρτήσεις από εμπορικό λογισμικό ή πρόσθετα) και την ευελιξία εκτεταμένης αξιοποίησης των δυνατοτήτων του από τον χρήστη μέσω γραφικού περιβάλλοντος (χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες τεχνικές γνώσεις) [3]. Τα κύρια στάδια οριστικοποίησης της υλοποίησης συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 6). Το αποτέλεσμα του παραδοτέου ουσιαστικά θα αποτελέσει τον βασικό πυρήνα πάνω στον οποίο θα επαληθευθεί και βελτιστοποιηθεί η λειτουργικότητα της λύσης σε εργαστηριακό περιβάλλον αρχικά (παραδοτέο Π3.1, διαμορφώνοντας απλά σενάρια προσομοίωσης/εφαρμογής σε ελεγχόμενες συνθήκες και απλές παραδοχές) και σε βιομηχανική κλίμακα τελικά (παραδοτέο Π3.2, δοκιμάζοντας την εργαλειοθήκη σε ένα πραγματικό σενάριο/παράδειγμα από βιομηχανική μονάδα).

Πίνακας 6 Βασικά Στάδια Οριστικοποίησης Τεχνολογικής Λύσης

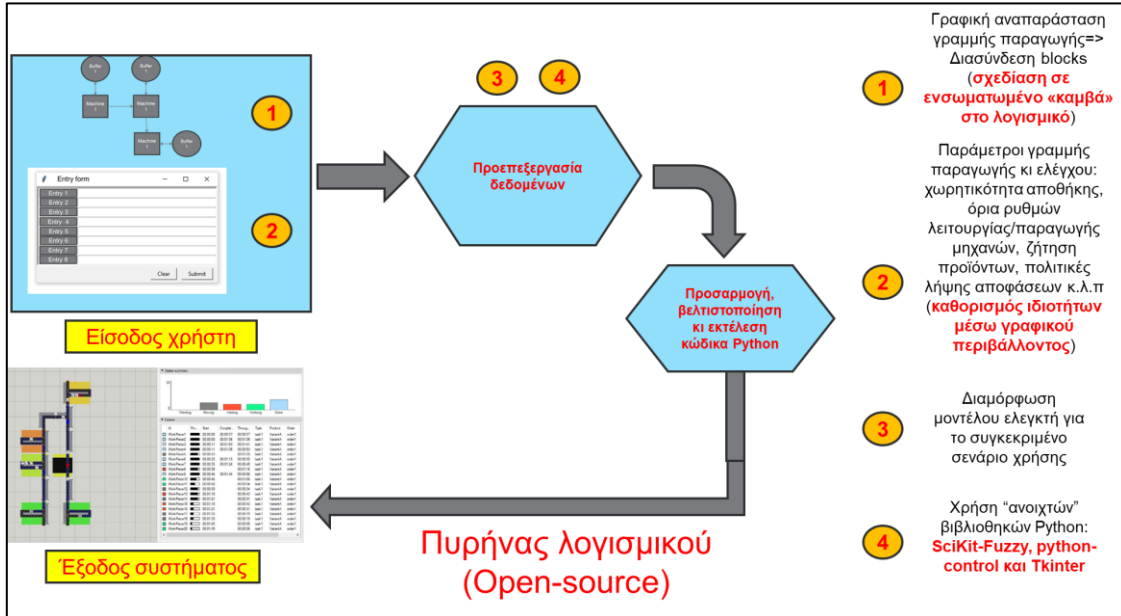
Στάδιο	Συνοπτική περιγραφή εργασιών
1	Υλοποίηση βασικού μενού διαθέσιμων ενεργειών προς τον χρήστη (σχεδίαση, εισαγωγή/εξαγωγή ρυθμίσεων, εκτέλεση προσομοίωσης)
2	Διαμόρφωση βασικών στοιχείων σχεδιασμού δικτύου παραγωγής με μορφή μπλοκ διαγραμμάτων (είδη μπλοκ/κόμβων, εικονίδια και σχήματα, καθορισμός ιδιοτήτων)
3	Δυναμική διαχείριση και προσαρμογή μπλοκ/κόμβων για προσαρμογή στο εκάστοτε σενάριο παραγωγής, διασύνδεση εισόδων/εξόδων
4	Ενσωμάτωση λειτουργικότητας ελέγχου στα βασικά δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής δικτύου
5	Προσθήκη επιλογής για εκτέλεση προσομοίωσης και οπτικοποίησης αποτελεσμάτων μέσω του γραφικού περιβάλλοντος

2.9.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της τελικής έκδοσης της τρέχουσας λύσης συνοψίζεται στην Εικόνα 70. Η ειδοποιός διαφορά σε σχέση με την ενδιάμεση υλοποίηση που παρουσιάστηκε στο Π2.1 έγκειται στην πλήρη σχεδίαση του δικτύου παραγωγής μέσω της προσφερόμενης εργαλειοθήκης (χωρίς την χρήση βοηθητικών αρχείων από εφαρμογές) και, κυρίως, στην ανάπτυξη του ολοκληρωμένου λογισμικού προγραμματισμού παραγωγής μέσω εργαλείων ανοιχτού κώδικα (προγραμματιστικό περιβάλλον Python και ενσωμάτωση κατάλληλων βιβλιοθηκών), κάνοντας εφικτή την εύκολη και άμεση αξιοποίησή του από τον τελική χρήστη ως τοπική εφαρμογή (εκτελέσιμο αρχείο σε περιβάλλον Windows) που εκτελείται χωρίς εξαρτήσεις από εμπορικά λογισμικά ή εγκατάσταση πρόσθετων εργαλείων. Η λειτουργικότητα αυτή θεωρείται πρωτοποριακή, καθώς μελετώντας την διεθνή βιβλιογραφία και αγορά δεν έχει εντοπιστεί αντίστοιχο ελεύθερο λογισμικό για την μοντελοποίηση διαδικασιών ελέγχου/διαχείρισης παραγωγής από την σκοπιά του βιομηχανικού σχεδιασμού (manufacturing), η οποία αφορά στην διαχείριση πληροφορίας από τις μηχανές (machines) και τους αντίστοιχους αποθηκευτικούς χώρους (buffers) αυτών. Τα βασικά στάδια διαμόρφωσης, επεξεργασίας κι ανάλυσης που περιλαμβάνει η υλοποιημένη εργαλειοθήκη είναι: α) η διαχείριση εισόδου από τον χρήστη μέσω γραφικού

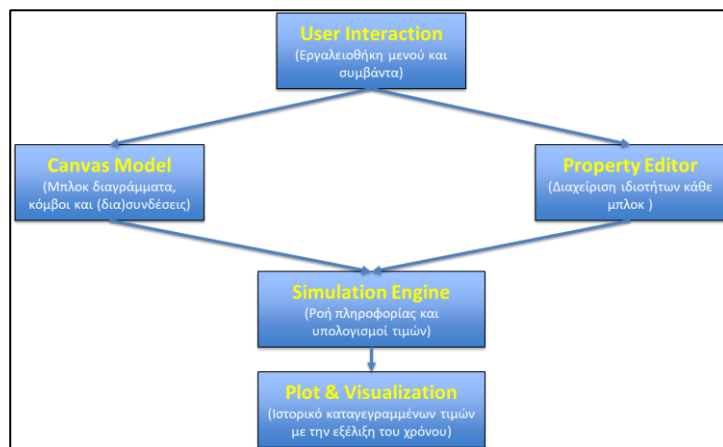
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

περιβάλλοντος (Graphical User Interface - GUI) για τον σχεδιασμό του δικτύου παραγωγής μέσω μπλοκ διαγραμμάτων (block diagrams) και τον καθορισμό βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών των μηχανών/αποθηκών/κόμβων του δικτύου, β) η καταγραφή των παραμέτρων ενδιαφέροντος της παραγωγής, η ρύθμιση των ορίων διακύμανσης των τιμών τους, καθώς και ο καθορισμός της μορφής ελέγχου λειτουργίας του δικτύου για την δυναμική διαχείριση ροών και την αναπροσαρμογή τους στην περίπτωση απρόβλεπτων/δυναμικών αλλαγών, γ) η εκτέλεση/προσομοίωση της “μηχανής” (engine) προγραμματισμού παραγωγής και μετάδοση πληροφορίας/ανάδρασης από τον ένα κόμβο στον άλλο και δ) η οπτικοποίηση της πληροφορίας εξόδου προς τον τελικό χρήστη μέσω γραφικού περιβάλλοντος με την εξέλιξη του χρόνου



Εικόνα 70 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης τεχνολογικής λύσης για τον προγραμματισμό ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής

Από τεχνικής άποψης, ο “πυρήνας” (kernel) του λογισμικού συνοψίζεται στην Εικόνα 71. Το κύριο στοιχείο (component/module) του είναι ο διαχειριστής διάδρασης (interaction manager) με τον χρήστη, ο οποίος απαρτίζεται από το μενού επιλογών, μέσω του οποίου ο χρήστης καθορίζει την επόμενη ενέργεια προς εκτέλεση, και τα συμβάντα (events), τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά την χρήση ποντικιού/πληκτρολογίου (αριστερό/δεξί κλικ, σύρσιμο και απελευθέρωση (drag-and-drop), πάτημα κουμπιού πληκτρολογίου και αναδυόμενων παραθύρων). Η δυναμική αυτή διαχείριση κάνει επιτρέπει την προσαρμογή της διεπαφής (interface) με βάση τις εκάστοτε επιλογές και την σταδιακή οδήγηση/προώθηση της πληροφορίας προς την απαιτούμενη κατεύθυνση, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για ένα αποδοτικό κι ευέλικτο γραφικό περιβάλλον. Ο διαχειριστής αλληλοεπιδρά με άλλα δύο βασικά υπο-συστήματα: 1) το μοντέλο σχεδίασης (canvas), μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να σχεδιάζει και να συνδέει, εντός προκαθορισμένης “λευκής” επιφάνειας εργασίας, τα μπλοκ διαγράμματα που μοντελοποιούν το δίκτυο παραγωγής και 2)



Εικόνα 71 Συνοπτική απεικόνιση βασικών στοιχείων του πυρήνα του λογισμικού προγραμματισμού παραγωγής

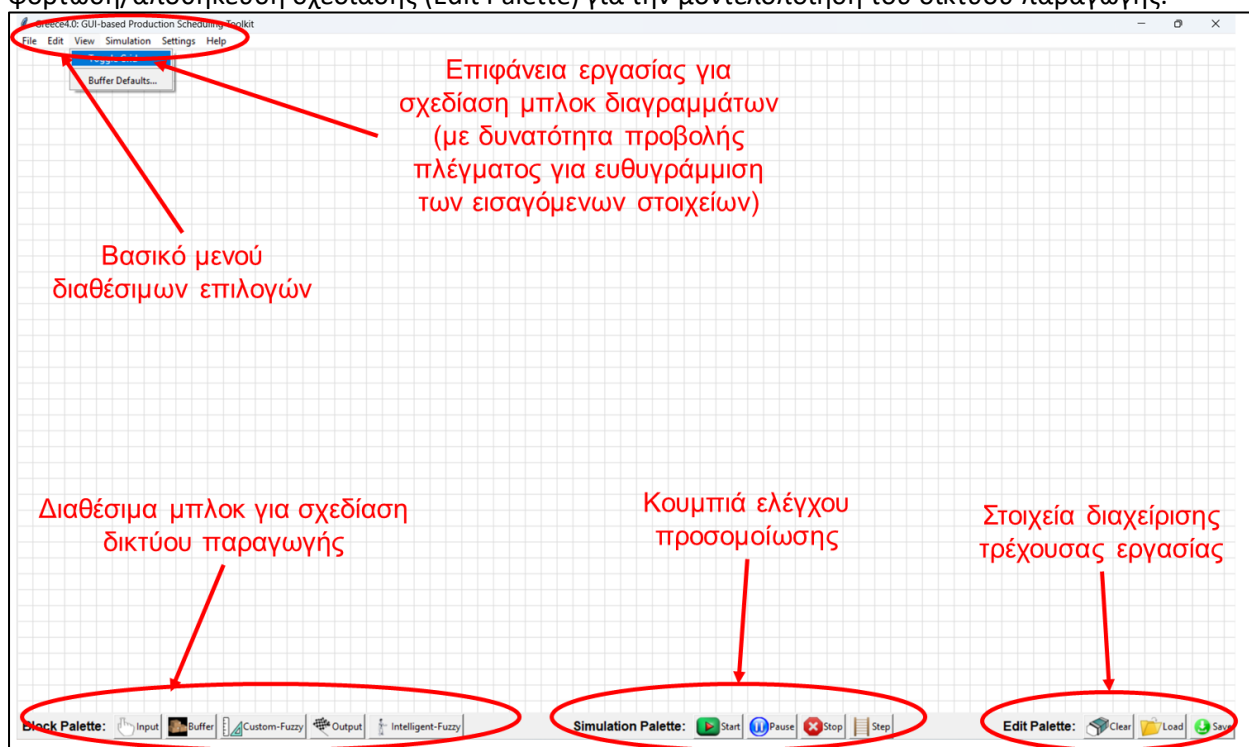
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής τον διαχειριστή ιδιοτήτων (properties) του εκάστοτε μπλοκ, ώστε ο χρήστης/σχεδιαστής να καθορίσει τις τιμές των παραμέτρων κάθε μπλοκ (π.χ. αριθμός εισόδων/εξόδων, αρχικές τιμές αυτών ή σχέση υπολογισμού τους, επιλογή μορφών ελέγχου). Τα “αποτελέσματα” των δύο αυτών υπο-μονάδων τροφοδοτούν την “μηχανή” προσομοίωσης (simulation engine), η οποία δρομολογεί την μεταφορά πληροφορίας εισόδων/εξόδων μεταξύ των μπλοκ, τον υπολογισμό των παραμέτρων ενδιαφέροντος αλλά και την καταγραφή συμβάντων που ενεργοποιούν/απενεργοποιούν ένα σενάριο δράσης και τη λήψη αποφάσεων. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό στοιχείο του πυρήνα του λογισμικού είναι ο διαχειριστής γραφημάτων, μέσω του οποίου αναπαρίσταται οπτικά η διακύμανση των τιμών των παραμέτρων ενδιαφέροντος σε συνάρτηση με τον χρόνο εξέλιξης της προσομοίωσης/εκτέλεσης της μοντελοποιημένης διαδικασίας βιομηχανικής παραγωγής.

2.9.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα της λύσης, εστιάζοντας στην παρεχόμενη λειτουργικότητα και τον τρόπο παρέμβασης/ελέγχου του χρήστη για την τελική διαμόρφωση του σεναρίου προγραμματισμού ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής. Περισσότερες λεπτομέρειες θα είναι διαθέσιμες στο ηλεκτρονικό εγχειρίδιο χρήσης που συνοδεύει το λογισμικό και θα είναι προσβάσιμο διαδικτυακά μέσω του αντίστοιχου μενού της εργαλειοθήκης. Η δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος υλοποιήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον Python χρησιμοποιώντας την πανίσχυρη **βιβλιοθήκη Tkinter**, ενώ η υλοποίηση της λειτουργικότητας ελέγχου με στοιχεία ασαφούς λογικής βασίστηκε στην **βιβλιοθήκη Scikit-Fuzzy**.

2.9.3.1 Διεπαφή χρήστη, διαχείριση διάδρασης

Η διεπαφή χρήστη της εργαλειοθήκης απεικονίζεται στην Εικόνα 72. Περιλαμβάνει το μενού επιλογών στο πάνω μέρος του κεντρικού παραθύρου, μέσω του οποίου ο χρήστης (δια)χειρίζεται το περιβάλλον, διαμορφώνει τις επιθυμητές ρυθμίσεις και αποθηκεύει/ανοίγει πληροφορία τρέχουσας/υπάρχουσας υλοποίησης και σχεδίασης. Επίσης, στο κάτω μέρος της κεντρικής κονσόλας είναι διαθέσιμα τα εικονίδια κουμπιά που επιτρέπουν την εισαγωγή και διασύνδεση μπλοκ διαγραμμάτων (Block Palette), την εκκίνηση/διακοπή/παύση/βηματική εκτέλεση προσομοίωσης (Simulation Palette) και την φόρτωση/αποθήκευση σχεδίασης (Edit Palette) για την μοντελοποίηση του δικτύου παραγωγής.

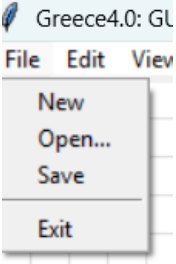
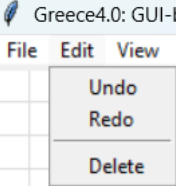
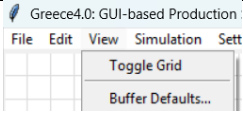
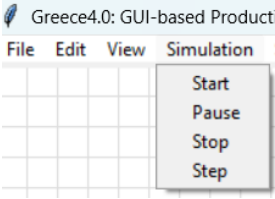
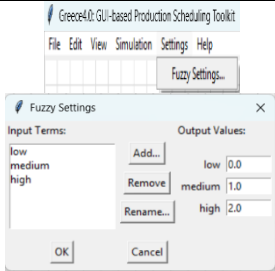
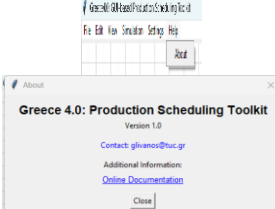


Εικόνα 72 Γραφικό περιβάλλον χρήστη εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Η προσφερόμενη λειτουργικότητα περιγράφεται συνοπτικά στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Βασικά Στάδια Οριστικοποίησης Τεχνολογικής Λύσης

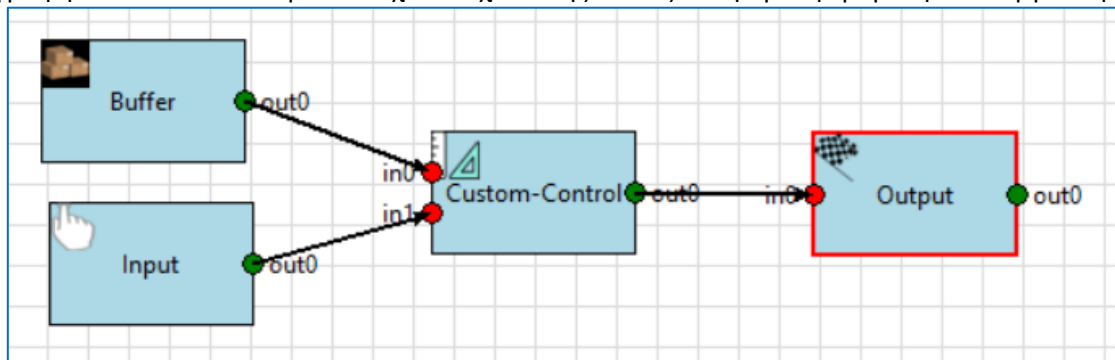
Μενού	Υπο-μενού	Προσφερόμενη λειτουργικότητα	Ενδεικτική απεικόνιση
File	New	Δημιουργία νέας σχεδίασης	
	Open	Άνοιγμα υπάρχουσας σχεδίασης (μορφή .json αρχείου)	
	Save	Αποθήκευση τρέχουσας σχεδίασης (μορφή .json αρχείου)	
	Exit	Κλείσιμο κεντρικού παραθύρου και τερματισμός	
Edit	Undo	Ακύρωση τελευταίας ενέργειας χρήστη	
	Redo	Επαναφορά τελευταίας ενέργειας χρήστη	
	Delete	Διαγραφή επιλεγμένου στοιχείου σχεδίασης (ενεργοποιείται και μέσω πατήματος δεξιού κουμπιού του ποντικιού)	
View	Toggle Grid	Ενεργοποίηση/απενεργοποίηση πλέγματος για ευθυγράμμιση μπλοκ στην επιφάνεια σχεδίασης	
	Buffer defaults	Καθορισμός προεπιλεγμένης τιμής χωρητικότητας αποθηκών	
Simulation	Start	Έναρξη προσομοίωσης	
	Pause	Παύση προσομοίωσης	
	Stop	Τερματισμός προσομοίωσης	
	Step	Βηματική εκτέλεση προσομοίωσης (αριστερό κλικ)	
Settings	Fuzzy settings	Καθορισμός ιδιοτήτων ασαφούς ελεγκτή (όρια τιμών, όροι, προσθαφαίρεση όρων)	
About	About	Πληροφορίες υλοποίησης, στοιχεία επικοινωνίας και πρόσβαση σε ηλεκτρονικό εγχειρίδιο χρήσης	

Μόλις ο χρήστης επιλέξει την δημιουργία ή το άνοιγμα σχεδίασης και ολοκληρώσει τις ρυθμίσεις της ασαφούς λογικής που θέλει να εισάγει (προαιρετικά, διαφορετικά υιοθετούνται οι προκαθορισμένες

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής τιμές όρων και παραμέτρων) είναι έτοιμος να αρχίσει να διαμορφώνει το δίκτυο παραγωγής της επιλογής του προσθαφαιρώντας μπλοκ και συνδέοντας τα μεταξύ τους.

2.9.3.2 Περιοχή σχεδίασης (Canvas)

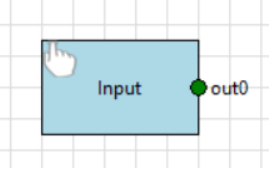
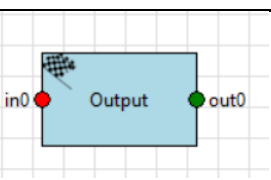
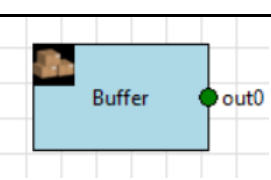
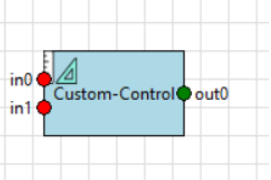
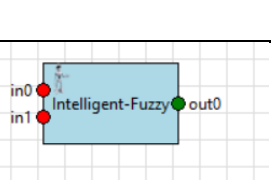
Η περιοχή σχεδίασης (Canvas) είναι το βασικό στοιχείο του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη, μέσω του οποίου γίνεται εφικτή η “χαρτογράφηση” και αναπαράσταση του δικτύου παραγωγής προς μοντελοποίηση. Η εργαλειοθήκη είναι κατάλληλα υλοποιημένη ώστε να παραμένει απλή στην χρήση και να επιτρέπει τον δυναμικό σχεδιασμό αντικειμένων/μπλοκ με βάση ένα περιορισμένο αριθμό πρότυπων στοιχείων: 1) είσοδοι (inputs), 2) έξοδοι (outputs), 3) αποθήκες (buffers), 4) απλό στοιχείο ασαφούς λογικής (Custom-Fuzzy) και 5) έξυπνο στοιχείο ασαφούς λογικής (Intelligent-Fuzzy). Η περιοχή σχεδίασης ουσιαστικά παράγει τον μηχανισμό αναπαράστασης και διασύνδεσης της πληροφορίας στην μνήμη και την αποτύπωσή της στην οθόνη ως ένα σύνολο ορθογώνιων (μπλοκ), κουκκίδων (είσοδοι/έξοδοι) και προσανατολισμένων γραμμών (συνδέσεις) που καθοδηγούν την ροή παραγωγής από τον πρώτο μέχρι τον τελευταίο κόμβο του δικτύου. Όπως έχει αναφερθεί στο παραδοτέο Π2.1, η προσέγγιση της τρέχουσας τεχνολογικής λύσης βασίζεται στην ιδέα πως κάθε δίκτυο παραγωγής μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας συνδυασμός 3 κύριων δομικών στοιχείων: **α) βασικό δομικό στοιχείο παραγωγής** (μπλοκ/μηχανή μίας εισόδου - μίας εξόδου), **β) στοιχείο συναρμολότητας** (μπλοκ με ≥ 2 εισόδους και μίας εξόδου) και **γ) στοιχείο αποσυναρμολότητας** (μπλοκ μίας εισόδου και ≥ 2 εξόδων). Κάθε στοιχείο εισάγεται στην επιφάνεια εργασίας Canvas) επιλέγοντάς το από την εργαλειοθήκη (αριστερό κλικ του ποντικιού) και επιλέγοντας το σημείο τοποθέτησής στο στον διαθέσιμο χώρο (αριστερό κλικ του ποντικιού). Με τη χρήση του δεξιού πλήκτρου του ποντικιού πάνω σε ένα μπλοκ εμφανίζεται ένα αναδυόμενο παράθυρο καθορισμού των ιδιοτήτων του (Edit properties) ή διαγραφής του (delete, είτε επιλέγοντας με το ποντίκι είτε πατώντας το αντίστοιχο πλήκτρο του πληκτρολογίου). Ο καθορισμός των ιδιοτήτων είναι διαθέσιμος επίσης επιλέγοντας με διπλό κλικ το εκάστοτε μπλοκ. Για τη σύνδεση δύο μπλοκ, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει με απλό κλικ μία έξοδο (πράσινη κουκκίδα) του ενός και, διαδοχικά, την είσοδο του άλλου(κόκκινη κουκκίδα). Τέλος, είναι διαθέσιμη και η λειτουργία drag-and-drop για την μετακίνηση ενός μπλοκ και των συνδέσεων του στην επιθυμητή θέση από τον χρήστη. Στην Εικόνα 73 αναπαρίσταται ένα απλό παράδειγμα σχεδίασης: μία μηχανή (μπλοκ Custom-Control) με τον αποθηκευτικό της χώρο (buffer), μία είσοδο (προϊόν προς επεξεργασία) και μία έξοδο (αποτέλεσμα κατεργασίας που προωθείται στον επόμενο κόμβο). Στον Πίνακα 8 συνοψίζεται η περιγραφή του κάθε διαθέσιμου στοιχείου σχεδίασης καθώς και η προσφερόμενη λειτουργικότητά του.



Εικόνα 73:Εισαγωγή μπλοκ διαγραμμάτων στο γραφικό περιβάλλον σχεδιασμού της προσφερόμενης εργαλειοθήκης

Πίνακας 8: Διαθέσιμα στοιχεία σχεδίασης στην υλοποιημένη εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής

Στοιχείο/Μπλοκ	Χαρακτηριστικά	Προσφερόμενη λειτουργικότητα	Ενδεικτική απεικόνιση
	•		

Στοιχείο/Μπλοκ	Χαρακτηριστικά	Προσφερόμενη λειτουργικότητα	Ενδεικτική απεικόνιση
Input	<ul style="list-style-type: none"> • Ονομασία • Τιμή • Τρόπος καθορισμού τιμής (σταθερός, τυχαίος, συνάρτηση/τύπος) 	Μοντελοποιεί τις παραμέτρους εισόδου κάθε μπλοκ του δικτύου παραγωγής	
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Ονομασία • Τιμή • Τρόπος καθορισμού τιμής (σταθερός, τυχαίος, συνάρτηση/τύπος) 	Μοντελοποιεί τις παραμέτρους εξόδου κάθε μπλοκ του δικτύου παραγωγής	
Buffer	<ul style="list-style-type: none"> • Ονομασία • Τρέχουσα τιμή πλήρωσης • Μέγιστη χωρητικότητα 	Μοντελοποιεί τον αποθηκευτικό χώρο κάθε μηχανής κατά την παραγωγική διαδικασία	
Custom-Control	<ul style="list-style-type: none"> • Ονομασία • Αριθμός εισόδων/εξόδων • Καθορισμός κανόνων (στην μορφή if - then - else) 	Μπλοκ πολλαπλών εισόδων και εξόδων (καθορίζονται δυναμικά). Μπορεί να μοντελοποιήσει τα 3 βασικά δομικά στοιχεία του δικτύου παραγωγής (transfer line, assembly, disassembly) με χρήση απλών κανόνων ελέγχου (ευρετικές μέθοδοι - heuristics)	
Intelligent-Fuzzy	<ul style="list-style-type: none"> • Ονομασία • Αριθμός εισόδων/εξόδων • Μορφή συναρτήσεων συμμετοχής • Καθορισμός κανόνων 	Μπλοκ πολλαπλών εισόδων και εξόδων (καθορίζονται δυναμικά). Μπορεί να μοντελοποιήσει τα 3 βασικά δομικά στοιχεία του δικτύου παραγωγής (transfer line, assembly, disassembly) με χρήση πιο πολύπλοκων κανόνων ελέγχου	

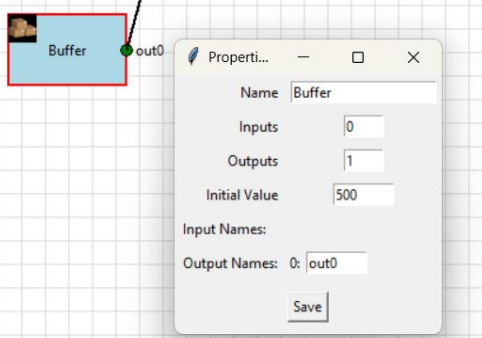
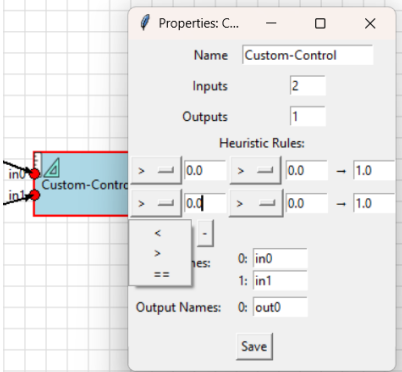
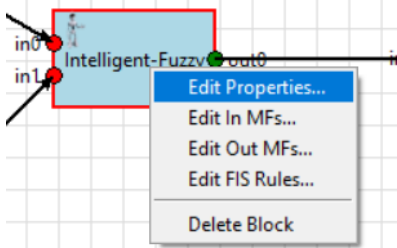
2.9.3.3 Διαχείριση ιδιοτήτων μπλοκ κι ελέγχου

Κάθε μπλοκ που εισάγεται στο διάγραμμα φέρει τις ιδιότητές του, τις οποίες ο χρήστης μπορεί να αλλάζει δυναμικά, είτε κάνοντας διπλό κλικ πάνω σε ένα μπλοκ ενδιαφέροντος είτε ανοίγοντας το αντίστοιχο αναδυόμενο παράθυρο διαλόγου με δεξί κλικ του ποντικιού. Η διαχείριση των ιδιοτήτων κάθε μπλοκ εισάγει μεγάλη ευελιξία και δίνει δυνατότητες για διαμόρφωση πολλών και διαφορετικών σεναρίων μοντελοποίησης και προσομοίωσης. Ιδιαίτερα βοηθητική είναι και η δυνατότητα εισαγωγής λειτουργικότητας ελέγχου σε μπλοκ χρησιμοποιώντας παραμετροποίησιμες σχέσεις και μορφές κανόνων. Μέσω των διαθέσιμων πρότυπων μπλοκ Custom-Control και Intelligent-Fuzzy ουσιαστικά μοντελοποιούμε τις μηχανές του δικτύου παραγωγής, εισάγοντας παράλληλα και στοιχεία ανάδρασης/ελέγχου δυναμικά με απλούς ή σύνθετους κανόνες αντίστοιχα. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι προσφερόμενες δυνατότητες διαχείρισης ιδιοτήτων για κάθε ένα από τα 5 βασικά δομικά στοιχεία σχεδιασμού που διαθέτει η εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης παραγωγής. Στην Εικόνα 75: Προσφερόμενες δυνατότητες της εργαλειοθήκης για τον καθορισμό των συναρτήσεων συμμετοχής (Membership Functions - αριστερά) και των τεχνικών ασαφοποίησης/αποασαφοποίησης πληροφορίας ελεγκτή (αριστερά) παρουσιάζονται οι προσφερόμενες δυνατότητες της εργαλειοθήκης για τον καθορισμό των συναρτήσεων συμμετοχής (Membership Functions), οι οποίες περιλαμβάνουν την τριγωνική (triangular), την τραπεζοειδή (trapezoidal) την γκαουσιανή (gaussian) και την custom (χρήση κώδικα Python για τον καθορισμό πιο πολύπλοκης μορφής). Τέλος, στην Εικόνα 75: Προσφερόμενες δυνατότητες της εργαλειοθήκης για τον καθορισμό των συναρτήσεων συμμετοχής (Membership Functions - αριστερά) και των τεχνικών ασαφοποίησης/αποασαφοποίησης πληροφορίας ελεγκτή (δεξιά) παρατίθενται οι διαθέσιμες επιλογές για την αποασαφοποίηση (defuzzification) της πληροφορίας εξόδου για το μπλοκ που αναπαριστά τον έξυπνο ενσωματωμένο ελεγκτή ασαφούς λογικής σε μηχανή του δικτύου παραγωγής.

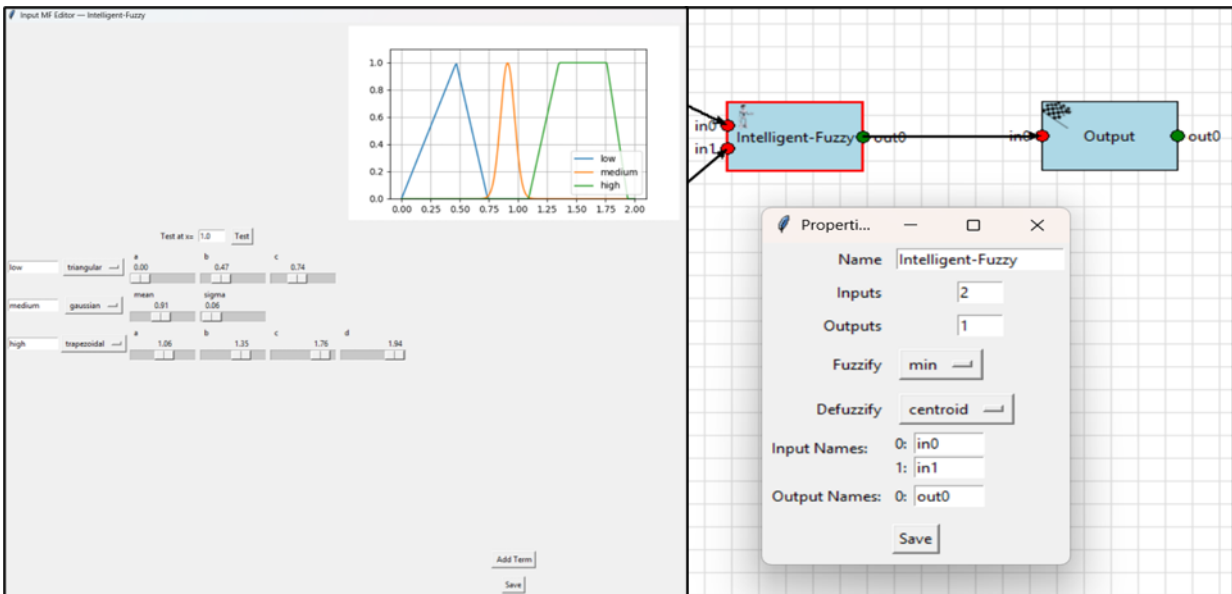
Πίνακας 9: Διαχείριση ιδιοτήτων μπλοκ κι ελέγχου μέσω της εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης παραγωγής

Στοιχείο/Μπλοκ	Χαρακτηριστικά προς επεξεργασία/διαχείριση	Ενδεικτική απεικόνιση
Input	<ul style="list-style-type: none"> Όνομα μπλοκ και εξόδου Μετατροπή του σε “απλό” μπλοκ πολλαπλών εισόδων/εξόδων χωρίς δυνατότητα ελέγχου Δυνατότητα καθορισμού σταθερής τιμής (static), τυχαίας τιμής (random) και υπολογισμού μέσω μαθηματικής σχέσης 	
Output	<ul style="list-style-type: none"> Όνομα μπλοκ και εξόδου Μετατροπή του σε “απλό” μπλοκ πολλαπλών εισόδων/εξόδων χωρίς δυνατότητα ελέγχου 	

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

<p>Buffer</p>	<ul style="list-style-type: none"> Όνομα μπλοκ και εισόδου/εξόδου Μέγιστη χωρητικότητα 	
<p>Custom-Control</p>	<ul style="list-style-type: none"> Ονομασία μπλοκ, εισόδων/εξόδων Αριθμός εισόδων/εξόδων Καθορισμός κανόνων (ευρετικές μέθοδοι) 	
<p>Intelligent-Fuzzy</p>	<ul style="list-style-type: none"> Ονομασία μπλοκ, εισόδων/εξόδων Αριθμός εισόδων/εξόδων Μορφή συναρτήσεων συμμετοχής (Membership Functions) εισόδου και εξόδου Καθορισμός κανόνων εξόδου 	

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 75: Προσφερόμενες δυνατότητες της εργαλειοθήκης για τον καθορισμό των συναρτήσεων συμμετοχής (Membership Functions - αριστερά) και των τεχνικών ασαφопоίησης/αποασαφопоίησης πληροφορίας ελεγκτή(δεξιά)

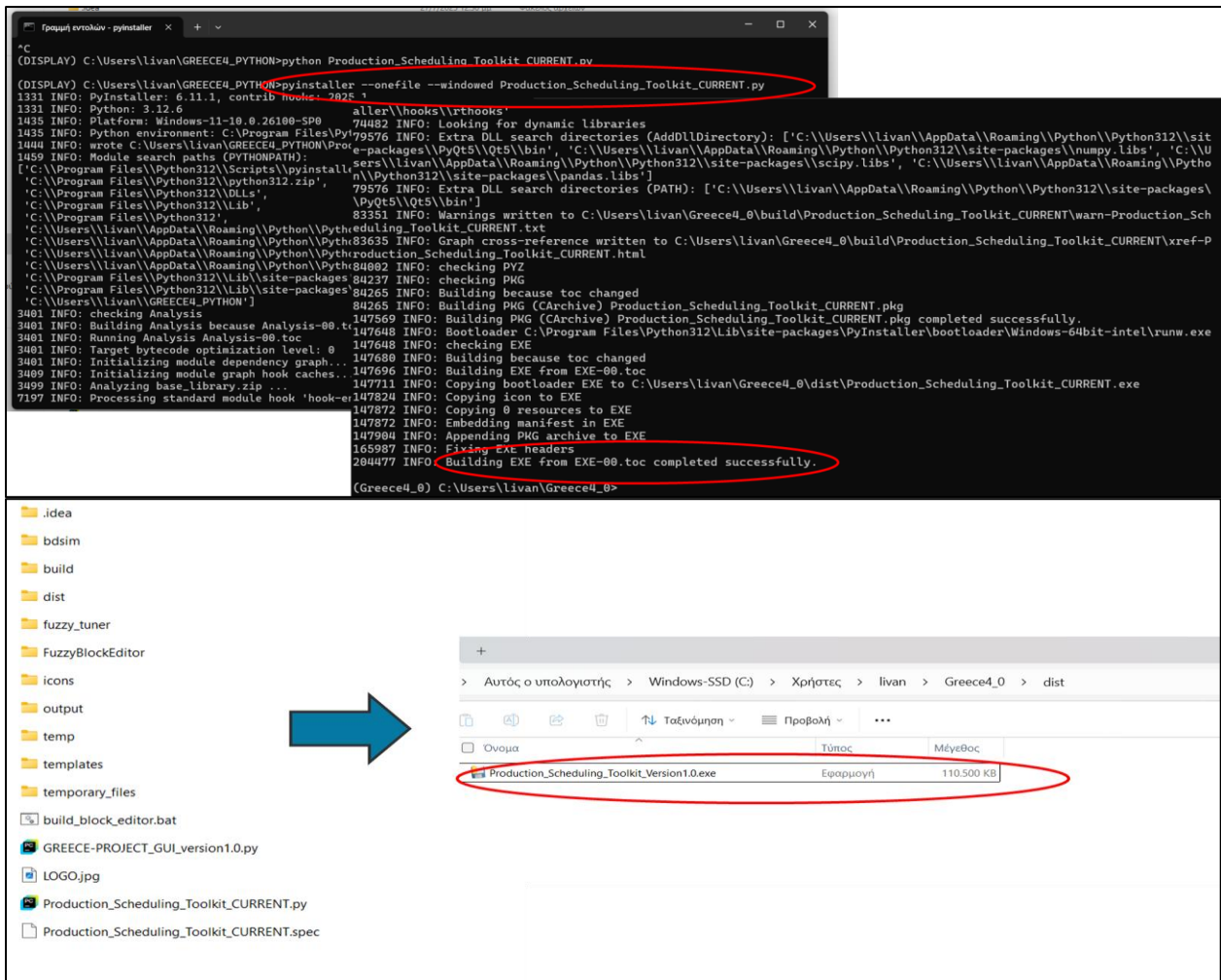
2.9.3.4 Μηχανή προσομοίωσης κι οπτικοποίηση πληροφορίας

Η εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής διαθέτει ενσωματωμένη μηχανή προσομοίωσης, η οποία λαμβάνει υπόψη το “χαρτογραφημένο” μονοπάτι διασύνδεσης εισόδων/εξόδων κάθε μπλοκ, τις μαθηματικές σχέσεις που τις συνδέουν και τις δυναμικές εναλλαγές που λαμβάνουν χώρα (π.χ. αβεβαιότητα, τυχαιότητα εμφάνιση βλαβών) και υπολογίζει τις τιμές για κάθε έξοδο στο μπλοκ διάγραμμα (τις εμφανίζει ως νούμερα στην αντίστοιχη θέση πάνω στο διάγραμμα). Στη συνέχεια “στέλνει” αυτή την πληροφορία στην υπομονάδα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, η οποία απεικονίζει (χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη **matplotlib** της Python) την εξέλιξη της τιμής για κάθε παράμετρο ενδιαφέροντος που έχει οριστεί συν τω χρόνω (ο χρήστης μπορεί να προσθέτει μεταβλητές εξόδου που επιθυμεί να απεικονίζονται).

2.9.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης Pyinstaller, ο κώδικας και τα ενδιάμεσα αρχεία (εικονίδια και γραφικά που ενσωματώνονται στην διεπαφή χρήστη, βοηθητικές συναρτήσεις και βιβλιοθήκες) μετατρέπονται (“one-file conversion”) σε ένα ενιαίο εκτελέσιμο (.exe) αρχείο, το οποίο μπορεί να “τρέξει” σε περιβάλλον Windows ως τοπική εφαρμογή, χωρίς την εξάρτηση από λογισμικό τρίτων ούτε από εγκατάσταση προγραμματιστικού περιβάλλοντος. Η εργαλειοθήκη θα είναι διαθέσιμη προς χρήση από το market place του έργου, ενώ μέσω του μενού “About” ο χρήστης έχει τη δυνατότητα πρόσβασης στο τεχνικό εγχειρίδιο διαδικτυακά, το οποίο και μπορεί να “κατεβάσει” στον υπολογιστή του. Τα ανωτέρω παρατιθέμενα βήματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 76. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα της παρούσας τεχνολογικής λύσης είναι η ανοιχτή της αρχιτεκτονική, η οποία διευκολύνει την επεκτασιμότητά της και με πιο πολύπλοκα είδη ελέγχου (π.χ. νευρωνικά δίκτυα) ή λειτουργικότητας (π.χ. Large Language Models –LLMs για αυτοματοποιημένη διαμόρφωση των παραμέτρων ελέγχου).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 76 Μετατροπή κώδικα από προγραμματιστικό περιβάλλον Python σε εκτελέσιμο αρχείο - εφαρμογή (πάνω: εκτέλεση εντολής στο Shell, κάτω: τελικό αποτέλεσμα μετατροπής "one-file conversion")

2.9.5 Αναφορές

- [1] Tsourveloudis, L. Doitsidis and S. Ioannidis, "Work-in-process scheduling by evolutionary tuned fuzzy controllers," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 34, no. 7-8, pp. 748-761, 2007.
- [2] S. Ioannidis, L. Doitsidis, N. Tsourveloudis, "Efficiency and Sustainability in Manufacturing: Simultaneous Work-in-Progress Control and Energy Consumption Management," in proceedings of the 32nd Mediterranean Conference on Control and Automation, Chania Crete, June 2024.
- [3] G. Livanos, L. Doitsidis, N. Tsourveloudis, M. Aryblia, G. Arampatzis, "Towards Circular Value Chains, Sustainable and Resilient Product Management and Production Scheduling Using Digital Tools," 4th International Conference on Responsible Consumption and Production, Chania, Greece, 2025. (accepted to appear)

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

2.10.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Σκοπός της παρούσας λύσης, όπως έχει αναφερθεί στα παραδοτέα που έχουν προηγηθεί, είναι να διευκολύνει τη διαχείριση των αλυσίδων αξίας μιας βιομηχανίας, να αξιολογήσει τόσο τη βιωσιμότητα, όσο και την κυκλικότητά τους, υποστηρίζοντας παράλληλα τη διαφανή μετάδοση πληροφοριών για τα παραγόμενα προϊόντα σε όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς. Η τεχνική προσέγγιση της λύσης

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής ενσωματώνει στοχευμένα ψηφιακά εργαλεία για (i) προσομοίωση και μοντελοποίηση των επιμέρους διεργασιών ως δίκτυα ψηφιακών διδύμων (μέσω του Process Modelling and Simulation Tool, PSM), (ii) αξιολόγηση βιωσιμότητα και κυκλικότητα των αλυσίδων (μέσω του εργαλείου Circular Sustainability Balanced Scorecards), και (iii) ενίσχυση της διαφάνειας και ιχνηλασιμότητας του παραγόμενου προϊόντος και παροχή πληροφοριών σχετικά με αυτό σε όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς κατά μήκος της αλυσίδας (μέσω του εργαλείου/πλατφόρμας Digital Product Passport).

Έχοντας αναλύσει το θεωρητικό υπόβαθρο και πλαίσιο ανάπτυξης των επιμέρους εργαλείων της λύσης στα Παραδοτέα Π1.2 & Π2.1, στο παρόν έγγραφο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και μοντελοποίησης ενός συγκεκριμένου case study, μιας βιομηχανίας παραγωγής χυμού, η διασύνδεσή του με επιλεγμένους δείκτες βιωσιμότητας και κυκλικότητας, και η ανάπτυξη διαδικτυακής πλατφόρμας/εργαλείου για την άμεση οπτικοποίηση και διαμοιρασμό χρήσιμων αποτελεσμάτων και πληροφοριών σχετικά με το εξεταζόμενο προϊόν.

Η υλοποίηση της προτεινόμενης λύσης πραγματοποιήθηκε μέσα από την ολοκλήρωση των παρακάτω εργασιών σε δύο φάσεις (Φάση Α: Μ1-Μ16 και Φάση Β – Μ17-Μ22), όπως αποτυπώνεται στο παραδοτέο Π2.1 *Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής* και στο παρόν παραδοτέο, σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 10).

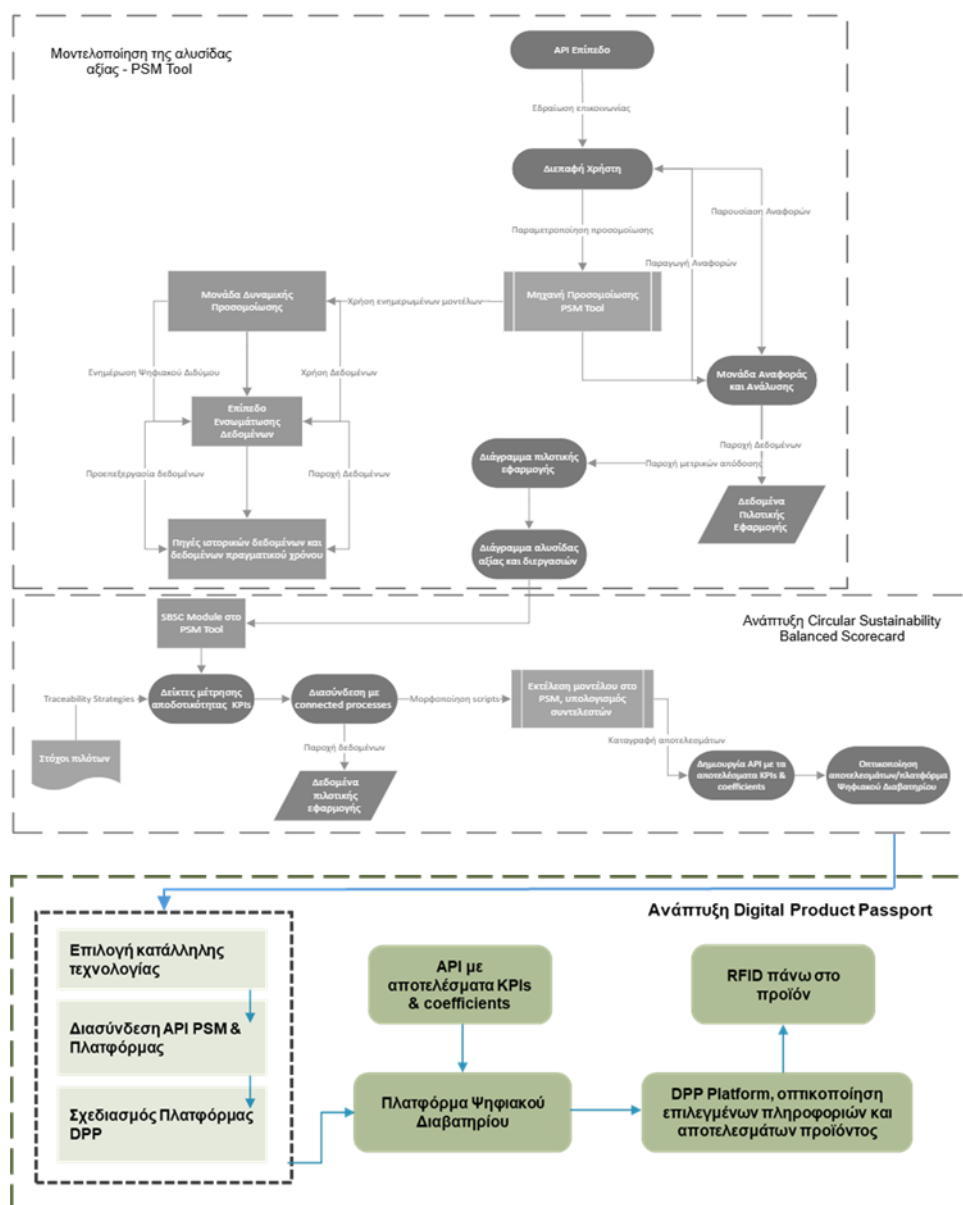
Πίνακας 10: Φάσεις Υλοποίησης και Επισκόπηση Εργασιών της Προτεινόμενης Λύσης

Εργασία/Ενέργεια	Περίοδος
Φάση Α (Μ1-Μ16)	
Συλλογή δεδομένων και βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης στην υπό μελέτη βιομηχανία	Μ9 – Μ13
Αποτύπωση της παραγωγικής αλυσίδας της επιλεγμένης βιομηχανίας, δημιουργία του αντίστοιχου διαγράμματος ροής και ανάπτυξη του ψηφιακού διδύμου της (Ορόσημο 1)	Μ11 – Μ13
Μοντελοποίηση των παραγωγικών διεργασιών και των εφοδιαστικών αλυσίδων	Μ11 – Μ16
Επιλογή κατάλληλων KPIs για την αξιολόγηση της κυκλικότητας και της βιωσιμότητας της αλυσίδας, καθώς και ανάπτυξη σχετικών εξισώσεων και μοντέλων (Ορόσημο 2)	Μ11 – Μ16
Φάση Β (Μ16-Μ22)	
Επαλήθευση των μοντέλων μέσω συνθετικών δεδομένων και επικύρωση των αποτελεσμάτων (Ορόσημο 3)	Μ17 – Μ22
Διερεύνηση της διασύνδεσης και διαλειτουργικότητας των αποτελεσμάτων του Sustainability Balanced Scorecard (SBSC) με τεχνολογίες αναγνώρισης και αποθήκευσης δεδομένων	Μ19 – Μ22
Οριστικοποίηση της αρχιτεκτονικής της τελικής λύσης και ανάπτυξη όλων των απαραίτητων τεχνολογικών εργαλείων	Μ20 – Μ22

2.10.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της τελικής, ολοκληρωμένης λύσης αποτυπώνεται στην Εικόνα 77 και αφορά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης των επιμέρους ψηφιακών εργαλείων, όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα. Στο επάνω μέρος, με γκρι χρώμα, απεικονίζεται η αρχιτεκτονική της ενδιάμεσης έκδοσης (όπως έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο Π2.1), ενώ στο κάτω, χρωματισμένο μέρος, διακρίνονται τα επιμέρους βήματα που υλοποιήθηκαν για την ανάπτυξη και υλοποίηση της τελικής έκδοσης, στοχεύοντας στην επικύρωση των αποτελεσμάτων της μοντελοποιημένης αλυσίδας, στον υπολογισμό των KPIs, και στον σχεδιασμό, ανάπτυξη και ολοκλήρωση του Ψηφιακού Διαβατηρίου (Digital Passport).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 77 Η τελική έκδοση της αρχιτεκτονικής με τον σχεδιασμό και ανάπτυξη του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος

Τα πρώτα δύο στάδια της αρχιτεκτονικής της λύσης παρουσιάζονται και αναλύονται στο παραδοτέο Π2.1. Η τελική αρχιτεκτονική της λύσης ολοκληρώνεται με την Ανάπτυξη του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (Digital Product Passport – DPP), το οποίο αποτελεί το τρίτο και τελευταίο στάδιο της συνολικής προσέγγισης. Μετά την ανάπτυξη του PSM εργαλείου και του Circular Sustainability Balanced Scorecard (C-SBSC), τα αποτελέσματα της ανάλυσης και αξιολόγησης οργανώνονται και αξιοποιούνται για την υλοποίηση του DPP. Συγκεκριμένα:

- Πραγματοποιείται έρευνα σχετικά με την επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας για την πλατφόρμα DPP, ώστε να διασφαλιστεί η δυνατότητα διαλειτουργικότητας με τα αποτελέσματα του εργαλείου PSM, τόσο για την μοντελοποίηση της αλυσίδας, όσο και για τα επιλεγμένα KPIs που στοχεύουν στην αξιολόγηση βιωσιμότητας και κυκλικότητας. Σημειώνεται ότι το C-SBSC αποτελεί ένα ενσωματωμένο εργαλείο στο PSM, και τα αποτελέσματα να εξάγονται μέσω του PSM μοντέλου.
- Αναπτύσσεται η Πλατφόρμα Ψηφιακού Διαβατηρίου (DPP Platform), η οποία φιλοξενεί τις πληροφορίες που σχετίζονται με την ανάλυση της κυκλικής απόδοσης, καθώς και άλλες κρίσιμες παραμέτρους του προϊόντος.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Γίνεται διασύνδεση του PSM API το οποίο «μεταφέρει» τα αποτελέσματα του PSM και του C-SBSC με την πλατφόρμα/dashboard του DPP. Τα αποτελέσματα του C-SBSC επικεντρώνονται στον υπολογισμό επιλεγμένων δεικτών μέσα από μία εκτεταμένη λίστα 72 Key Performance Indicators. Τα KPIs επιλέγονται από την εκάστοτε βιομηχανία, ώστε να αποτυπώνουν στοχευμένες προτεραιότητες ή στόχους αυτής.
- Το διαβατήριο εμπλουτίζεται με οπτικοποίηση επιλεγμένων πληροφοριών και αποτελεσμάτων του προϊόντος, με στόχο τη διαφάνεια και την υποστήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων από καταναλωτές, παραγωγούς και αρχές.
- Το κάθε προϊόν μπορεί να φέρει RFID² ετικέτα, μέσω της οποίας αποκτά μοναδική ταυτότητα και δυνατότητα ιχνηλασιμότητας κατά μήκος της αλυσίδα αξίας, καθώς και διαφάνειας σχετικά με το προϊόν, αφού διασφαλίζεται η πρόσβαση στα δεδομένα του διαβατηρίου.

2.10.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Η εφαρμογή για την ανάπτυξη της παρούσας τεχνολογικής λύσης υλοποιήθηκε κατά την πρώτη φάση με τη βοήθεια δεδομένων που συλλέχθηκαν από βιομηχανία παραγωγής χυμών από εσπεριδοειδή, με έδρα στην Ελλάδα. Τα πρώτα δύο στάδια/τμήματα υλοποίησης παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π2.1 και παρακάτω παρουσιάζεται η ολοκλήρωσή τους.

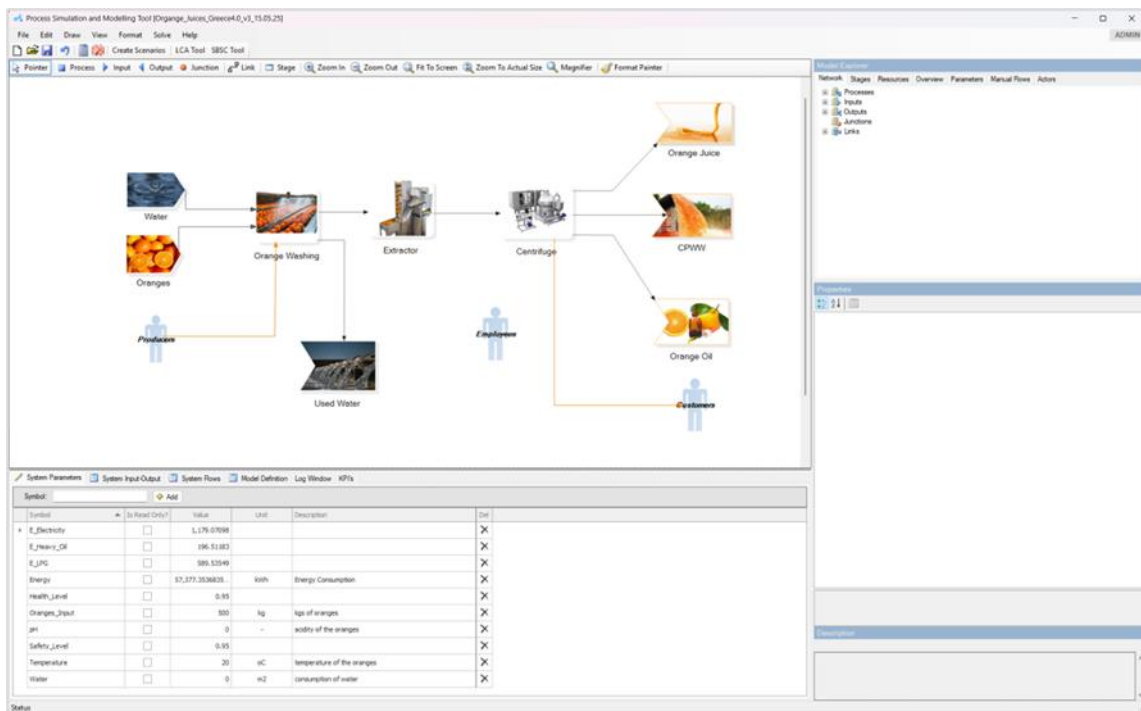
2.10.3.1 Ολοκλήρωση μοντελοποίησης βιομηχανικών διεργασιών με το εργαλείο PSM

Κατά το πρώτο στάδιο υλοποίησης της λύσης, δημιουργείται ένα ψηφιακό μοντέλο βιομηχανικής αλυσίδας, με χρήση του εργαλείου PSM. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ανάλυση και καταγραφή όλων των επιμέρους διεργασιών, συμπεριλαμβανομένων των εισροών, των διεργασιών και των εκροών. Παράλληλα, προσδιορίζονται τεχνικές παράμετροι, όπως θερμοκρασία, πίεση και ποσότητες πρώτης ύλης, καθώς και λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Στη συνέχεια, δημιουργείται ένα διάγραμμα ροής που απεικονίζει τη σύνδεση των διεργασιών και τη ροή των υλικών μέσω της αλυσίδας. Ακολουθεί η εκτέλεση προσομοιώσεων για τον υπολογισμό των ροών και των δεικτών απόδοσης (KPIs). Οι δείκτες που επιλέγονται και υπολογίζονται κατά τη φάση αυτή προέρχονται από τον Πίνακα 5 του Π2.1, με στόχο την κάλυψη όλων των κατηγοριών που αναπτύχθηκαν στο θεωρητικό υπόβαθρο (Π1.1 & Π1.2). Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς, διακυβερνητικούς, παραγωγικότητας και ανάπτυξης δείκτες, εξασφαλίζοντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιομηχανικής αλυσίδας.

² RFID (Radio Frequency Identification), είναι μια ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά πεδία για την αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση ετικετών που είναι προσαρτημένες σε αντικείμενα, όπως προϊόντα.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 78: Αξιοποίηση του εργαλείου PSM για την προσομοίωση διεργασιών

2.10.3.2 Ολοκλήρωση Circular Sustainability Balanced Scorecard (C-SBSC)

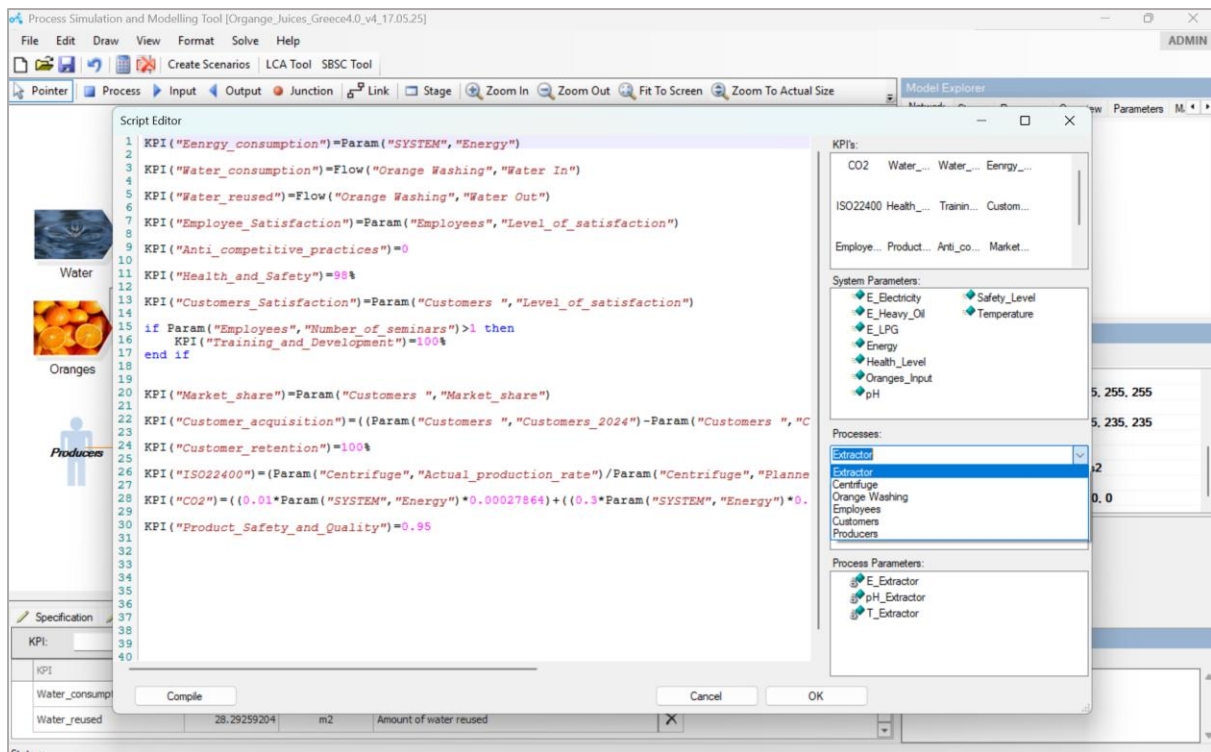
Το δεύτερο στάδιο, εφαρμόζοντας το θεωρητικό υπόβαθρο και τα επιμέρους βήματα υλοποίησης του C-SBSC που περιγράφονται στο Π1.2, υλοποιεί το C-SBSC ως ενσωματωμένο module του PSM. Αυτή η επιλογή δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζονται τα KPIs βασιζόμενα στο αξιόπιστο μοντέλο της βιομηχανικής αλυσίδας, όπως έχει προκύψει από το PSM. Ο υπολογισμός/εκτίμησή τους πραγματοποιείται με στόχο την αξιολόγηση της βιωσιμότητας και κυκλικότητας της αλυσίδας.

Αρχικά, επιλέγονται κατάλληλοι KPIs από τους κοινωνικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και διακυβερνητικούς πυλώνες, σε συνεργασία με τη βιομηχανία. Στη συνέχεια, οι δείκτες αυτοί συνδέονται με τις αντίστοιχες διεργασίες και καθορίζονται οι μέθοδοι υπολογισμού τους, συμπεριλαμβανομένων εξισώσεων, μεταβλητών και παραμέτρων εισόδου/εξόδου. Τέλος, υλοποιούνται μοντέλα στο PSM για τον υπολογισμό των επιλεγμένων KPIs, καθώς και για την αξιολόγηση της επίδρασής τους τόσο στις μεμονωμένες διεργασίες όσο και στο σύνολο της βιομηχανικής αλυσίδας.

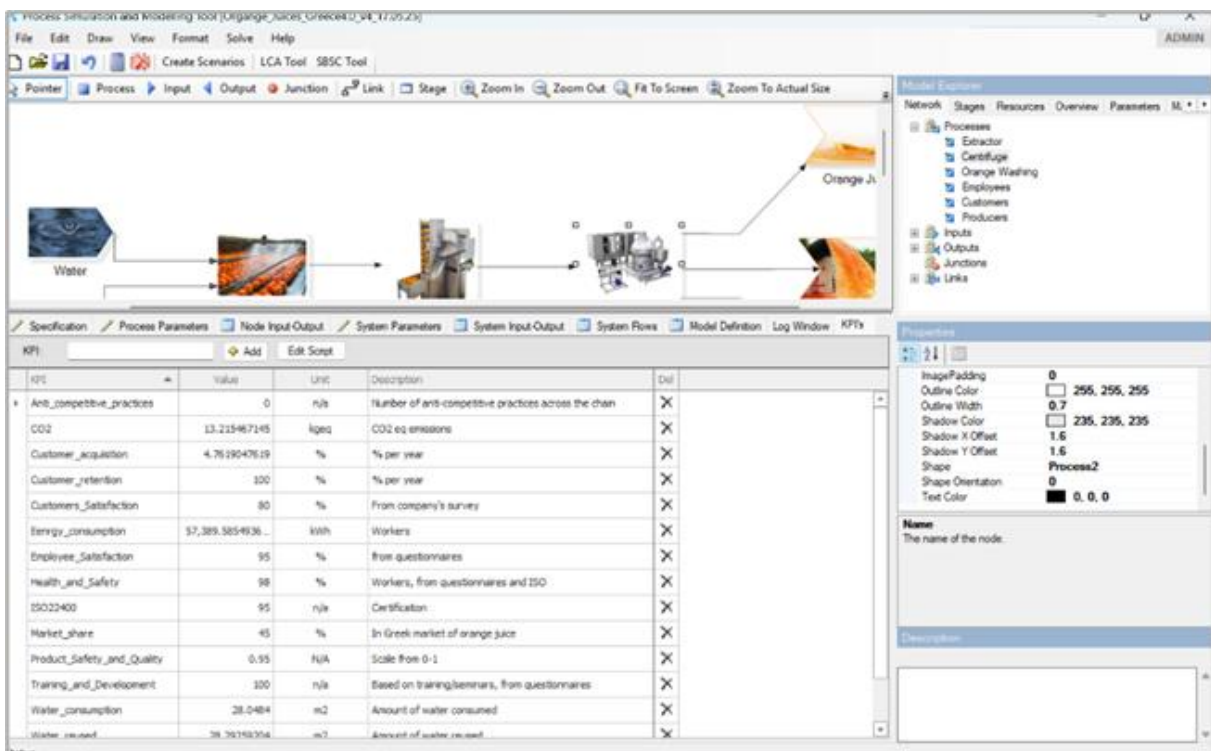
2.10.3.3 Ορισμός και Υπολογισμός βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs)

Όλα τα επιλεγόμενα KPIs υπολογίζονται μέσω της επικαιροποιημένης έκδοσης του PSM, η οποία έχει αναβαθμιστεί στο πλαίσιο του Greece4.0, με στόχο τον ορισμό, συσχέτιση και υπολογισμό των KPIs με πόρους του συστήματος (διεργασίες, παραμέτρους των διεργασιών, παραμέτρους ολόκληρου του συστήματος, κτλ.). Αυτό το γεγονός, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εκτελέσει κάθε είδους ανάλυση που σχετίζεται με κάποιο, κάποια ή όλα τα επιλεγμένα KPIs της αλυσίδας. Κάθε KPI ορίζεται μέσω ενός script ανεπτυγμένο σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic (VB), χρησιμοποιώντας την επιλογή Script Editor, όπως φαίνεται στο ενδεικτικό παρακάτω παράδειγμα στην Εικόνα 79.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 79: Παράδειγμα δημιουργίας KPI στο περιβάλλον του PSM Script Editor



Εικόνα 80 Παράδειγμα παρουσίασης αποτελεσμάτων των KPIs στο PSM

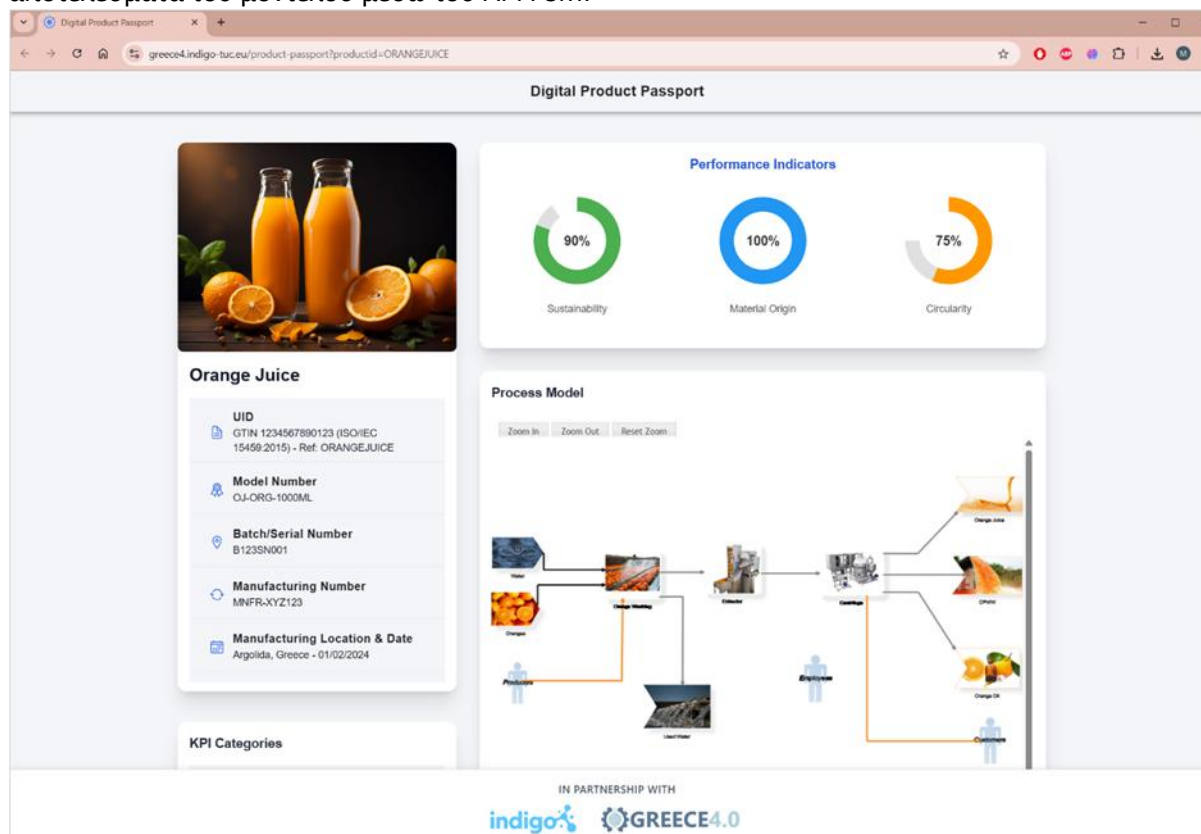
Όπως διακρίνεται στην Εικόνα 79, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού ή/και εκτίμησης δεικτών, που αφορούν, μετρούνται, μεταβάλλονται σε περισσότερες από μία διεργασίες της αλυσίδας, ή ακόμη και από το σύνολο των διεργασιών της αλυσίδας, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο αποτελέσματα παραγόμενα από το δυναμικό μοντέλο, και σε συνεχή δυναμική αλληλεπίδραση με αυτό. Στην Εικόνα 80 απεικονίζεται ο τρόπος εμφάνισης των υπολογιζόμενων KPIs για μία αλυσίδα, τις μονάδες μέτρησης

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής τους, καθώς και μια μικρή επεξηγηματική περιγραφή σχετικά με το αποτέλεσμα ή τον τρόπο υπολογισμού του κάθε δείκτη.

Σε αυτό το στάδιο, και έχοντας υπολογίσει όλες τις ροές (flows), τις παραμέτρους (parameters) τις εξόδους (outputs) της αλυσίδας, καθώς και τα επιλεγμένα KPIs, το εργαλείο, μέσω του PSM API, έχει τη δυνατότητα να «μεταφέρει» τα αποτελέσματα του μοντέλου στο Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος (Digital Product Passport, DPP). Τα εικονιζόμενα αποτελέσματα στο DPP, δύναται να επιλέγονται και παρουσιάζονται κάθε φορά, κατά τον τρόπο που επιλέγει η υπό εξέταση βιομηχανία, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο εξατομικευμένες υπηρεσίες στις βιομηχανίες, σύμφωνα με τις προτεραιότητες, ανάγκες και στόχους της.

2.10.3.4 Ανάπτυξη Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP)

Η υλοποίηση αυτού του σταδίου αφορά στη δημιουργία του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος και της οπτικοποίησής του μέσω διαδικτυακής πλατφόρμας. Πρόσβαση στην πλατφόρμα, η οποία φιλοξενείται στον server της ομάδας indigo του Πολυτεχνείου Κρήτης, δίνεται μέσω του συνδέσμου <https://greece4.indigo-tuc.eu/product-passport?productid=ORANGEJUICE>. Η συνολική, γενική απεικόνιση του Ψηφιακού Διαβατηρίου για τη βιομηχανία χυμού φαίνεται στην Εικόνα 81. Πρόκειται για μία online πλατφόρμα, η οποία απεικονίζει επιλεγμένες, κρίσιμες πληροφορίες για το εξεταζόμενο προϊόν ή τα παραγόμενα προϊόντα της υπό εξέταση αλυσίδας, ενσωματώνοντας συνακόλουθα αποτελέσματα του μοντέλου μέσω του API PSM.



Εικόνα 81 Το φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος παρουσιάζει με σαφήνεια όλα τα απαραίτητα δεδομένα μέσω οργανωμένων και ευανάγνωστων επιμέρους στοιχείων.

Δεδομένων των αποτελεσμάτων που μπορούν να παραχθούν/εξαχθούν/υπολογιστούν από το PSM, πλήθος πληροφορίας μπορεί να απεικονιστεί και διαχυθεί μέσω του DPP. Στοχεύοντας ωστόσο στη δημιουργία ενός εργαλείου που θα προάγει την ενημέρωση, διαφάνεια, κυκλικότητα και βιωσιμότητα του προϊόντος, οι πληροφορίες που απεικονίζονται μέσω του DPP περιλαμβάνουν:

1. Στοιχεία Ταυτοποίησης Προϊόντος (Product Identification Data).

Πρόκειται για βασικές πληροφορίες που σχετίζονται με την ταυτότητα του προϊόντος (Εικόνα 82), όπως:

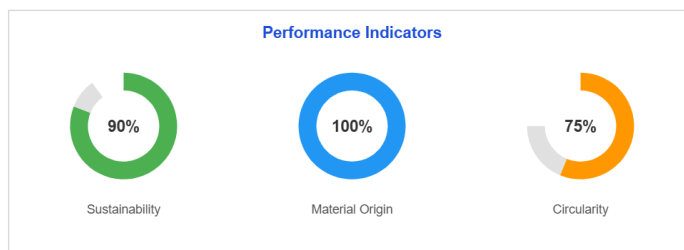
- Όνομα προϊόντος
- Κωδικό ή αναγνωριστικό προϊόντος (ακολουθώντας το πρότυπο ISO/IEC 15459:2015)
- Αριθμός μοντέλου
- Σειριακός αριθμός ή αριθμός παρτίδας
- Αριθμός παραγωγής
- Ημερομηνία και τοποθεσία παραγωγής



Εικόνα 82 Βασικά στοιχεία ταυτοποίησης του προϊόντος

2. Συνολική Εικόνα Απόδοσης Κυκλικότητας και Βιωσιμότητας

Η συγκεκριμένη ενότητα (Εικόνα 83) βρίσκεται στο άνω μέρος της απεικόνισης του DPP, παρουσιάζοντας την βαθμολογία του εξεταζόμενου προϊόντος και της αλυσίδας παραγωγής του ως προς τη βιωσιμότητα (Sustainability), την κυκλικότητα (Circularity) και την προέλευση του προϊόντος (Material Origin). Στην προκειμένη περίπτωση το material origin αφορά την προέλευση της πρώτης ύλης, των πορτοκαλιών, τα οποία προέρχονται αποκλειστικά και μόνο από τοπικούς παραγωγούς, στην Αργολίδα. Η συνολική βαθμολογία προκύπτει από τα αποτελέσματα των επιμέρους δεικτών, όπως παρουσιάζονται στην υποενότητα 4, στη συνέχεια.

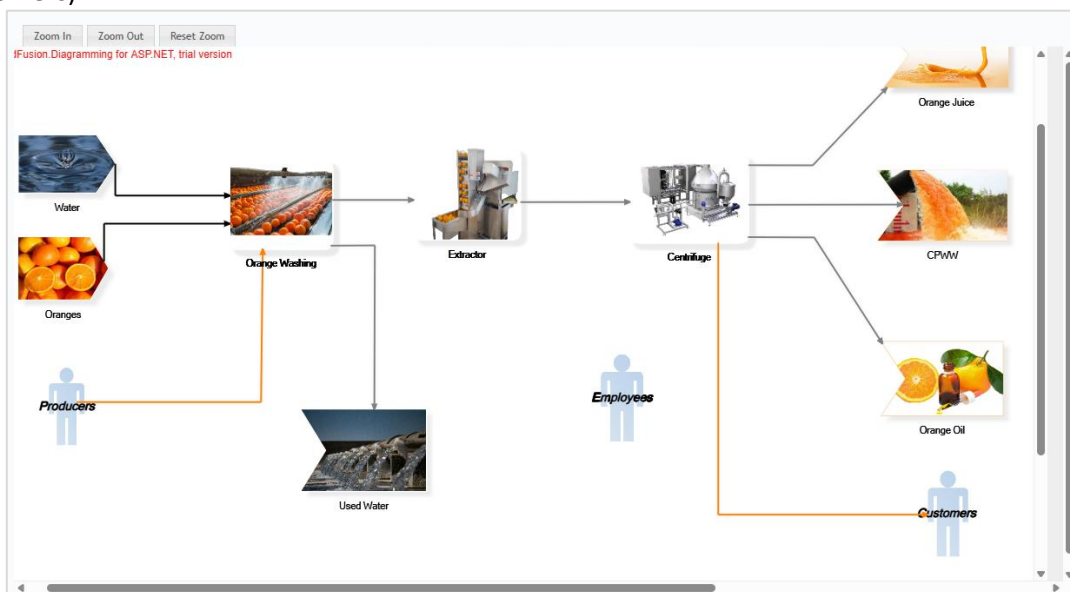


Εικόνα 83 Οι τρεις βασικές βαθμολογίες (scores) που αντικατοπτρίζουν την βιωσιμότητα και κυκλικότητα του προϊόντος

3. Διάγραμμα προσομοίωσης PSM

Το διάγραμμα ροής (Εικόνα 84) αναπαριστά την αλυσίδα παραγωγής, με κάθε διεργασία και πόρο, όπως παρουσιάζεται στο εργαλείο PSM, για τον υπολογισμό ροών, καταναλώσεων, παραμέτρων διεργασιών, παραμέτρων συστήματος, τελικού παραγόμενου προϊόντος και αποβλήτων ή παραγόμενων υποπροϊόντων. Υπάρχει η δυνατότητα μεγέθυνσης και λειτουργία mouseover. Στο διάγραμμα ροής διακρίνονται επίσης οι σχετιζόμενοι με την αλυσίδα παράγοντες/actors, στην

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής προκειμένη περίπτωση οι παραγωγοί (producers), οι εργαζόμενοι (employees), και οι πελάτες (customers).



Εικόνα 84 Το διάγραμμα ροής που αναπαριστά την αλυσίδα παραγωγής του προϊόντος

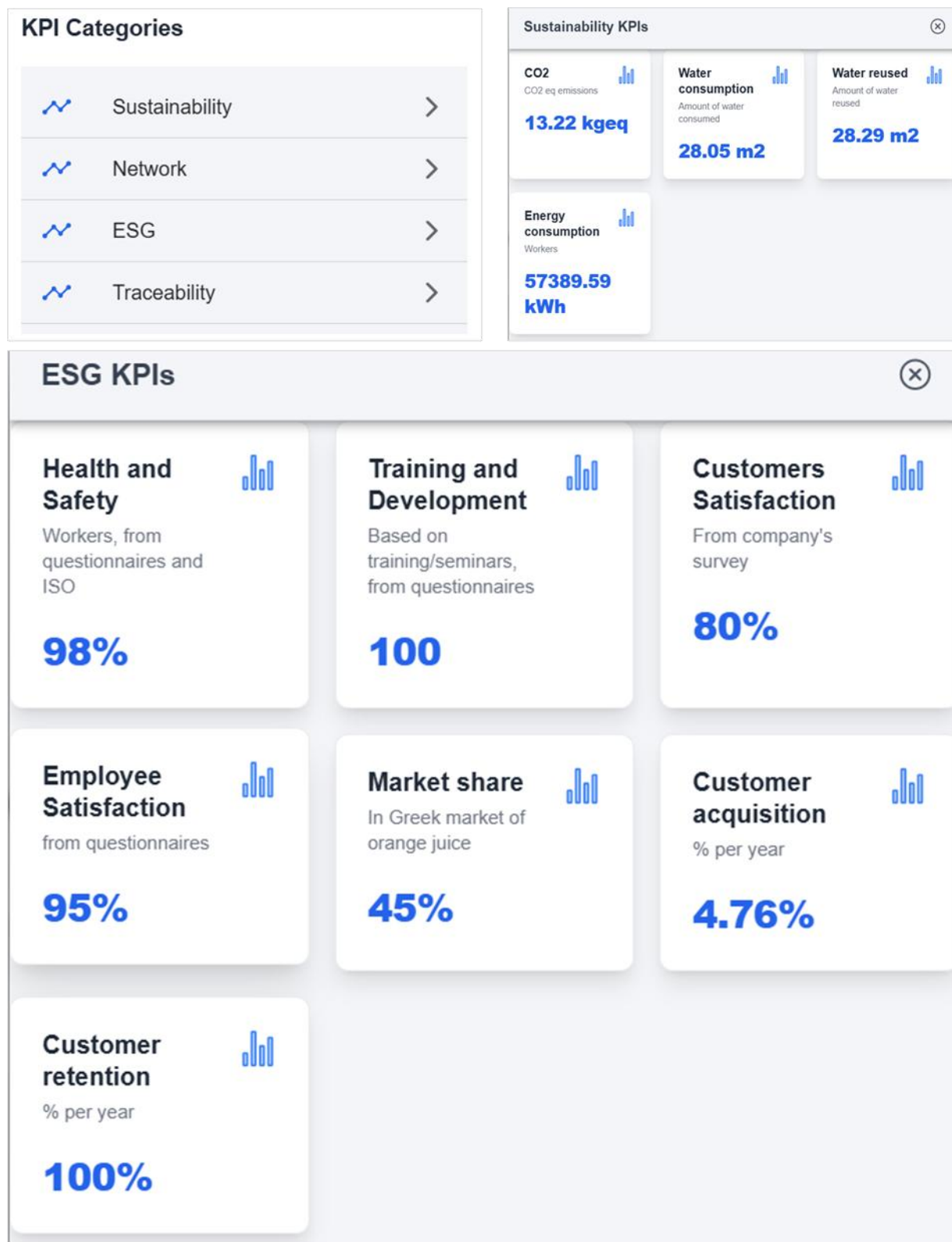
4. Επιλεγμένοι Δείκτες και Αποτελέσματα

Ο συγκεκριμένος πίνακας (κάτω αριστερά στο DPP, Πίνακας 11 Οι βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) χωρίζονται σε ενότητες στο μενού του dashboard), παρουσιάζει συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των επιλεγμένων Δεικτών-KPIs. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.10.3.3, ο κάθε υπολογιζόμενος δείκτης κατηγοριοποιείται μέσα στο PSM ανάλογα με την κατηγορία που ανήκει: Sustainability, Network, ESG & Traceability. Οι πληροφορίες αυτής της ενότητας αποτελούν τους υπολογιζόμενους, μέσω του PSM, δείκτες.

Πίνακας 11 Οι βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) χωρίζονται σε ενότητες στο μενού του dashboard

Ενότητα	Πληροφορία/Δείκτες KPI (ενδεικτικά)
Βιωσιμότητα – Sustainability	Δείκτες που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα (περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία), όπως π.χ. εκπομπές CO ₂ , εξάντληση υδάτινων πόρων, κατανάλωση νερού, κατανάλωση ενέργειας, κ.ά.
Δίκτυο – Network	Δείκτες που συνδέονται με την χαρτογράφηση ενδιαφερόμενων φορέων όπως εργαζόμενοι (π.χ., ικανοποίηση εργαζομένων), πελάτες (ασφάλεια και ποιότητα προϊόντος, ικανοποίηση πελατών, απόκτηση νέων κτλ.), και λοιπά ενδιαφερόμενα μέρη που έχουν άμεση ή έμμεση σύνδεση με την αλυσίδα (παραγωγοί, κτλ.)
ESG	Δείκτες που συνδέονται με αξιολόγηση επιδόσεων σε περιβαλλοντικά, κοινωνικά και διακυβερνητικά κριτήρια π.χ., κοινωνικοί δείκτες, δείκτες παραγωγικότητας και ανάπτυξης
Ιχνηλασιμότητα – Traceability	Δείκτες που συνδέονται με την ιχνηλασιμότητα του προϊόντος π.χ., προέλευση πρώτης ύλης, σύνθεση, τελική ποσότητα προϊόντος και ποσότητα παραπροϊόντων

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 85 Βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) σε κατηγορίες, και τα αποτελέσματά τους, τα οποία εμφανίζονται σε αναδυόμενα παράθυρα

2.10.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Τα τρία επιμέρους στάδια που διαρθρώνουν την τελική λύση εμπεριέχουν τα τρία εργαλεία που αναπτύχθηκαν για αυτόν τον σκοπό και μπορούν να αξιοποιηθούν στην βιομηχανία σε όλη την αλυσίδα αξίας (Πίνακας 12).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Πίνακας 12: Εφαρμογές και αξιοποίηση των εργαλείων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της λύσης στη βιομηχανία.

Ψηφιακό Εργαλείο	Εφαρμογή στη Βιομηχανία	Τρόποι Εφαρμογής/Αξιοποίησης
Εργαλείο PSM (Process Simulation and Monitoring Tool)	Μοντελοποίηση και παρακολούθηση της πραγματικής παραγωγικής διαδικασίας	<ul style="list-style-type: none"> - Εντοπισμός σημείων απώλειας υλικών ή ενέργειας - Προσομοίωση σεναρίων για μείωση κόστους ή εκπομπών - Υποστήριξη λήψης αποφάσεων - Παραμετροποίηση μοντέλων για διαφορετικές συνθήκες παραγωγής
	Δυναμική προσομοίωση και παρακολούθηση επιδόσεων	<ul style="list-style-type: none"> - Υπολογισμός επιλεγμένων KPIs σε πραγματικό χρόνο - Ανίχνευση μη αποδοτικών ή μη κυκλικών βημάτων
C-SBSC (Circular- Sustainability Balanced Scorecard)	Αξιολόγηση κυκλικότητας και βιωσιμότητας των διεργασιών	<ul style="list-style-type: none"> - Καθοδήγηση για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης της αλυσίδας - Παροχή διαφάνειας σε συνεργάτες, ελεγκτικές αρχές και καταναλωτές
	Καταγραφή και διαμοιρασμός στοιχείων σχετικά με το προϊόν	<ul style="list-style-type: none"> - Ενίσχυση συμμόρφωσης με κανονισμούς - Προώθηση υπεύθυνης κατανάλωσης και επαναχρησιμοποίησης
Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος (Digital Product Passport)	Σύνδεση του συστήματος με υπάρχουσες βιομηχανικές πλατφόρμες (π.χ., ERP ³ , MES ⁴ , IoT)	<ul style="list-style-type: none"> - Ενοποίηση δεδομένων από υφιστάμενα συστήματα - Ενίσχυση ιχνηλασιμότητας και αυτοματοποίησης - Ευκολία εφαρμογής σε υπάρχουσες γραμμές παραγωγής

Η αξιοποίηση των εργαλείων ως μία ολοκληρωμένη λύση για την μεταποιητική βιομηχανία, επιτυγχάνει την ενίσχυση της διαφάνειας και ιχνηλασιμότητας, αξιολογώντας ταυτόχρονα κρίσιμους δείκτες (περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς, διακυβέρνησης, οικονομικούς), με τελικό στόχο την αύξηση της ανταγωνιστικότητας της ελληνικής μεταποιητικής βιομηχανίας, αλλά και της βιομηχανίας σε γενικότερο πλαίσιο. Η εφαρμογή της λύσης προσφέρει ουσιαστικά οφέλη τόσο εσωτερικά (στη βιομηχανία) όσο και εξωτερικά (Πίνακας 13):

Πίνακας 13: Οι φορείς που επωφελούνται από την εφαρμογή της παρούσας λύσης

Ενδιαφερόμενα Μέρη	Κύρια Οφέλη	
Εσωτερικοί – Τομείς Βιομηχανίας		
Παραγωγή	<ul style="list-style-type: none"> - Μείωση κόστους, ενέργειας, αποβλήτων - Γρηγορότερη λήψη αποφάσεων - Αυτοματοποιημένος υπολογισμός KPIs - Μείωση κινδύνων (π.χ., διακοπές λόγω μη συμμόρφωσης) 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Μείωση αποθεμάτων με ακριβή προγνωστικά 	
	Εφοδιασμός & Logistics	<ul style="list-style-type: none"> - Κοινή χρήση δεδομένων με συνεργάτες για διαφανείς συναλλαγές - Green logistics: Επιλογή οδών με μικρότερο CO2
Εξωτερικοί		

³ ERP (Σύστημα Ενδοεπιχειρησιακού Σχεδιασμού): λογισμικό που ενοποιεί και διευκολύνει τη διαχείριση βασικών επιχειρηματικών διαδικασιών (οικονομικές, logistics, εφοδιασμού, HR κ.α.).

⁴ MES (Σύστημα Εκτέλεσης Παραγωγής): λογισμικό παρακολούθησης και ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας σε κάθε στάδιο (από πρώτη ύλη έως το τελικό προϊόν).

Έμποροι & Μεταπωλητές	- Εμπιστοσύνη των καταναλωτών λόγω διαφάνειας
Διαχειριστές Αποβλήτων & Φορείς Ανακύκλωσης	- Ανταγωνιστικό πλεονέκτημα μέσω της προβολής της βιωσιμότητας των προϊόντων
Startups & Καινοτόμοι	- Βελτιωμένη αποτελεσματικότητα της διαλογής / ανακύκλωσης
Ρυθμιστικές Αρχές & Κυβερνήσεις	- Ανάκτηση υψηλότερης αξίας
Ακαδημαϊκοί/Ερευνητές	- Τα ανοικτά πρότυπα DPP διευκολύνουν την είσοδο σε πράσινες τεχνολογίες και την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων
Τοπικές Κοινότητες	- Οι προσομοιώσεις PSM βοηθούν στην κατασκευή πρωτοτύπων κυκλικών διεργασιών με χαμηλό κόστος
ΜΚΟ	- Εποπτεία συμμόρφωσης και πολιτικής
Ευρύ Κοινό	- Αυτοματοποιημένοι έλεγχοι
Καταναλωτές	- Παρακολούθηση της προόδου των ESG σε ολόκληρη τη βιομηχανία.
	- Πρόσβαση σε πραγματικά βιομηχανικά δεδομένα για ερευνητικούς σκοπούς
	- Μελέτες περίπτωσης
	- Μειωμένα βιομηχανικά απόβλητα που βελτιώνουν την ποιότητα του περιβάλλοντος
	- Συμμετοχή της κοινότητας για βιώσιμες πρακτικές των επιχειρήσεων
	- Προώθηση της βιωσιμότητας - Ανεξάρτητη επαλήθευση των ισχυρισμών της βιομηχανίας
	- Η δημόσια πρόσβαση στο DPP αυξάνει την ευαισθητοποίηση στην κυκλικότητα
	- Μεγαλύτερη διαφάνεια για τη βιωσιμότητα των προϊόντων
	- Πληροφορίες ποιότητας/ασφάλειας των διεργασιών
	- Ενημέρωση, εκπαίδευση ευαισθητοποίηση
	- Πρόσβαση σε πλήρη ιστορικό προϊόντων
	- Σύγκριση προϊόντων βάσει βιωσιμότητας
	- Επιλογή ανθεκτικών και επαναχρησιμοποιούμενων προϊόντων

Υπερκείμενος στόχος της Τεχνικής Λύσης 9, είναι η βελτιστοποίηση των κυκλικών αλυσίδων αξίας και η ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των βιομηχανιών, προσφέροντας προστιθέμενη αξία στη βιωσιμότητα, την κυκλική οικονομία και την ανθεκτικότητα. Μακροπρόθεσμα, η λύση έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί ώστε να προσφέρει σημαντικά οφέλη στον μετασχηματισμό της μεταποιητικής οικονομίας, αλλά και της κοινωνίας προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον. Αφενός, προωθεί τη μετάβαση της μεταποιητικής βιομηχανίας προς ένα κυκλικό μοντέλο, στηρίζοντας παράλληλα τη μείωση αποβλήτων και εκπομπών CO₂ και περιορίζοντας την εξάντληση φυσικών πόρων. Αφετέρου, οι καταναλωτές αποκτούν πρόσβαση σε πληροφορία σχετική με το προϊόν που τους ενθαρρύνει να υιοθετήσουν φιλικότερες προς το περιβάλλον συνήθειες και να επιλέξουν με γνώμονα τη βιωσιμότητα.

2.11 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

2.11.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η ανάπτυξη της εν λόγω λύσης επιμερίζεται στα ακόλουθα βασικά στάδια:

1. Σχεδίαση και ανάπτυξη πλατφόρμας προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων: Έγινε η σχεδίαση της εννοιολογικής και της τεχνικής αρχιτεκτονικής της λύσης, και του μοντέλου δεδομένων, καθώς και η υλοποίηση του συνόλου των τεχνολογιών.
2. Υπηρεσίες διασύνδεσης με πηγές δεδομένων πραγματικού χρόνου και ενοποίησης δεδομένων: Οι υπηρεσίες διασύνδεσης με πηγές δεδομένων πραγματικού χρόνου και ενοποίησης δεδομένων έχουν ενσωματωθεί στην αρχιτεκτονική του συστήματος με σχετικές διεπαφές και δομικά στοιχεία. Το σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων υποστηρίζει την αποθήκευση και επεξεργασία διαφόρων τύπων δεδομένων. Επίσης αναπτύχθηκαν και ολοκληρώθηκαν με την

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

πλατφόρμα τεχνικές προεπεξεργασίας δεδομένων για την υποβοήθηση της εκπαίδευσης των μοντέλων Μηχανικής Μάθησης σε πραγματικό χρόνο.

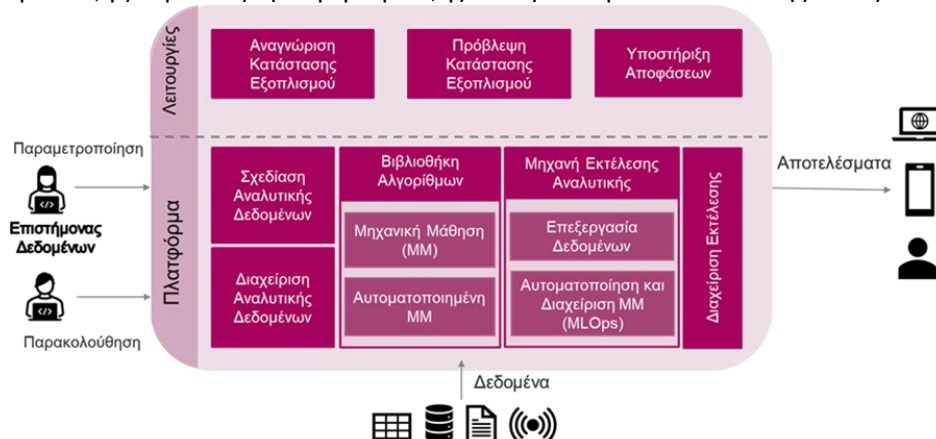
3. Υλοποίηση και ενσωμάτωση αλγορίθμων Αυτοματοποιημένης Μηχανικής Μάθησης (Automated Machine Learning - AutoML): Η ανάπτυξη και ενσωμάτωση μεθόδων AutoML επιτρέπει στην πλατφόρμα να ενσωματώνει την ροή πληροφοριών με διαδικασία αυτόματης επιλογής, εκπαίδευσης και βελτιστοποίησης μοντέλων Μηχανικής Μάθησης, χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρέμβασης. Το αποτέλεσμα αφορά την πρόβλεψη της κατάστασης υγείας του εξοπλισμού.
4. Υλοποίηση και ενσωμάτωση αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης (Reinforcement Learning - RL): Οι αλγόριθμοι RL που υλοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στην πλατφόρμα δεν χρησιμοποιούν μοντέλο (model-free) και κατηγοριοποιούνται σε μεθόδους off-policy και σε μεθόδους on-policy. Οι off-policy μέθοδοι περιλαμβάνουν τους Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) και Soft Actor-Critic (SAC), ενώ οι on-policy μέθοδοι περιλαμβάνουν τους Proximal Policy Optimization (PPO) και Advantage Actor-Critic (A2C). Το αποτέλεσμα αφορά την πρόβλεψη της κατάστασης υγείας του εξοπλισμού.
5. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων: Για την παρακολούθηση και απεικόνιση της επεξεργασίας των δεδομένων και των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο, αναπτύχθηκε μια διεπαφή χρήστη με το Tensorboard.

2.11.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η *Εικόνα 36* απεικονίζει την εννοιολογική αρχιτεκτονική του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τα εξής υποσυστήματα:

- Σχεδίαση Αναλυτικής Δεδομένων: ο αναλυτής δεδομένων σχεδιάζει και διαμορφώνει την ανάλυση.
- Διαχείριση Αναλυτικής Δεδομένων: εκτελεί την επαναληπτική διαδικασία διαχείρισης του κύκλου ζωής του μοντέλου ανάλυσης.
- Βιβλιοθήκη Αλγορίθμων: περιλαμβάνει αλγορίθμους Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning – ML) και Αυτοματοποιημένης Μηχανικής Μάθησης (Automated Machine Learning – AutoML).
- Μηχανή Εκτέλεσης Αναλυτικής: εκτελεί την επεξεργασία των δεδομένων, λαμβάνει την σχεδιασμένη ανάλυση και εκτελεί την κατασκευή και ανάπτυξή της.
- Διαχείριση Εκτέλεσης: αναπτύσσει και εκτελεί την σχεδιασμένη ανάλυση σύμφωνα με τη ροή εργασίας που ορίζεται από τη σχετική διαμόρφωση ανάπτυξης.

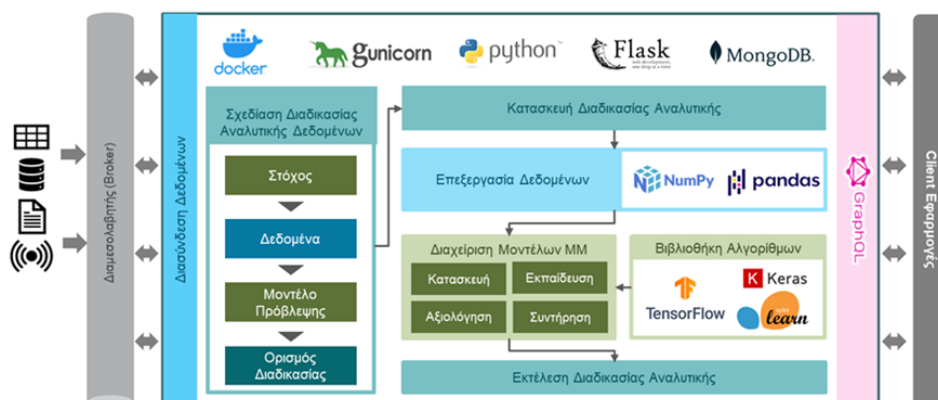
Το σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων υποστηρίζει διάφορους τύπους δεδομένων. Για να υποστηριχθούν οι ανάγκες αποθήκευσης δεδομένων, περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες αποθήκευσης: α) Αποθήκη Δεδομένων, β) Βιβλιοθήκη Αλγορίθμων, γ) Βάση Δεδομένων Ανάλυσης και δ) Βάση Μοντέλων.



Εικόνα 86 Εννοιολογική αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

Η *Εικόνα 87* απεικονίζει την τεχνική αρχιτεκτονική που αφορά την υλοποίηση με τη μορφή μιας αυτόνομης διαδικτυακής εφαρμογής. Αυτή η αρχιτεκτονική υποστηρίζει την υλοποίηση πολλών και

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής δυναμικών διαδικασιών προβλεπτικών αναλύσεων, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις ετερογενείς πηγές δεδομένων μέσα σε μία ενιαία διαδικτυακή εφαρμογή. Στόχος της εφαρμογής είναι η ελαχιστοποίηση της προσπάθειας που απαιτείται από τον επιστήμονα δεδομένων που είναι υπεύθυνος για τη διεξαγωγή των διαδικασιών προβλεπτικών αναλύσεων, παρέχοντας προκαθορισμένους αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιήσει για την ανάπτυξη νέων προβλεπτικών διαδικασιών.



Εικόνα 87 Τεχνική αρχιτεκτονική και λεπτομέρειες υλοποίησης ενδιάμεσης έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

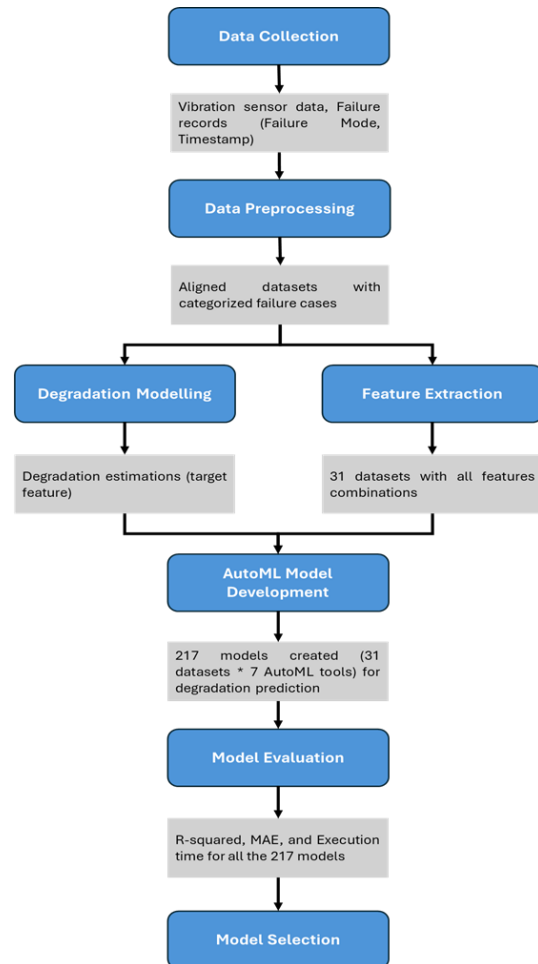
Το σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων υλοποιείται ως μια αυτόνομη εφαρμογή που είναι containerized με Docker και docker-compose, περιλαμβάνοντας τις απαραίτητες υπηρεσίες και διευκολύνοντας την ανάπτυξη των στοιχείων. Για να αποσυνδέσουμε περαιτέρω την ανάπτυξη σε περιβάλλον ανάπτυξης από την 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. 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. Στο επόμενο Παραδοτέο, θα παρουσιαστούν οι επεκτάσεις της τεχνικής αρχιτεκτονικής προκειμένου να μπορεί να ενσωματώσει τις μεθόδους AutoML, καθώς και την διεπαφή χρήστη για την αυτοματοποιημένη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αναλυτικής δεδομένων.

2.11.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα 2 βασικά επιμέρους λειτουργικά τμήματα της πλατφόρμας, τα οποία υποστηρίζονται από τα υπόλοιπα τμήματα της προηγούμενης υποενότητας: AutoML για πρόβλεψη της κατάστασης υγείας εξοπλισμού και RL για πρόβλεψη της κατάστασης υγείας εξοπλισμού. AutoML για πρόβλεψη της κατάστασης υγείας εξοπλισμού. Αυτή η προσέγγιση αποτελείται από τα παρακάτω βήματα, τα οποία απεικονίζονται και στην Εικόνα 88:

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Συλλογή Δεδομένων:** Τα απαραίτητα δεδομένα για την προτεινόμενη προσέγγιση είναι: (α) Δεδομένα δονήσεων που παράγονται από αισθητήρες εγκατεστημένους στον εξοπλισμό. (β) Καταγραφές βλαβών μαζί με χρονικές σημάνσεις, αποθηκευμένες σε συστήματα διαχείρισης συντήρησης (CMMS) ή σε προσαρμοσμένη μορφή (π.χ. Excel). Αυτά τα σύνολα δεδομένων τροφοδοτούν το επόμενο βήμα.
- Προεπεξεργασία Δεδομένων:** Στοχεύει στην αντιμετώπιση προβλημάτων των ακατέργαστων δεδομένων που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση των μοντέλων Μηχανικής Μάθησης. Τέτοια προβλήματα περιλαμβάνουν: Ασυνέπειες και ελλείψεις, Πλεονάζουσες ή μη ενημερωτικές στήλες, Θόρυβο και αναξιόπιστα δεδομένα, Χρονική ασυμφωνία μεταξύ μετρήσεων και καταγραφών. Οι ενέργειες που περιλαμβάνει το στάδιο αυτό είναι: Χρονική ευθυγράμμιση μεταξύ των δεδομένων δονήσεων και των καταγραφών βλαβών, Καθαρισμός μη χρήσιμων στηλών, Ομογενοποίηση ονομάτων στηλών και τυποποίηση τύπων δεδομένων, Ομαδοποίηση κατηγοριών βλαβών με διαφορετική ονομασία, Ενοποίηση δεδομένων από διαφορετικές πηγές σε ενιαία μορφή. Το αποτέλεσμα είναι ευθυγραμμισμένα και κατηγοριοποιημένα δεδομένα βλαβών, τα οποία προωθούνται στη Μοντελοποίηση Φθοράς.
- Μοντελοποίηση Φθοράς:** Αν και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες κατανομές πιθανοτήτων στη μοντελοποίηση φθοράς, η κατανομή Weibull θεωρείται η πλέον κατάλληλη για βιομηχανικές εφαρμογές. Η Weibull επιτρέπει: (α) Αναπαράσταση αυξανόμενων, μειούμενων ή σταθερών ρυθμών αποτυχίας μέσω της παραμέτρου μορφής β , (β) Εκτίμηση της «χαρακτηριστικής ζωής» με την παράμετρο κλίμακας η , η οποία αντιπροσωπεύει τον χρόνο κατά τον οποίο έχει αποτύχει το 63.2% του πληθυσμού (όταν $\beta = 1$). Η έξοδος αυτής της φάσης είναι ένα σύνολο δεδομένων εμπλουτισμένο με μια νέα στήλη-στόχο που αναπαριστά την εκτιμώμενη φθορά μέσω της κατανομής Weibull. Αυτή η στήλη χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη μοντέλων AutoML.
- Εξαγωγή Χαρακτηριστικών:** Εκτελείται παράλληλα με τη Μοντελοποίηση Φθοράς και στοχεύει στην εξαγωγή στατιστικών χαρακτηριστικών στο πεδίο του χρόνου από τα σήματα δονήσεων, όπως: (α) Mean: Εκφράζει τη μέση συμπεριφορά του σήματος, (β) Standard Deviation: Ανιχνεύει μεταβλητότητα και αστάθεια, (γ) Skewness: Εκφράζει την ασυμμετρία της κατανομής των δεδομένων, (δ) Kurtosis: Ανιχνεύει αιχμηρά ή σπάνια γεγονότα. Η έξοδος είναι εμπλουτισμένα δεδομένα με 12 επιπλέον στήλες χαρακτηριστικών ανά μεταβλητή αισθητήρα, οδηγώντας σε 31 συνολικά συνδυασμούς χαρακτηριστικών, που τροφοδοτούν την Ανάπτυξη Μοντέλου AutoML.
- Ανάπτυξη Μοντέλου AutoML:** Σε αυτό το στάδιο συνδυάζονται τα δεδομένα από τη Μοντελοποίηση Υποβάθμισης και την Εξαγωγή Χαρακτηριστικών. Δημιουργούνται μοντέλα για 31 διαφορετικούς συνδυασμούς χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας 7 AutoML πλαίσια: TPOT, AutoGluon, AutoKeras, H2O, AutoSklearn, FastAI, MLjar. Συνολικά δημιουργούνται 217



Εικόνα 88 Μεθοδολογία της πρόβλεψης κατάστασης της υγείας του εξοπλισμού με AutoML

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης της υποβάθμισης του εξοπλισμού. Αυτά προωθούνται στην Αξιολόγηση Μοντέλων.

- 6. Αξιολόγηση Μοντέλων:** Τα μοντέλα αξιολογούνται με βάση: (α) R^2 (Συντελεστής Προσδιορισμού): Δείχνει πόσο καλά εξηγεί το μοντέλο τη διακύμανση των δεδομένων, (β) Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error - MAE): Μέτρο ακρίβειας σε πραγματικές μονάδες, (γ) Χρόνος Εκτέλεσης: Χρονική αποδοτικότητα κατά την εκπαίδευση και δοκιμή. Η έξοδος είναι μια συλλογή τιμών για τους παραπάνω δείκτες για καθένα από τα 217 μοντέλα.
- 7. Επιλογή Μοντέλου:** Σε αυτό το στάδιο, γίνεται σύγκριση μεταξύ των μοντέλων με βάση τους δείκτες αξιολόγησης, προκειμένου να εντοπιστούν τα μοντέλα με την καλύτερη απόδοση ως προς τις προαναφερθείσες μετρικές αξιολόγησης.

RL για πρόβλεψη της κατάστασης υγείας εξοπλισμού

Η πρόβλεψη της κατάστασης υγείας εξοπλισμού βασίζεται σε δεδομένα από την παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού με αισθητήρες. Το πρόβλημα μοντελοποιείται και μορφοποιείται με Markov Decision Process (MDP) και επιλύεται με αλγόριθμους Ενισχυτικής Μάθησης (RL) προκειμένου να αναπτυχθεί ένας RL agent που να λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις για την πρόβλεψη της φθοράς. Οι αλγόριθμοι ενισχυτικής μάθησης που εφαρμόζονται δεν χρησιμοποιούν μοντέλο (model-free) και κατηγοριοποιούνται σε μεθόδους off-policy και σε μεθόδους on-policy. Οι off-policy μέθοδοι περιλαμβάνουν τους Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) και Soft Actor-Critic (SAC), ενώ οι on-policy μέθοδοι περιλαμβάνουν τους Proximal Policy Optimization (PPO) και Advantage Actor-Critic (A2C). Οι βασικές μετρικές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση είναι το μέσο μήκος επεισοδίου και η μέση ανταμοιβή επεισοδίου.

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή κάθε αλγορίθμου:

- DDPG: Χρησιμοποιεί συνεχή διαστήματα ενεργειών και συνδυάζει την εκμάθηση Q-function και πολιτικής για αποδοτική λήψη αποφάσεων.
- SAC: Χρησιμοποιεί μια στοχαστική πολιτική με κανονικοποίηση εντροπίας για να πετύχει μια ισορροπία μεταξύ εξερεύνησης και εκμετάλλευσης. Αυτό επιτρέπει στο SAC να προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, προωθώντας τη μάθηση και αποφεύγοντας την πρόωρη σύγκλιση σε υποβέλτιστες λύσεις.
- PPO: Βελτιστοποιεί τις πολιτικές με απλούστερες μεθόδους από το TRPO, διασφαλίζοντας ότι οι νέες πολιτικές δεν αποκλίνουν σημαντικά από τις παλαιότερες μέσω κλιπάριατος (clipping).
- A2C: Συνδυάζει ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων με παράλληλους εργαζόμενους για να μειώσει τη διακύμανση και να σταθεροποιήσει τη μάθηση.

Για την διαδικασία εκπαίδευσης των μοντέλων ενισχυτικής μάθησης, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αλγόριθμοι σε τέσσερα διαφορετικά περιβάλλοντα, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν συνολικά δεκαέξι διαφορετικά μοντέλα. Η διαδικασία εκπαίδευσης εκτελείται σε επαναλήψεις, με κάθε επανάληψη να περιλαμβάνει έναν καθορισμένο αριθμό χρονικών βημάτων. Η υλοποιημένη λύση εφαρμόζει δύο μεθόδους πρόβλεψης: (α) Διορθωτική Πρόβλεψη: Οι προβλέψεις του παράγοντα διορθώνονται βάσει των πραγματικών τιμών φθοράς, (β) Μη Διορθωτική Πρόβλεψη: Οι προβλέψεις ενημερώνονται σταδιακά βάσει των προηγούμενων προβλέψεων. Επίσης, εφαρμόζει 2 μεθόδους υπολογισμού ανταμοιβών (rewards) στον RL agent: (α) Χωρίς Καθυστέρηση: Οι ανταμοιβές υπολογίζονται άμεσα βάσει της ακρίβειας πρόβλεψης, (β) Με Καθυστέρηση: Οι ανταμοιβές προσαρμόζονται με έναν τροποποιητή καθυστέρησης για να δώσουν έμφαση στα μακροπρόθεσμα οφέλη. Μετά από κάθε επανάληψη, τα μοντέλα αξιολογούνται και οι μετρικές απόδοσής τους καταγράφονται.

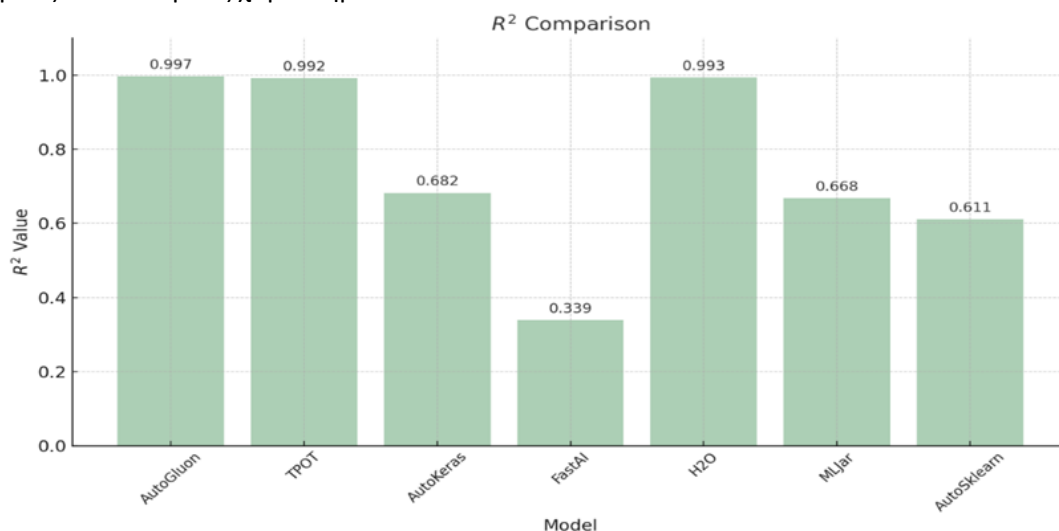
2.11.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τελικής έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων. Η αναλυτική περιγραφή της πιλοτικής εγκατάστασης και της αξιολόγησης της λύσης συμπεριλαμβάνεται στα αντίστοιχα παραδοτέα της ΕΕ3.

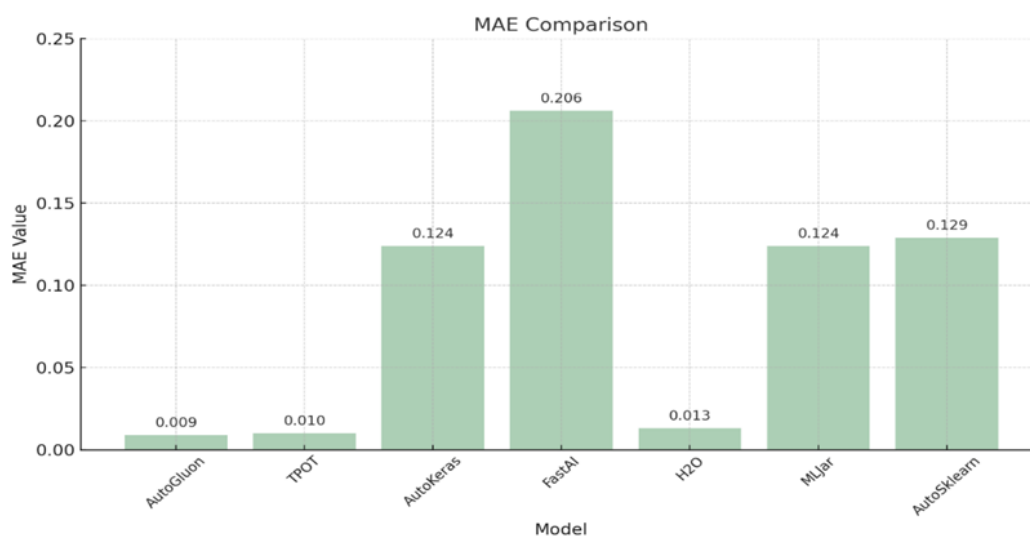
AutoML για πρόβλεψη της κατάστασης υγείας εξοπλισμού

Η αξιολόγηση των επτά πλαισίων AutoML (AutoGluon, TPOT, AutoKeras, FastAI, H2O, MLjar και Auto-sklearn) πραγματοποιήθηκε με βάση την προβλεπτική τους απόδοση (R^2), το μέσο απόλυτο σφάλμα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής (MAE) και την υπολογιστική αποδοτικότητα (χρόνος εκτέλεσης). Η συγκριτική ανάλυση αποκάλυψε διαφορές μεταξύ των πλαισίων όσον αφορά τη συνέπεια, την επεκτασιμότητα και την καταλληλότητά τους για εργασίες προβλεπτικής συντήρησης στη βιομηχανία. Η *Εικόνα 39* απεικονίζει τα αποτελέσματα από την σύγκριση ως προς την ακρίβεια μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών. Η *Εικόνα 40* απεικονίζει τα αποτελέσματα από την σύγκριση ως προς το MAE μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών. Η *Εικόνα 41* απεικονίζει τα αποτελέσματα από την σύγκριση ως προς τον χρόνο εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών

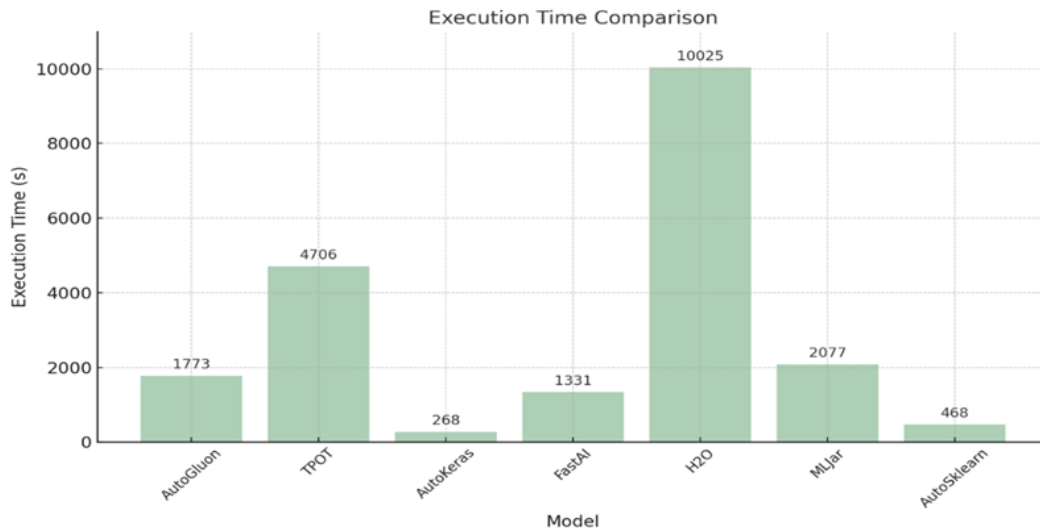


Εικόνα 89 Σύγκριση της ακρίβειας μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών



Εικόνα 90 Σύγκριση του MAE μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

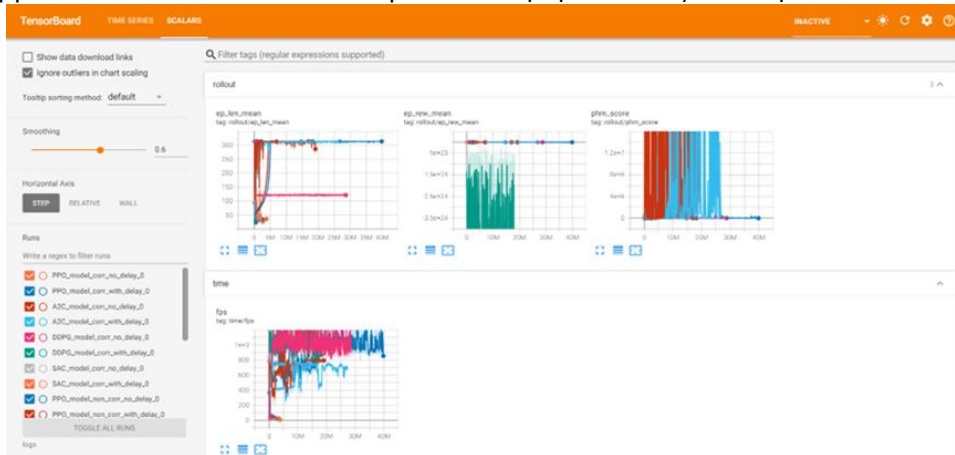


Εικόνα 91 Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών

Το AutoGluon αναδείχθηκε ως το πιο αποδοτικό AutoML πλαίσιο, επιτυγχάνοντας σταθερά υψηλή ακρίβεια (R^2 έως 0.997), χαμηλό σφάλμα ($MAE \approx 0.009$) και σχετικά γρήγορους χρόνους εκτέλεσης. Η αποτελεσματική ενσωμάτωση μοντέλων και η ικανότητα γενίκευσης το καθιστούν κατάλληλο για απαιτητικές, σχεδόν πραγματικού χρόνου εφαρμογές. Το TPOT και το H2O AutoML προσέφεραν επίσης υψηλή ακρίβεια, αλλά το πρώτο υστερεί σημαντικά σε ταχύτητα, ενώ το δεύτερο υπολείπεται σε σύγκριση με το AutoGluon ως προς την κλιμακωσιμότητα και τον χρόνο εκτέλεσης. Αντίθετα, τα AutoKeras, FastAI, MLjar και Auto-sklearn παρουσίασαν μειωμένη ή ασταθή απόδοση. Το AutoKeras απέδωσε χαμηλότερα λόγω της εστίασής του στη βαθιά μάθηση, κάτι που δεν ευνοείται από τα χαρακτηριστικά των δεδομένων δονήσεων. Το FastAI δεν προσαρμόστηκε καλά στην ανάλυση πινάκων δεδομένων, ενώ το MLjar και το Auto-sklearn δεν διακρίθηκαν σε κανέναν επιμέρους τομέα απόδοσης. Συνολικά, το AutoGluon ξεχώρισε για την ισορροπία ανάμεσα σε ακρίβεια, ταχύτητα και αξιοπιστία.

RL για πρόβλεψη της κατάστασης υγείας εξοπλισμού

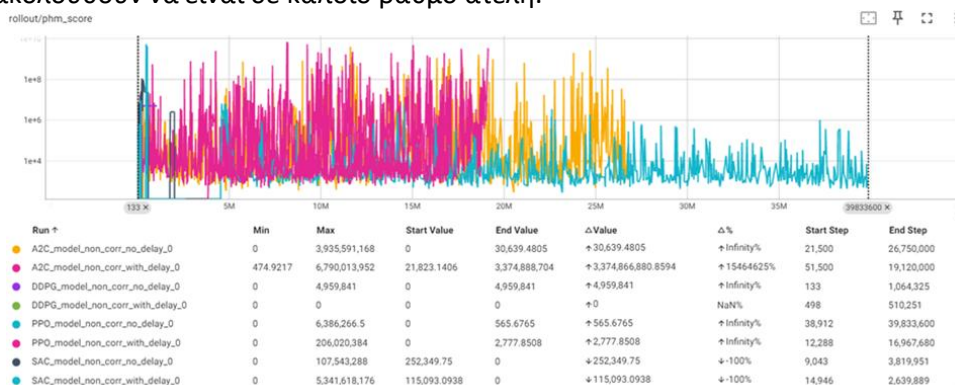
Οι επόμενες εικόνες απεικονίζουν την αξιολόγηση της απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep και την εξομάλυνση των διαγραμμάτων για καλύτερη οπτικοποίηση και εξαγωγή συμπερασμάτων. Για την παρακολούθηση και απεικόνιση της επεξεργασίας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αναπτύχθηκε μια διεπαφή χρήστη με το Tensorboard, ένα toolkit οπτικοποίησης που περιλαμβάνεται στο TensorFlow. Μια προεπισκόπηση απεικονίζεται στην Εικόνα 92.



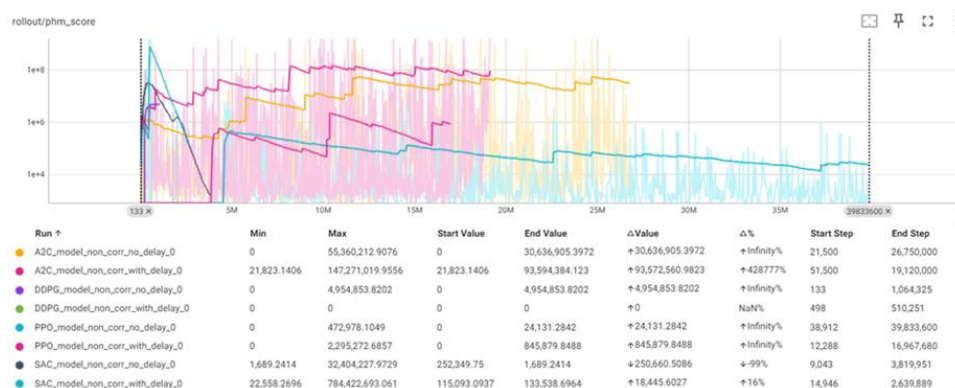
Εικόνα 92 Προεπισκόπηση της διεπαφής χρήστη του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

Το χειρότερο μοντέλο είναι το μοντέλο DDPG "με καθυστέρηση", το οποίο δεν κατάφερε να ολοκληρωθεί. Όλα τα άλλα μοντέλα έχουν φτάσει το μέγιστο μήκος επεισοδίου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Το DDPG "χωρίς καθυστέρηση" έχει μια σταθερά υψηλή απόδοση. Τα A2C, SAC και PPO εμφανίζουν μεγάλη

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής μεταβλητότητα και υψηλή συχνότητα χαμηλών βαθμολογιών ακολουθούμενες από υψηλές κορυφώσεις. Αν και υπάρχει συνεχής βελτίωση σε όλες τις περιπτώσεις, η μεγάλη αστάθεια υποδηλώνει ότι τα μοντέλα εξακολουθούν να είναι σε κάποιο βαθμό ατελή.



Εικόνα 93 Αξιολόγηση απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep



Εικόνα 94 Αξιολόγηση απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep με εξομάλυνση

Όσον αφορά την εκπαίδευση, ο PPO είναι ο καλύτερος αλγόριθμος λόγω του γρήγορου χρόνου εκπαίδευσης ανά βήμα χρόνου και της συνολικής αποδοτικότητάς του. Είναι απλός στην υλοποίηση, απαιτεί λιγότερη υπολογιστική ισχύ και επιτυγχάνει σταθερά υψηλές και σταθερές ανταμοιβές, καθιστώντας τον την πιο αξιόπιστη επιλογή για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Το SAC είναι ο δεύτερος καλύτερος αλγόριθμος, με τον ταχύτερο χρόνο σύγκλισης και τον λιγότερο αριθμό βημάτων που απαιτούνται για τη σύγκλιση. Ωστόσο, είναι πιο υπολογιστικά απαιτητικό και πιο περίπλοκο στην υλοποίηση. Από την άλλη πλευρά, το DDPG είναι ο χειρότερος αλγόριθμος για αυτό το σενάριο χρήσης. Υποφέρει από ανεπαρκή εξερεύνηση, οδηγώντας σε κακά αποτελέσματα και υψηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις, καθιστώντας το ακατάλληλο για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων και πρόβλημα φθοράς. Συνολικά, συγκρίνοντας κάθε αλγόριθμο σε όλα τα διαφορετικά περιβάλλοντα, είναι σαφές ότι ο αλγόριθμος SAC αποδίδει καλύτερα στο Μη Διορθωτικό Περιβάλλον, ενώ ο PPO υπερσχύει στο Διορθωτικό Περιβάλλον. Όσον αφορά την καθυστέρηση, το περιβάλλον "με καθυστέρηση" επιτυγχάνει καλά αποτελέσματα πιο γρήγορα κατά την εκπαίδευση. Ωστόσο, στη φάση των δοκιμών, η απόδοση του περιβάλλοντος "με καθυστέρηση" συνήθως ξεπερνιέται από το περιβάλλον "χωρίς καθυστέρηση", το οποίο επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα αλλά χρειάζεται περισσότερο χρόνο εκπαίδευσης.

2.12 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικού ελέγχου

2.12.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η ανάπτυξη της εν λόγω λύσης επιμερίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια:

1. Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης με δεδομένα από το πεδίο:
Σε αυτό το στάδιο, αξιοποιήθηκαν τεχνολογίες μηχανικής μάθησης με στόχο την επεξεργασία

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

δεδομένων πεδίου για την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων ικανών να αποτυπώνουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά του υπό μελέτη συστήματος.

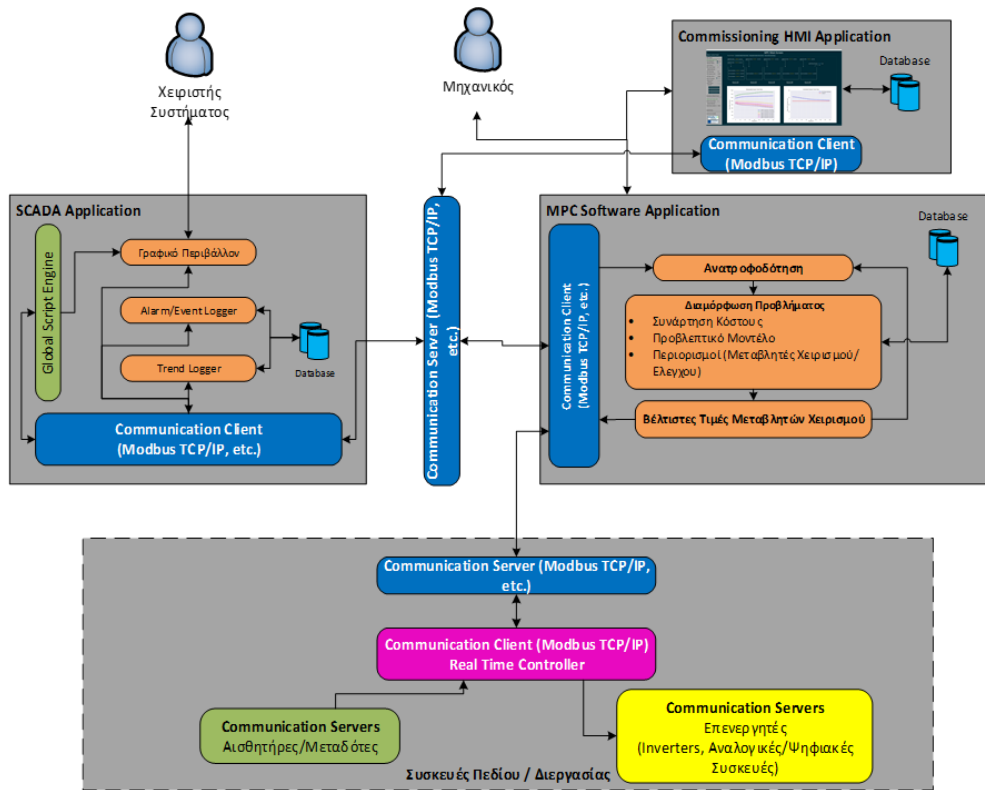
2. Ενσωμάτωση μη γραμμικών μοντέλων στον αλγόριθμο MPC: Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου βασίζεται στην τεχνολογία προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control, MPC) όπου ο ελεγκτής αξιοποιεί ένα εσωτερικό μοντέλο για την πρόβλεψη της δυναμικής του συστήματος σε έναν κυλιόμενο χρονικό ορίζοντα. Στο πλαίσιο αυτού του σταδίου, αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας για την λειτουργία του συστήματος ώστε να υποστηρίζει την ενσωμάτωση μη γραμμικών προβλεπτικών μοντέλων αλλά και να μπορεί να χειρίζεται σύνθετους περιορισμούς τόσο στις εισόδους όσο και στις εξόδους του συστήματος.
3. Διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων: Στην προτεινόμενη λύση έχει γίνει η θεώρηση ότι η διασύνδεση του συστήματος ελέγχου με τις διατάξεις του πεδίου περνάει μέσα από δίαυλο επικοινωνίας που βασίζεται στο βιομηχανικό πρωτόκολλο επικοινωνίας MODBUS TCP/IP. Υπό αυτή την έννοια η οντότητα «Πεδίο» από τη σκοπιά του ελεγκτή είναι ένας Modbus server, στον οποίο ο ελεγκτής έχει δικαιώματα εγγραφής και ανάγνωσης. Παρόμοιος δίαυλος επικοινωνίας θα χρησιμοποιείται και για τη διασύνδεση του ελεγκτή τόσο με την εφαρμογή εποπτικού ελέγχου HMI όσο και με το κεντρικό σύστημα ελέγχου μίας εγκατάστασης (SCADA application).
4. Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος για τον τελικό χρήστη: Για την αλληλεπίδραση του χρήστη τόσο με τον ελεγκτή όσο και με τη διεργασία αναπτύσσεται εφαρμογή εποπτικού ελέγχου HMI. Η αλληλεπίδραση αυτή γίνεται μέσω εικονικών κομβίων (virtual push-buttons) αλλά και πεδίων εισαγωγής/ανάγνωσης τιμών (Input/output fields). Επίσης, ο χρήστης της εφαρμογής HMI θα έχει τη δυνατότητα να προσπελαύνει τη βάση δεδομένων που θα συντηρείται από το HMI, προκειμένου να παρακολουθεί ιστορικά δεδομένα της υπό έλεγχο διεργασίας. Η οπτικοποίηση των ιστορικών δεδομένων θα δίνεται τόσο υπό τη μορφή πίνακα όσο και σε διαγραμματική μορφή. Και στις δύο περιπτώσεις ο χρήστης θα έχει τη δυνατότητα της εξαγωγής των δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία. Εκτός της ιστορικής βάσης δεδομένων, ακόμη μία στατική βάση δεδομένων θα συντηρείται από την εφαρμογή HMI, αυτή των βασικών παραμέτρων του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αυτές οι παράμετροι (ορίζοντες ελέγχου και πρόβλεψης, άνω και κάτω όρια των μεταβλητών χειρισμού και ελέγχου, κλπ.) θα μπορούν να αλλάζουν από το χρήστη της εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο.

2.12.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η πλατφόρμα απαρτίζεται από επιμέρους συστήματα τα οποία αλληλοεπιδρούν και συνεργάζονται με στόχο την ανάλυση και προώθηση της πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο. Η γενική αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 95 όπου εντοπίζουμε τα επιμέρους υποσυστήματα:

- Εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή MPC
- Δικτυακός εξυπηρετητής για την επικοινωνία με την εφαρμογή εποπτικού ελέγχου HMI και την εφαρμογή κεντρικού εποπτικού ελέγχου (SCADA). Όλες οι εφαρμογές εποπτικού ελέγχου θα επικοινωνούν αποκλειστικά με την εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή (MPC software application).
- Δικτυακός εξυπηρετητής για την επικοινωνία με τις συσκευές πεδίου (αισθητήρες/μεταδότες και επενεργητές). Προς χάριν απλούστευσης έχει θεωρηθεί ένα σημείο επικοινωνίας με μία συσκευή που συγκεντρώνει όλες τις διατάξεις πεδίου.
- Εφαρμογή εποπτικού ελέγχου (Commissioning HMI)
- Εφαρμογή κεντρικού εποπτικού ελέγχου (SCADA)

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 95 Αρχιτεκτονική του συστήματος

2.12.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.12.3.1 Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου

Στα πλαίσια της διαμόρφωσης του σχήματος ελέγχου, η συγκεκριμένη λύση προτείνει ως προβλεπτικά μοντέλα για τον ρυθμιστή MPC τα νευρωνικά δίκτυα ακτινικής βάσης (Radial Basis Function Networks, RBF) με γκαουσιανές (Gaussian) συναρτήσεις ενεργοποίησης. Τα δίκτυα RBF, χάρη στη δομική τους απλότητα, την υπολογιστική αποδοτικότητα και την ικανότητά τους να προσεγγίζουν πολύπλοκες μη γραμμικές συναρτήσεις, αποτελούν ισχυρό εργαλείο σε εφαρμογές όπως παλινδρόμηση, ταξινόμηση, πρόβλεψη χρονοσειρών και γενικότερη αναπαράσταση συναρτησιακών σχέσεων. Αυτή η δυνατότητα τους να συλλαμβάνουν μη γραμμικές εξαρτήσεις τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για χρήση σε δυναμικά συστήματα με υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας.

Για την εκπαίδευση των RBF απαιτείται η συλλογή κατάλληλων δεδομένων είτε από τη φυσική διεργασία είτε από κάποιο εικονικό περιβάλλον προσομοίωσης. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η διεργασία προς εξέταση αφορά εικονικό σύστημα παραγωγής νανοσωματιδίων αργύρου (Ag) σε περιβάλλον MATLAB, για το οποίο έχει αναπτυχθεί λεπτομερές δυναμικό μοντέλο διαφορικών εξισώσεων. 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 αναγωγικών μέσων, 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. Από το εικονικό περιβάλλον συλλέχθηκαν δεδομένα βηματικών επιβολών και το 60% αυτών χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των δικτύων RBF ενώ το υπόλοιπο 40% επιμερίστηκε στα σύνολα επικύρωσης κι ελέγχου.

2.12.3.2 Ενσωμάτωση μη γραμμικών μοντέλων στον αλγόριθμο MPC

Η αρχιτεκτονική του προβλεπτικού ελέγχου (MPC) βασίζεται στην ύπαρξη ενός αξιόπιστου μοντέλου που είναι σε θέση να κάνει προβλέψεις για τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος, αξιοποιώντας γνώση από το παρελθόν (όπως προηγούμενες τιμές εισόδων και εξόδων). Ο MPC χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες και την προγνωστική του ικανότητα για να υπολογίσει μια βέλτιστη ακολουθία ενεργειών πάνω σε δυο χρονικούς άξονες – τον οριζόντια πρόβλεψη και τον οριζόντια ρύθμιση – λαμβάνοντας πάντα υπόψη τους περιορισμούς και τους στόχους του προβλήματος ελέγχου. Από την βέλτιστη αλληλουχία κινήσεων εφαρμόζεται μόνο η πρώτη ρυθμιστική ενέργεια και η διαδικασία επαναλαμβάνεται δυναμικά σε κάθε χρονική στιγμή με ανανέωση της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος. Στα πλαίσια της εν λόγω λύσης, ο MPC που αναπτύσσεται χρησιμοποιεί ως εσωτερικό προβλεπτικό μοντέλο ένα νευρωνικό δίκτυο RBF που προήλθε από τη διαδικασία εκπαίδευσης που αναλύθηκε παραπάνω.

Αρχικά, η ανάπτυξη του αλγορίθμου του ρυθμιστή πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB, καθώς υπήρχε ήδη διαθέσιμο το μοντέλο της εικονικής διεργασίας (plant) για τις πρώτες δοκιμές. Η ενσωμάτωση του RBF επιτεύχθηκε με την βοήθεια του ανοικτού υπολογιστικού εργαλείου CasADi που χρησιμοποιείται εκτενώς στον προγραμματισμό μη γραμμικών προβλημάτων. Ο συμβολικός «σκελετός» που διαθέτει το CasADi επιτρέπει στο χρήστη να διαμορφώσει με συμβολικές μεταβλητές το πρόβλημα βελτιστοποίησης, ενσωματώνοντας το προβλεπτικό μοντέλο, την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς του συστήματος. Έτσι, γίνεται εφικτή η διάκριση ανάμεσα στο στάδιο αρχικοποίησης όπου καθορίζεται σαφώς το πρόβλημα και στα βήματα επίλυσης όπου αναζητείται η λύση του προβλήματος, χωρίς να ανακατασκευάζεται η δομή του προβλήματος κάθε χρονική στιγμή. Για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων επιλέχθηκε ο αλγόριθμος επίλυσης IPOPT με ελεύθερη πρόσβαση εντός του CasADi. Μετά την επιτυχή υλοποίηση και αξιολόγηση της μεθόδου, ο κώδικας μεταφέρθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python, η οποία αποτελεί ανοικτό λογισμικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεύθερα σε ευρύ φάσμα εφαρμογών.

2.12.3.3 Διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων:

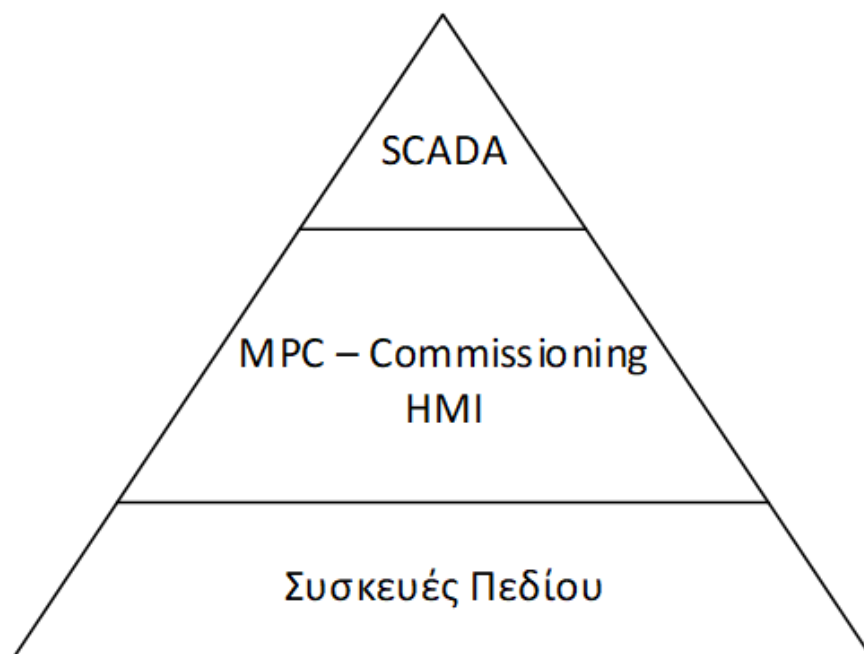
Για την εξασφάλιση διαρκούς και απρόσκοπτης επικοινωνίας του προβλεπτικού ελεγκτή με τις συσκευές πεδίου (αισθητήρες/μεταδότες, τελικοί επενεργητές και προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές PLC), αναπτύχθηκε εφαρμογή η οποία βρίσκεται ενδιάμεσα από τα επιμέρους υποσυστήματα και εξυπηρετεί τα πιο ευρέως διαδεδομένα βιομηχανικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως Modbus TCP/IP, OPC UA και MQTT. Υπάρχει όμως η δυνατότητα, αναλόγως της περίπτωσης, να προστεθούν και άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως BacNet, Profinet, Ethernet IP, HTTP, κ.α. Όλα τα υποσυστήματα έχουν δυνατότητες εγγραφής και ανάγνωσης επάνω στον δικτυακό εξυπηρετητή κι έτσι μπορούν να ανταλλάσσουν τις απαραίτητες πληροφορίες μεταξύ τους. Στη βασική του δομή το σύστημα εξυπηρετεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας ModBus TCP/IP το οποίο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο στο χώρο της βιομηχανίας και του αυτοματισμού.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

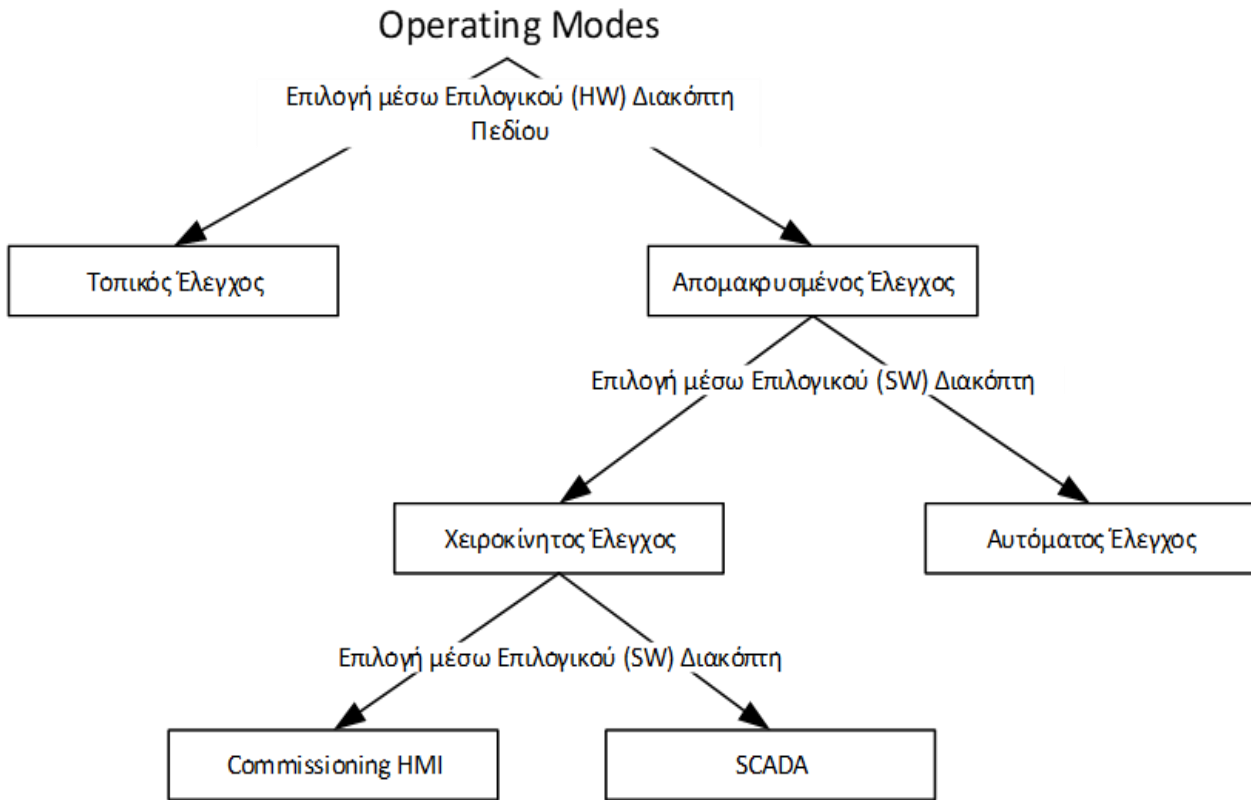
Η ύπαρξη του δεύτερου δικτυακού εξυπηρετητή, ο οποίος παρέχεται μαζί με την εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή, προσφέρει τη δυνατότητα της ένταξης του προσφερόμενου συστήματος ελέγχου στο κεντρικό σύστημα εποπτικού ελέγχου μίας εγκατάστασης, όπως επίσης εξυπηρετεί και την επικοινωνία με την εφαρμογή HMI. Ο ίδιος ο ελεγκτής έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να είναι ένας Modbus Client του συνολικού κεντρικού συστήματος αυτοματισμού μιας εγκατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο επικοινωνεί απευθείας με τις υπό έλεγχο διατάξεις καθώς αποτελεί Modbus Client του Modbus Server του μοντέλου προσομοίωσης. Παράλληλα ο ελεγκτής αποτελεί και client του δικτυακού εξυπηρετητή, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η συνδεσιμότητά του είτε με το commissioning HMI είτε με άλλα εποπτικά συστήματα. Προκειμένου να είναι σαφής η διασύνδεση αυτή, προσφέρεται αναλυτική λίστα ανταλλαγής μεταβλητών (Modbus List) έτσι ώστε τα εξωτερικά συστήματα να γνωρίζουν τους «κανόνες» επικοινωνίας (IP διευθύνσεις, διευθύνσεις registers, κλπ.). Όλη η λογική του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου βρίσκεται μέσα στην εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή, υπό την έννοια ότι σε κανένα εποπτικό σύστημα δεν βρίσκονται κομμάτια αυτής. Οι εφαρμογές εποπτικού ελέγχου δίνονται για οπτικοποίηση της διεργασίας και αλληλεπίδραση με τον ίδιο τον ελεγκτή και μόνο.

Κατά τη σχεδίαση του ελεγκτή έχει ληφθεί υπόψη η ιεραρχία που διακρίνεται στην Εικόνα 96. Σύμφωνα με αυτήν, στην βάση της πυραμίδας συναντάμε τις συσκευές πεδίου. Οι επιλογικοί διακόπτες που θα βρίσκονται είτε επάνω στις συσκευές πεδίου τις ίδιες, είτε σε ερμάρια που θα περιέχουν τα κυκλώματα και τις διατάξεις ελέγχου αυτών, έχουν την απόλυτη προτεραιότητα. Στο αμέσως πιο πάνω επίπεδο συναντάμε την εφαρμογή

του Commissioning HMI. Ως αναπόσπαστο κομμάτι της πλατφόρμας θεωρούμε ότι έχει προτεραιότητα έναντι οποιουδήποτε άλλο εποπτικού συστήματος. Τέλος, στο ανώτερο τμήμα της πυραμίδας της ιεραρχίας συναντάμε το κεντρικό εποπτικό σύστημα SCADA. Με βάση την ιεραρχία (Εικόνα 96) έχουν προγραμματιστεί τα ακόλουθα Mode λειτουργίας μέσα στην εφαρμογή εποπτικού ελέγχου (Εικόνα 97).



Εικόνα 96 Ιεραρχία ελέγχου



Εικόνα 97 Καταστάσεις λειτουργίας στην εφαρμογή εποπτικού ελέγχου.

Όλες οι εντολές για αλλαγή κατάστασης λειτουργίας έχουν υλοποιηθεί μέσω «Αιτημάτων» (Requests). Έτσι, η εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή αποτιμά κάθε χρονική στιγμή όλες τις «Αιτήσεις», και αναλόγως από που προέρχονται τις εκτελεί ή όχι, και κατόπιν «Μηδενίζει» όλα τα «Αιτήματα».

Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα αλλάζει Mode λειτουργίας μόνο όταν αναγνωρίζει αλλαγή στην τιμή μίας μεταβλητής. Ο προβλεπτικός ελεγκτής συντηρεί ξεχωριστές μεταβλητές για τις εντολές (setpoints προς επενεργητές) που προέρχονται από τα εποπτικά συστήματα (Commissioning HMI & SCADA) αλλά και τις βέλτιστες τιμές από το πρόγραμμα της βελτιστοποίησης, και αναλόγως του Mode λειτουργίας αποστέλλει τις κατάλληλες εντολές (effective setpoints) προς τις διατάξεις πεδίου (επενεργητές). Τέλος, σε κάθε κύκλο λειτουργίας αντιγράφει τα effective setpoints σε όλες τις μεταβλητές έτσι ώστε αυτές να είναι πάντα ενημερωμένες (Bumpless Transfer).

3. Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος για τον τελικό χρήστη:

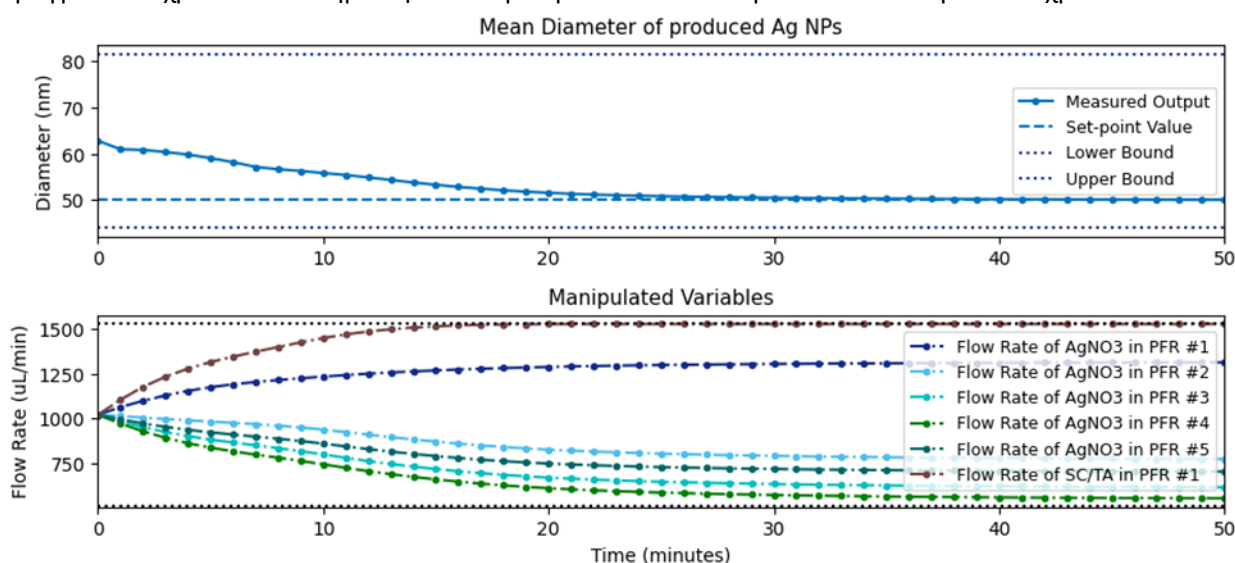
Για να έχει τη δυνατότητα ο χρήστης να αλληλεπιδρά τόσο με τον ελεγκτή όσο και με τη διεργασία αναπτύχθηκε γραφικό περιβάλλον διεπαφής (Graphical User Interface, GUI). Στα πλαίσια της λύσης θα αναπτυχθούν δύο πλατφόρμες διεπαφής: α) η εφαρμογή εποπτικού ελέγχου (Commissioning HMI) και β) η εφαρμογή κεντρικού εποπτικού ελέγχου μέσω SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) το οποίο αποτελεί βασικό εργαλείο εποπτείας, ελέγχου και συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για βιομηχανικές διεργασίες και συστήματα αυτοματισμού. Η σχεδίαση του προβλεπτικού ελεγκτή έχει γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να παρέχονται ακριβώς οι ίδιες δυνατότητες και στις δύο εφαρμογές εποπτικού ελέγχου.

Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής αναπτύχθηκε έτσι ώστε να υποστηρίζει οπτικοποίηση της διεργασίας (Process Image), επικοινωνία με τον ελεγκτή κι έλεγχο των μεμονωμένων διατάξεων πεδίου, καταγραφή κι εξαγωγή ιστορικών δεδομένων της διεργασίας (historical data) και παρακολούθηση των μεταβλητών του συστήματος (Trends) μέσα από δυναμικά διαγράμματα. Στο Control Panel του HMI υπάρχει διακόπτης επιλογής που επιτρέπει στον χρήστη να δώσει τον έλεγχο της διεργασίας στο SCADA.

2.12.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή τύπου MPC στο σύστημα παραγωγής νανοσωματιδίων, το οποίο αναλύθηκε εκτενώς σε προηγούμενη ενότητα. Στόχος της ρύθμισης είναι η μέση διάμετρος των παραγόμενων νανοσωματιδίων να ακολουθεί τις επιθυμητές τιμές-στόχους, διατηρώντας παράλληλα ομαλή διαχείριση των ροών τροφοδοσίας που λειτουργούν ως μεταβλητές χειρισμού, και τηρώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς λειτουργίας του συστήματος όπως αυτοί καθορίζονται από τον χρήστη.

Στην Εικόνα 98 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σενάριο προσομοίωσης, στο οποίο επιδιώκεται η μετάβαση του συστήματος από μια αρχική κατάσταση σε μια νέα, με στόχο μέση διάμετρο 50 nm. Η απόκριση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής στο άνω γράφημα καταδεικνύει ότι ο ελεγκτής MPC κατευθύνει επιτυχώς το σύστημα προς την επιθυμητή κατάσταση, τηρώντας ταυτόχρονα τους λειτουργικούς περιορισμούς, οι οποίοι επισημαίνονται με διακεκομμένες γραμμές και στα δύο γραφήματα. Η συγκεκριμένη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Google Colab. Για την αρχική διαμόρφωση του προβλήματος απαιτήθηκαν περίπου 30 δευτερόλεπτα, ενώ η επίλυση σε χρονικό ορίζοντα 50 λεπτών πραγματικού χρόνου ολοκληρώθηκε σε λιγότερο από 50 δευτερόλεπτα υπολογιστικού χρόνου.



Εικόνα 98 Συμπεριφορά σχεδιασμένου ρυθμιστή MPC σε γλώσσα Python-CasADi σε περίπτωση όπου η επιθυμητή τιμή στόχος για τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή είναι ίση με 50 nm

Για τους σκοπούς της εργαστηριακής δοκιμής, το μοντέλο προσομοίωσης έχει προγραμματιστεί να εκτελείται σε διακριτά βήματα, σε ένα σχήμα της μορφής διαγράμματος καταστάσεων. Προκειμένου να προσομοιώσουμε ρεαλιστικές συνθήκες, έχουμε προγραμματίσει και δεύτερο δικτυακό εξυπηρετητή (Modbus Server) ο οποίος εγκαθίσταται στον υπολογιστή που φιλοξενεί το μοντέλο της προσομοίωσης. Το μοντέλο προσομοίωσης με αυτόν τρόπο είναι εντελώς ανεξάρτητο από το υπόλοιπο σύστημα της προσομοίωσης, όπως ακριβώς θα συνέβαινε και σε μία πραγματική εγκατάσταση. Το μοντέλο μπορεί να τρέχει ελεύθερα, και να στέλνει στον Modbus Server την παρούσα κατάσταση και να διαβάζει από αυτόν τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών χειρισμού που προκύπτουν από τον προβλεπτικό ελεγκτή.

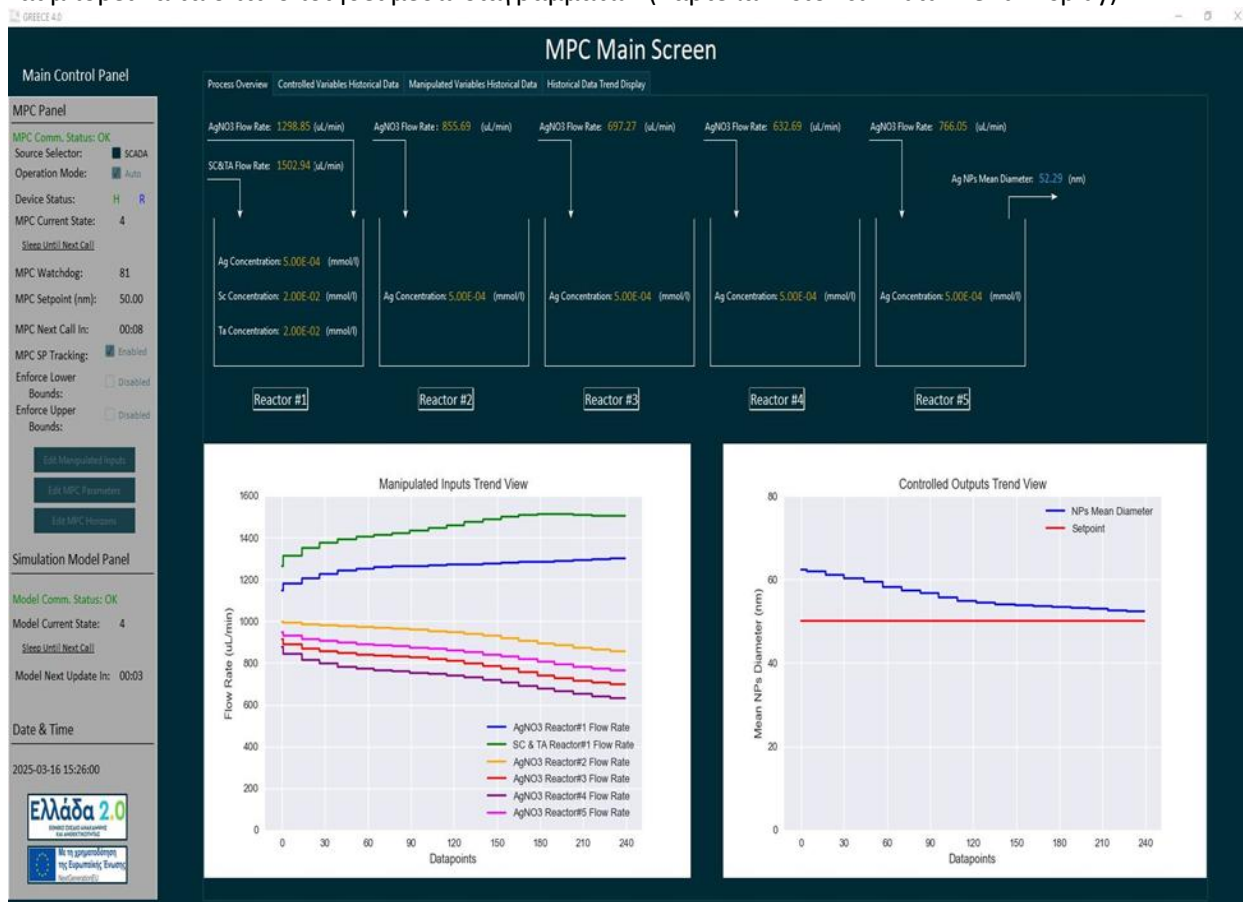
Κάθε χρονική στιγμή το μοντέλο προσομοίωσης εξετάζει τις τιμές των μεταβλητών χειρισμού που προέρχονται από τον προβλεπτικό ελεγκτή, επιλύει το μοντέλο προσομοίωσης και γράφει στον Modbus Server τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου. Σε περίπτωση που διαπιστωθεί απώλεια επικοινωνίας είτε με τον Modbus Server ή με τον προβλεπτικό ελεγκτή, συνεχίζει να επιλύει το μοντέλο της προσομοίωσης με τις τελευταίες τιμές μεταβλητών χειρισμού που είχε πριν την απώλεια της επικοινωνίας.

Σε έναν άλλον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος θα πρέπει να βρίσκεται στο ίδιο τοπικό δίκτυο (φυσική παρουσία) αλλά και στο ίδιο υπό-δίκτυο (σε επίπεδο IP διεύθυνσης), εκτελείται ο αλγόριθμος ελέγχου. Ο ελεγκτής αποτελεί έναν Modbus Client του συνολικού συστήματος. Και αυτός με τη σειρά του έχει προγραμματιστεί να εκτελείται σε ένα σχήμα διαγράμματος καταστάσεων. Σε αντίθεση ωστόσο με το

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής μοντέλο προσομοίωσης, η εκτέλεση του MPC είναι άμεσα συνυφασμένη με την εκτέλεση του μοντέλου προσομοίωσης, υπό την έννοια ότι απώλεια επικοινωνίας με την υπό έλεγχο διεργασία σηματοδοτεί και την παύση του ίδιου του ελεγκτή, καθώς από τη στιγμή που δεν υπάρχει επικοινωνία με τις διατάξεις πεδίου στο σύνολό τους ο ελεγκτής μεταβαίνει σε μία κατάσταση αναμονής της επανόδου της σύνδεσης με το πεδίο. Μόλις αυτή αποκατασταθεί ενημερώνεται εκ νέου από τον Modbus server για την παρούσα κατάσταση της διεργασίας και ξεκινάει να επανεκτελείται.

Στην Εικόνα 99 παρουσιάζεται η κεντρική οθόνη της εφαρμογής εποπτικού ελέγχου HMI. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η εφαρμογή παρουσιάζει ένα βασικό σχεδιάγραμμα της διεργασίας (Process Image) στο οποίο επισημαίνονται οι βασικές μεταβλητές που επενεργούν πάνω στο σύστημα (μεταβλητές εκ χειρισμού, ρυθμιζόμενες μεταβλητές, διαταραχές). Κάτω από το Process Image δίνονται διαγράμματα για την παρακολούθηση των μεταβλητών εκ χειρισμού και των ρυθμιζόμενων μεταβλητών σε πραγματικό χρόνο.

Στο αριστερό τμήμα της οθόνης υπάρχει ένα σταθερό πεδίο (γκρι πλαίσιο), το οποίο φαίνεται πάντα. Από αυτό το πλαίσιο ο χρήστης της εφαρμογής είναι σε θέση να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την κατάσταση λειτουργίας τόσο του προβλεπτικού ελεγκτή αλλά και της διεργασίας. Επίσης, με εικονικά κομβία και πεδία εισαγωγής/ανάγνωσης τιμών παρέχεται η δυνατότητα για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το περιβάλλον της διεργασίας και τον ελεγκτή. Οι επιλογικοί διακόπτες μπορούν να μεταφέρουν τα προνόμια ελέγχου από το HMI στο SCADA και να αλλάξουν το καθεστώς λειτουργίας από αυτόματο σε χειροκίνητο έλεγχο. Τα πεδία ανάγνωσης επιτρέπουν συστηματική παρακολούθηση της τρέχουσας κατάστασης του προβλεπτικού ελεγκτή και των συσκευών πεδίων ενώ τα εικονικά κομβία δίνουν στον χρήστη τη δυνατότητα να επέμβει στις παραμέτρους του ελεγκτή και να ενεργοποιήσει (ή να απενεργοποιήσει) τα όρια λειτουργίας των μεταβλητών του συστήματος. Τέλος, μέσω πλοήγησης στις καρτέλες της κεντρική οθόνης, ο χρήστης έχει πρόσβαση στα ιστορικά δεδομένα που καταγράφονται στη βάση δεδομένων (καρτέλες Controlled Variables Historical Data & Manipulated Variables Historical Data) και μπορεί να τα οπτικοποιήσει μέσω διαγραμμάτων (Καρτέλα Historical Data Trend Display).



Εικόνα 99 Κεντρική οθόνη εφαρμογής εποπτικού ελέγχου HMI

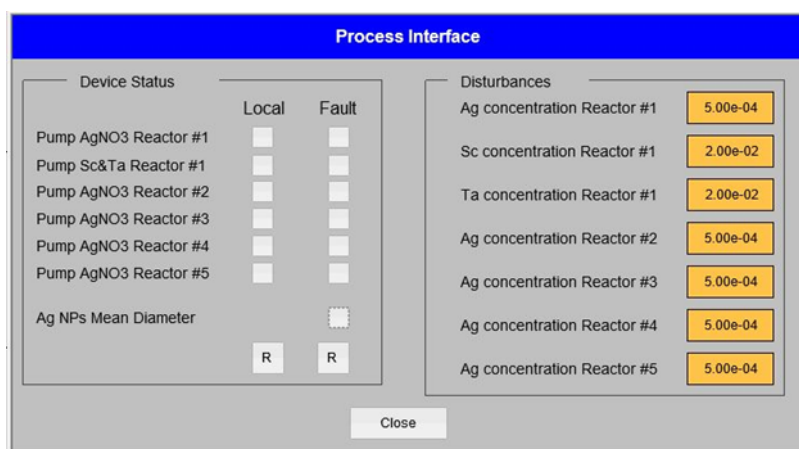
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Τέλος, τα ιστορικά δεδομένα που έχουν επιλεγεί για οπτικοποίηση υπό τη μορφή διαγράμματος δύνανται να εξαχθούν υπό τη μορφή αρχείων τύπου excel και csv για περαιτέρω επεξεργασία, και pdf υπό τη μορφή αναφοράς (report).

Στην Εικόνα 100 παρουσιάζεται η κεντρική οθόνη της εφαρμογής SCADA που αναπτύχθηκε με το λογισμικό SIEMENS WinCC V7.5 SP2. Η εφαρμογή SCADA προσφέρει τις ίδιες λειτουργίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω με μοναδική εξαίρεση πως ο επιλογικός διακόπτης “Source Selector” που μεταφέρει τα προνόμια ελέγχου από τη μια εφαρμογή στην άλλη βρίσκεται αποκλειστικά στο Commissioning HMI. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 101, μέσω του γραφικού περιβάλλοντος ο χρήστης μπορεί να προσομοιώσει την παρουσίαση σφαλμάτων στις διατάξεις πεδίου. Επίσης, μπορεί να επέμβει στην τρέχουσα κατάσταση των διαταραχών του συστήματος μέσα από ειδικά πεδία εισαγωγής τιμών, προκειμένου να αναπαραστήσει ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος και να εξοικειωθεί με τη συμπεριφορά του προβλεπτικού ελεγκτή σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 100 Κεντρική οθόνη εφαρμογής εποπτικού ελέγχου SCADA



Εικόνα 101 Γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τη διεργασία για την εισαγωγή σφαλμάτων και την τροποποίηση στις τιμές των διαταραχών

2.13 Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής

Η παρούσα λύση έχει διττή στόχευση. Πρώτον, να αναπτύξει μια 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, οι οποίες είναι σε θέση να υποστηρίξουν μια σειρά από αποφάσεις και ταυτόχρονα να μειώσουν τον χρόνο απόκρισης της συντήρησης σε βλάβες με τη χρήση αυτοματοποιημένων push ειδοποιήσεων σε υπολογιστές και κινητές συσκευές. Δεύτερον, να αναπτύξει το ψηφιακό δίδυμο συγκεκριμένης αποθηκευτικής διάταξης και σε συνδυασμό με τη χρήση της πλατφόρμας νέφους να υποστηρίξει διοικητικές αποφάσεις που σχετίζονται με τον εξοπλισμό διακίνησης της διάταξης και το ανθρώπινο δυναμικό που την υποστηρίζει. Ο απώτερος στόχος της προτεινόμενης λύσης είναι να αποτελέσει μια προσιτή και σχετικά εύκολα παραμετροποιήσιμη και υιοθέτιση επιλογή για την υποστήριξη του ψηφιακού μετασχηματισμού των ελληνικών ΜΜΕ τα επόμενα χρόνια.

2.13.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η λύση δομείται σε τρία κύρια στάδια υλοποίησης, τα ακόλουθα:

Στάδιο 1: Ανάπτυξη Ψηφιακού Διδύμου Αποθηκευτικής Διάταξης:

- Ανάπτυξη και επαλήθευση του ψηφιακού μοντέλου της αποθήκης: Η εργασία αυτή περιλαμβάνει την καταγραφή και αποτύπωση της αποθηκευτικής διάταξης, τη μοντελοποίηση της με εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης, καθώς και την επαλήθευση της πιστότητας του μοντέλου.
- Σύνδεση φυσικού συστήματος και ψηφιακού μοντέλου προσομοίωσης (διδύμου): Περιλαμβάνει την ανάπτυξη των απαραίτητων διασυνδέσεων για τη δημιουργία του ψηφιακού διδύμου της αποθηκευτικής διάταξης με το μοντέλο προσομοίωσης.
- Παραμετροποίηση του ψηφιακού διδύμου: Περιλαμβάνει την προσαρμογή του ψηφιακού διδύμου στις ανάγκες των τελικών χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες του φυσικού συστήματος.
- Εργαστηριακές δοκιμές λειτουργίας: Περιλαμβάνει τις δοκιμές σε εργαστηριακό περιβάλλον για την αξιολόγηση της απόδοσης και της ορθής λειτουργίας του ψηφιακού διδύμου, που θα περιγραφούν στο Παραδοτέο Π3.1.

Στάδιο 2: Ανάπτυξη Διαδικτυακής Πλατφόρμας Ανάλυσης και Οπτικοποίησης δεδομένων

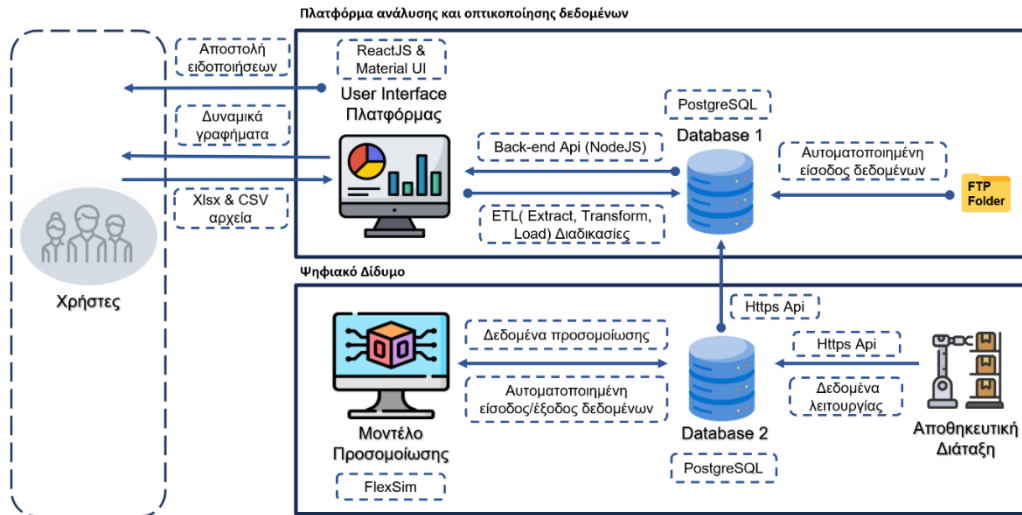
- Ανάπτυξη της υποδομής νέφους για τη φιλοξενία της πλατφόρμας: Περιλαμβάνει τη δημιουργία της απαραίτητης υποδομής νέφους, τον μηχανισμό εισαγωγής δεδομένων, καθώς και την εκπόνηση των προδιαγραφών των δυναμικών διαγραμμάτων που θα συμμετέχουν στα dashboards της πλατφόρμας (σε φύλλα εργασίας).
- Δημιουργία διασυνδέσεων για αυτοματοποιημένη είσοδο δεδομένων: Περιλαμβάνει την ανάπτυξη των διασυνδέσεων που επιτρέπουν την αυτόματη ροή δεδομένων από το αποθηκευτικό σύστημα (αυτοματισμός & πληροφοριακό σύστημα) προς την πλατφόρμα.
- Ανάπτυξη των Dashboards: Περιλαμβάνει τη δημιουργία των δυναμικών διαγραμμάτων (Dashboard) στην πλατφόρμα, για την ανάλυση και οπτικοποίηση των δεδομένων, προσφέροντας βελτιωμένη διαχείριση και εποπτεία των λειτουργιών.
- Ανάπτυξη μηχανισμού αποστολής ειδοποιήσεων: Περιλαμβάνει την ανάπτυξη μηχανισμού ειδοποιήσεων που ενημερώνει τους υπεύθυνους για σφάλματα ή αποκλίσεις στη λειτουργία του αυτοματισμού, παρέχοντας οδηγίες επίλυσης.

Στάδιο 3: Σύνδεση Ψηφιακού Διδύμου με την Πλατφόρμα:

- Τελική μορφοποίηση της πλατφόρμας και ενσωμάτωση του ψηφιακού διδύμου: Περιλαμβάνει την πλήρη διαμόρφωση της πλατφόρμας, η οποία ενσωματώνει δεδομένα από το ψηφιακό δίδυμο, διασφαλίζοντας την ολοκληρωμένη παρακολούθηση και διαχείριση της λειτουργίας του συστήματος.
- Έλεγχος λειτουργίας και βελτιώσεις: Περιλαμβάνει τους τελικούς ελέγχους της λύσης, με στόχο τον εντοπισμό βελτιώσεων και τη διασφάλιση της ομαλής και αποδοτικής λειτουργίας της.

2.13.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της λύσης στηρίζεται σε έναν διακριτό και ευέλικτο σχεδιασμό, ο οποίος επιτρέπει τη διασύνδεση μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 102, η αρχιτεκτονική δομή περιλαμβάνει τρία κύρια υποσυστήματα: (α) το ψηφιακό δίδυμο της αποθηκευτικής διάταξης, (β) την πλατφόρμα νέφους για ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων και (γ) τους τελικούς χρήστες, οι οποίοι αλληλεπιδρούν με το σύστημα μέσω διεπαφής χρήστη της πλατφόρμας και των μηχανισμών ειδοποίησης. Η ανάπτυξη και η λειτουργία των παραπάνω υποσυστημάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.



Εικόνα 102 Αρχιτεκτονική Τελικής Έκδοσης της Λύσης

2.13.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Το Ψηφιακό Δίδυμο περιλαμβάνει ένα μοντέλο προσομοίωσης, μία βάση δεδομένων PostgreSQL και ένα σύνολο διασυνδέσεων που διασφαλίζουν την αυτοματοποιημένη ροή δεδομένων μεταξύ του WMS, του μοντέλου προσομοίωσης και της Πλατφόρμας. Το μοντέλο προσομοίωσης υλοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού FlexSim, το οποίο είναι εξειδικευμένο για την προσομοίωση διακριτών γεγονότων και επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση των ροών υλικών και των διαδικασιών λειτουργίας της αποθήκης. Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε σε μια εκτενή μελέτη της υφιστάμενης εγκατάστασης, συμπεριλαμβάνοντας εγχειρίδια διαδικασιών, δεδομένα από τις καθημερινές λειτουργίες, καθώς και τα αρχιτεκτονικά σχέδια CAD της αποθήκης. Αφού υλοποιήθηκε, το μοντέλο υποβλήθηκε σε διαδικασία επαλήθευσης, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης ανταποκρίνονται με ακρίβεια στις πραγματικές συνθήκες της αποθήκης. Το μοντέλο της προσομοίωσης ελέγχεται εξωτερικά μέσω Python script, αξιοποιώντας το module *FlexSimPy*, το οποίο επιτρέπει την παραμετροποίηση του μοντέλου, την εκκίνηση της προσομοίωσης και την αυτόματη συλλογή των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μεταφέρονται μέσω ενός REST API στη πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων, η οποία παρέχει δυναμικές απεικονίσεις και αναλύσεις βασισμένες στα δεδομένα του Ψηφιακού Διδύμου. Με αυτόν τον τρόπο, η λειτουργία του μοντέλου καθίσταται πλήρως αυτοματοποιημένη, χωρίς την ανάγκη αλληλεπίδρασης του χρήστη με το γραφικό περιβάλλον του FlexSim. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μεταφέρονται μέσω ενός REST API στη πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων, η οποία παρέχει δυναμικές απεικονίσεις και αναλύσεις βασισμένες στα δεδομένα του Ψηφιακού Διδύμου. Επιπλέον, αναπτύχθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον ένας μηχανισμός διασύνδεσης με πραγματικά δεδομένα από το WMS της αποθήκης, βασισμένος σε HTTP POST αιτήματα. Μέσω του REST API, η βάση δεδομένων του Ψηφιακού Διδύμου ενημερώνεται αυτόματα με λειτουργικά δεδομένα όπως το πλήθος εισερχόμενων/εξερχόμενων παλετών.

Η πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων, η οποία αναπτύχθηκε με ReactJS και Material UI, προσφέρει ένα φιλικό και προσαρμόσιμο περιβάλλον χρήστη. Η πλατφόρμα υποστηρίζει την εισαγωγή

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

δεδομένων από αρχεία XLSX και CSV μέσω του πρωτοκόλλου HTTP, επιτρέποντας στους χρήστες να φορτώνουν δεδομένα εύκολα και γρήγορα. Επίσης, η πλατφόρμα διαθέτει δυνατότητα αυτόματης εισαγωγής δεδομένων μέσω προκαθορισμένου FTP φακέλου, ενώ μπορεί να λαμβάνει και δεδομένα απευθείας από το Ψηφιακό Δίδυμο, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Τα δεδομένα που εισάγονται υποβάλλονται σε διαδικασίες ETL (Extract, Transform, Load) για να μετατραπούν και να φορτωθούν στην PostgreSQL βάση δεδομένων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, εφαρμόζεται ένας προηγμένος μηχανισμός ανίχνευσης και εξάλειψης διπλότυπων δεδομένων, χρησιμοποιώντας τεχνικές hashing για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα και η ποιότητα των δεδομένων που εισέρχονται στο σύστημα. Μετά την επιτυχή αποθήκευση των δεδομένων στη βάση, αυτά αναλύονται και οπτικοποιούνται μέσω της πλατφόρμας με τη χρήση της βιβλιοθήκης Highcharts, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία δυναμικών διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά ανανεώνονται σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας στους χρήστες τη δυνατότητα να φιλτράρουν τα δεδομένα και να τα παραμετροποιούν, ανάλογα με τις ανάγκες τους. Η διαδραστικότητα της πλατφόρμας ενισχύεται περαιτέρω με την υλοποίηση API σε NodeJS, που επιτρέπουν την ευέλικτη διαχείριση των δεδομένων και των διαγραμμάτων, προσφέροντας στους χρήστες μια ολοκληρωμένη εμπειρία ανάλυσης. Επιπλέον, έχει ενσωματωθεί ένας μηχανισμός αποστολής ειδοποιήσεων προς το τεχνικό προσωπικό, ο οποίος ενεργοποιείται σε περιπτώσεις κρίσιμων σφαλμάτων αυτοματισμούς της αποθήκης, με στόχο την άμεση ενημέρωση και επέμβαση.

2.13.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η τελική έκδοση της λύσης, δίνοντας έμφαση τόσο στη λειτουργικότητα των επιμέρους υποσυστημάτων όσο και στον τρόπο με τον οποίο αυτά συνδυάζονται μεταξύ τους για να προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων. Μέσα από επιλεγμένα παραδείγματα από τη διαδικτυακή πλατφόρμα και το Ψηφιακό Δίδυμο, αναδεικνύεται η αξία της λύσης.

2.13.4.1 Διαδικτυακή πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων

Η διαδικτυακή πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί ως το βασικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης του χρήστη με τα αποτελέσματα των επιμέρους υποσυστημάτων της λύσης. Η πλατφόρμα προσφέρει πέντε διακριτές υπηρεσίες, με τη μορφή dashboard. Δυο υποστηρίζουν την ανάλυση δεδομένων για χειροκίνητες διαδικασίες, δυο υποστηρίζουν την ανάλυση των σφαλμάτων των αυτοματισμών και η πέμπτη παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των προσομοιώσεων του ψηφιακού διδύμου. Η πέμπτη αυτή υπηρεσία θα παρουσιαστεί ξεχωριστά στην Ενότητα 2.11.4.2.

Η εισαγωγή δεδομένων στην πλατφόρμα πραγματοποιείται είτε μέσω της επιλογής Import data, όπου ο χρήστης καλείται να επιλέξει το σύστημα από το οποίο προέρχονται τα δεδομένα, να ορίσει την ημερομηνία που αυτά αφορούν και να ανεβάσει το σχετικό αρχείο με τη χρήση της επιλογής Choose File (Εικόνα 103α), είτε μέσω προκαθορισμένου FTP φακέλου, ενώ μπορεί να λαμβάνει και δεδομένα απευθείας από το Ψηφιακό Δίδυμο.

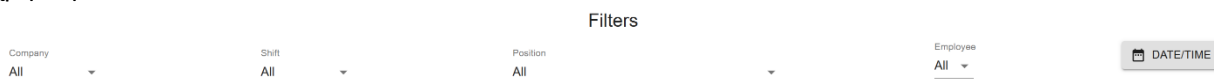
Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το χρονικό εύρος που τον ενδιαφέρει μέσω σχετικής επιλογής (Εικόνα 103β). Οι διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνουν προκαθορισμένα διαστήματα, όπως «Χθες», και τη δυνατότητα καθορισμού συγκεκριμένης περιόδου μέσω του ημερολογίου.

The image shows a user interface for data import and time range selection. On the left, there is a form titled 'Import data' with the following fields: 'System' (Aberon), 'Date' (ηη/μμ/εεεε), and 'File' (Επιλογή αρχείου). Below the file field, there is a message: 'Δεν επιλέχθηκε κανένα αρχείο.' At the bottom of the form are 'CANCEL' and 'IMPORT' buttons. On the right, there is a calendar interface for March 2025. The calendar shows the days of the month, with a date range from March 1st to March 31st selected. The calendar is titled 'March 2025' and 'Mar 31, 2025'.

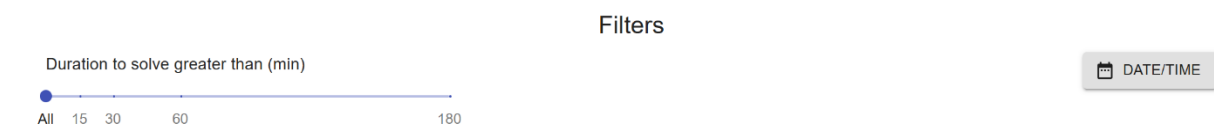
Εικόνα 103 (α) Εισαγωγή Δεδομένων στην πλατφόρμα; (β) Επιλογή Χρονικού Εύρους Δεδομένων

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Κάθε σελίδα της πλατφόρμας διαθέτει τα δικά της εξειδικευμένα φίλτρα, ανάλογα με τη φύση και τις απαιτήσεις των δεδομένων που απεικονίζει. Για παράδειγμα, στη σελίδα που αφορά τις χειροκίνητες διαδικασίες, των οποίων τα δεδομένα εξάγονται μέσω του WMS, παρέχονται φίλτρα όπως η εταιρεία ανάθεσης, η βάρδια, η θέση εργασίας, κωδικός υπαλλήλου και η ημερομηνία (βλ. Εικόνα 104). Αντίστοιχα, στη σελίδα παρακολούθησης των σφαλμάτων του αυτοματισμού αποθήκευσης παλετών (βλ. Εικόνα 105), τα φίλτρα εστιάζουν στη χρονική διάρκεια επίλυσης των σφαλμάτων και στην ημερομηνία εμφάνισής τους. Η ύπαρξη αυτών των φίλτρων καθιστά δυνατή την ευέλικτη προσαρμογή της προβολής, ενισχύοντας την κατανόηση και την αξιοποίηση των δεδομένων σύμφωνα με τις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη.

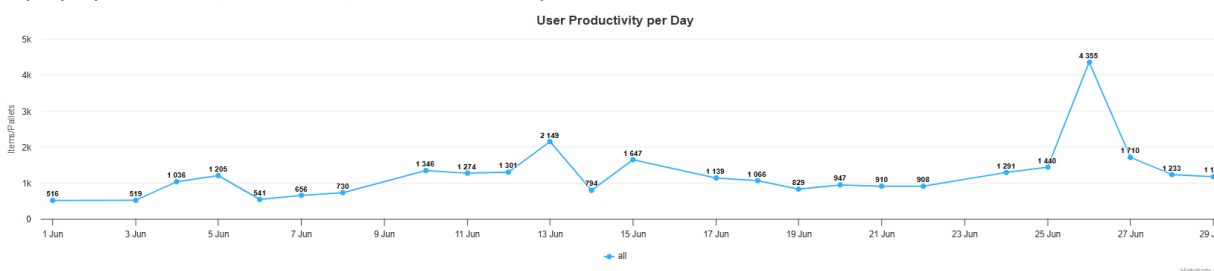


Εικόνα 104 Διαθέσιμα Φίλτρα της σελίδας ανάλυσης χειροκίνητων διαδικασιών



Εικόνα 105 Διαθέσιμα Φίλτρα της σελίδας ανάλυσης σφαλμάτων αυτοματισμού αποθήκευσης παλετών

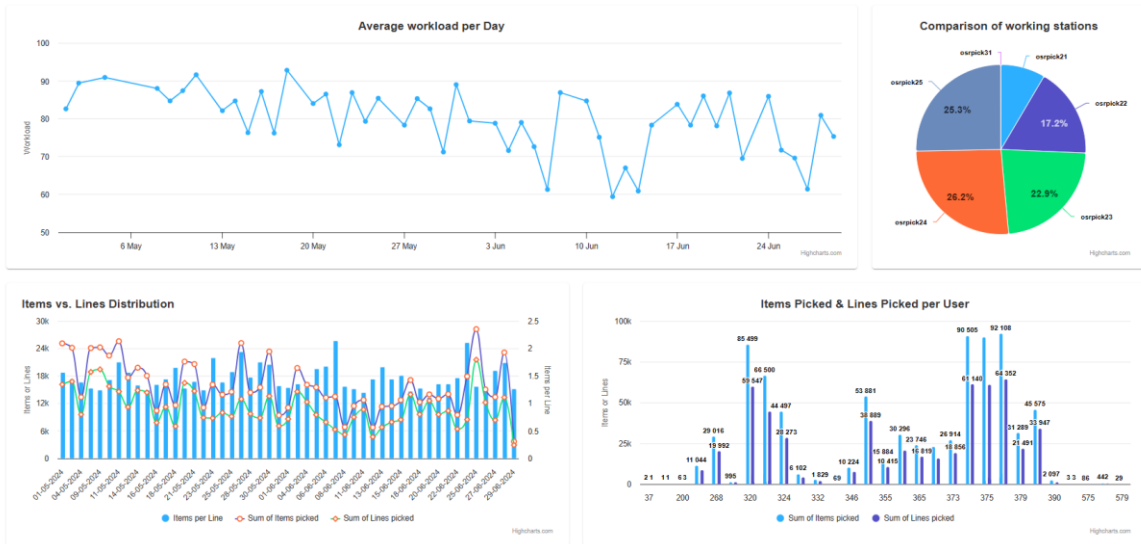
Χάρη σε αυτή την ευελιξία, η πλατφόρμα επιτρέπει την ανάπτυξη στοχευμένων πινάκων παρακολούθησης (dashboards) που αποτυπώνουν κρίσιμους λειτουργικούς δείκτες. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 106, παρουσιάζεται το dashboard της παραγωγικότητας των εργαζομένων ανά ημέρα για τον Ιούνιο του 2024, με φιλτραρισμένα δεδομένα για την πρώτη βάρδια και τη θέση εργασίας Decanting. Το διάγραμμα απεικονίζει την ημερήσια παραγωγικότητα, μετρώντας τον αριθμό των τεμαχίων που διαχειρίστηκαν οι εργαζόμενοι κατά τη διάρκεια του μήνα, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι στις 26 Ιουνίου υπήρξε κορύφωση στην παραγωγικότητα, η οποία ανήλθε σε 4.355 τεμάχια.



Εικόνα 106 Ημερήσια Παραγωγικότητα Εργαζομένων (Pick & Pack Data)

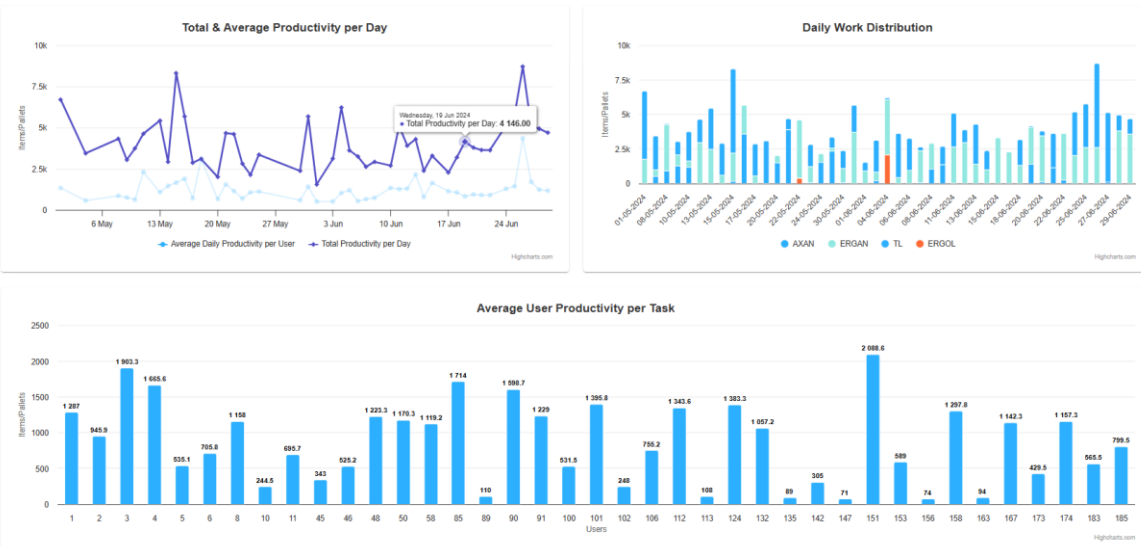
Ενώ άλλο παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 107, όπου με φίλτρα την ημερομηνία και τους κωδικούς εργαζομένου, παρουσιάζεται α) ο μέσος όρος του workload (πάνω αριστερά), β) η κατανομή του φόρτου εργασίας ανά σταθμό συλλογής συγκρίνοντας πόσες γραμμές παραγγελίας έχουν εκτελεστεί στον κάθε σταθμό (πάνω δεξιά), γ) το άθροισμα των προϊόντων (items) και των γραμμών παραγγελίας (order lines) που έχουν συλλεχθεί και ταυτόχρονα αποτυπώνεται και ο λόγος των προϊόντων ανά γραμμή παραγγελίας (items/order lines) (κάτω αριστερά), και τέλος δ) το άθροισμα των προϊόντων (items) και των γραμμών παραγγελίας (order lines) ανά χρήστη (κάτω δεξιά).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 107 Ημερήσια Δεδομένα Συλλογής (Daily Picking Data)

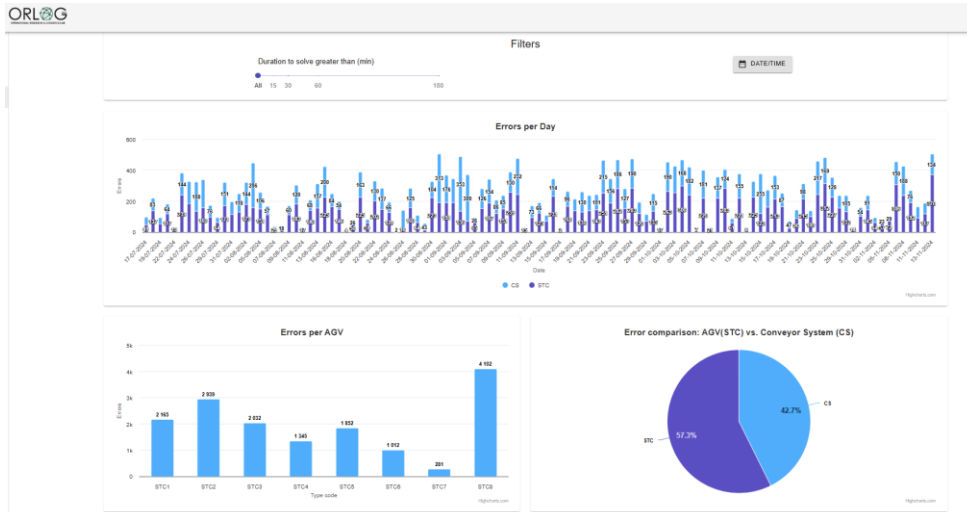
Αντίστοιχα, στην Εικόνα 108, με φίλτρα το είδος της εργασίας, την ημερομηνία, τη βάρδια (πρωινή ή απογευματινή) και το είδος ανάθεσης (εσωτερική ή εξωτερική), απεικονίζεται α) η συνολική (μωβ χρώμα) και μέση (γαλάζιο χρώμα) παραγωγικότητα εργασίας ανά ημέρα (πάνω αριστερά), β) η κατανομή εργασίας ανά ημέρα και ανά είδος ανάθεσης (εσωτερική ή εξωτερική) (πάνω αριστερά) και τέλος γ) η μέση παραγωγικότητα των εργαζομένων ανά εργασία (κάτω).



Εικόνα 108 Δεδομένα Συλλογής & Συσκευασίας (Pick & Pack Data)

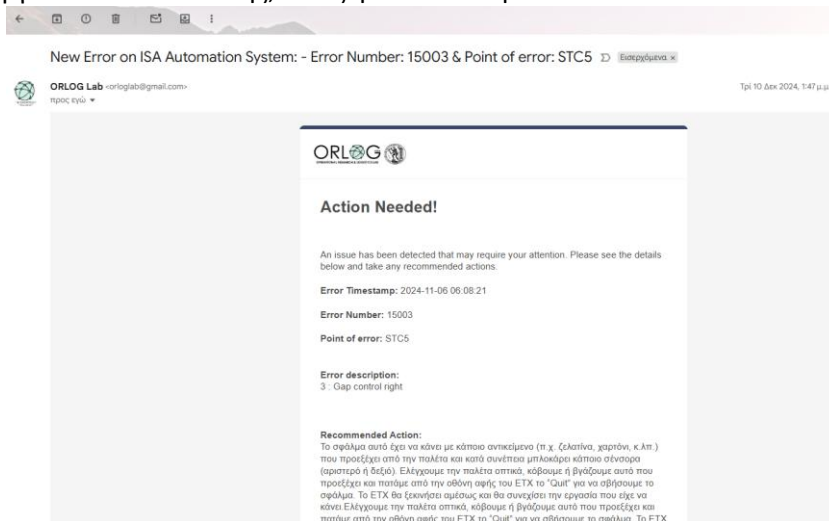
Ένα ακόμη χαρακτηριστικό παράδειγμα δυναμικής οπτικοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 109, η οποία αφορά τα σφάλματα λειτουργίας του συστήματος αυτοματισμού αποθήκευσης. Στο επάνω μέρος, εμφανίζεται το διάγραμμα Errors per Day, το οποίο καταγράφει την ημερήσια κατανομή των σφαλμάτων ανά σύστημα, διακρίνοντας μεταξύ των σφαλμάτων των αυτόματων οχημάτων (AGV – STC) και του συστήματος μεταφορικών ταινιών (Conveyor System – CS). Η χρονική εξέλιξη επιτρέπει τον εντοπισμό ημερών με αυξημένη αστοχία και τη συσχέτισή τους με εξωτερικούς παράγοντες ή επιχειρησιακές συνθήκες. Στο κάτω αριστερό διάγραμμα αποτυπώνεται η συχνότητα σφαλμάτων ανά AGV, διευκολύνοντας τον εντοπισμό οχημάτων με επαναλαμβανόμενες βλάβες και ενισχύοντας τη συντήρηση βάσει απόδοσης. Παράλληλα, το κυκλικό διάγραμμα στα δεξιά συγκρίνει τα συνολικά σφάλματα μεταξύ των AGVs και του Conveyor System.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 109 Δεδομένα σφάλματων λειτουργίας του ISA

Τέλος, έχει αναπτυχθεί και ενσωματωθεί ένας αυτόματος μηχανισμός αποστολής ειδοποιήσεων, ο οποίος ενεργοποιείται σε περιπτώσεις κρίσιμων σφαλμάτων που εντοπίζονται στο σύστημα αυτοματισμού αποθήκευσης παλετών. Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί ως υπηρεσία παρακολούθησης και ενημέρωσης σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι οι υπεύθυνοι τεχνικοί λαμβάνουν άμεσα τις απαραίτητες πληροφορίες για να ανταποκριθούν γρήγορα σε λειτουργικές δυσλειτουργίες. Συγκεκριμένα, όταν ανιχνευτεί σφάλμα με αυξημένο χρόνο επίλυσης ή/και υψηλή προτεραιότητα, δημιουργείται αυτόματα μια εξατομικευμένη ειδοποίηση που αποστέλλεται μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Το περιεχόμενο της ειδοποίησης περιλαμβάνει όλα τα κρίσιμα πεδία για την άμεση κατανόηση του προβλήματος: την ημερομηνία και ώρα καταγραφής, τον αριθμό του σφάλματος, το υποσύστημα στο οποίο εντοπίστηκε, τη σύντομη περιγραφή του προβλήματος καθώς και τη συνιστώμενη ενέργεια αποκατάστασης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 110.



Εικόνα 110 Εξατομικευμένη ειδοποίηση

2.13.4.2 Ψηφιακό Δίδυμο

Η τελική έκδοση του Ψηφιακού Διδύμου έχει σχεδιαστεί ως ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των ανθρωπίνων πόρων και των περονοφόρων οχημάτων σε διαδικασίες που αλληλοεπιδρούν με τον αυτοματισμό αποθήκευσης παλετών. Το σύστημα λαμβάνει αυτόματα δεδομένα σχετικά με τις αναμενόμενες εισερχόμενες παραλαβές φορτηγών και παλετών, καθώς και τις εξερχόμενες αποστολές, μαζί με τις αρχικά προβλεπόμενες βάρδιες προσωπικού για τις διαδικασίες παραλαβής και αποστολής παλετών.

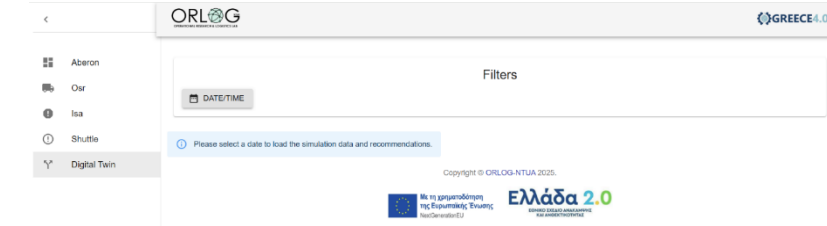
P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Μέσω του μοντέλου προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να υπολογίσει με υψηλή ακρίβεια:

- Την αξιοποίηση (utilization) του προσωπικού και των περνοφόρων
- Τις ώρες αιχμής κατά τη διάρκεια της ημέρας
- Τη στελέχωση που απαιτείται για κάθε επιμέρους διαδικασία

Με βάση τους υπολογισμούς αυτούς, το σύστημα προτείνει τον βέλτιστο αριθμό εργαζομένων και περνοφόρων, εξασφαλίζοντας είτε τη βεβαιότητα επάρκειας, είτε την έγκαιρη ανακατανομή ή ενίσχυση πόρων. Τα δεδομένα της προσομοίωσης αποθηκεύονται και μετασχηματίζονται στη βάση δεδομένων της πλατφόρμας, ώστε να είναι έτοιμα για οπτικοποίηση.

Κατά την είσοδο στην πλατφόρμα, ο χρήστης μπορεί να μεταβεί στη σελίδα του Ψηφιακού Διδύμου, όπου του εμφανίζεται ένα ευγενικό μήνυμα καθοδήγησης για να επιλέξει την ημερομηνία ενδιαφέροντος (βλ. Εικόνα 111).

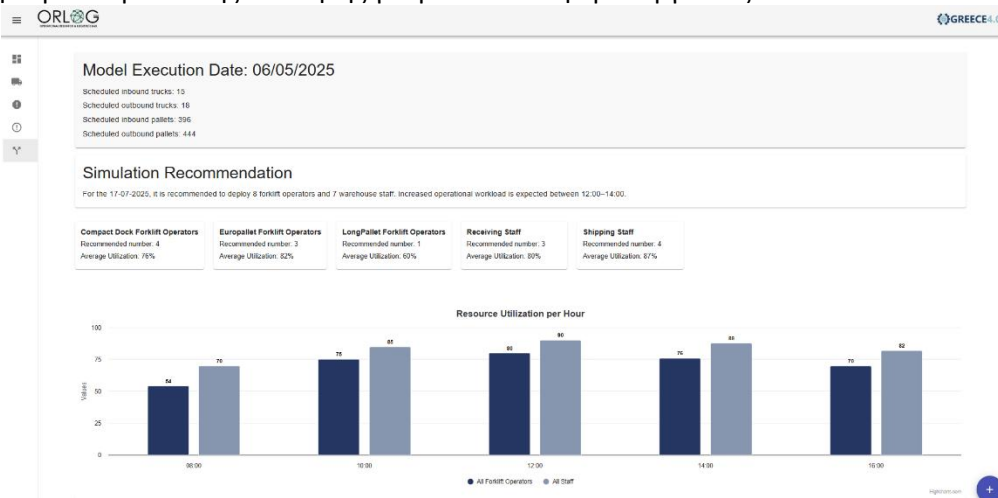


Εικόνα 111 Εισαγωγή Ημερομηνίας

Στην Εικόνα 112 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα λειτουργίας της πλατφόρμας για την ημερομηνία 6/5/2025. Έχοντας επιλέξει την ημερομηνία 6/5/2025, ο χρήστης μπορεί να δει συγκεντρωμένα όλα τα βασικά λειτουργικά δεδομένα που προβλέπει το μοντέλο: αριθμός παραλαβών και αποστολών, πλήθος παλετών, αλλά και την προτεινόμενη στελέχωση ανά διαδικασία. Δίνεται ο προτεινόμενος αριθμός ανά πόρο αλλά και το ποσοστό αξιοποίησης του όπως εκτιμήθηκε από το μοντέλο. Η γραφική απεικόνιση Resource Utilization per Hour επιτρέπει στον χρήστη να εντοπίσει τις ώρες αιχμής, όπου η απαιτούμενη εργασία φτάνει στο μέγιστο. Στο παράδειγμα, η χρονική ζώνη 12:00–14:00 εμφανίζεται με αυξημένη αξιοποίηση σε forklifts και προσωπικό, στοιχείο που βοηθά στον επιχειρησιακό σχεδιασμό. Στην ενότητα Suggested Action, ο υπεύθυνος μπορεί άμεσα να δει μια περιληπτική και επιχειρησιακά χρήσιμη πρόταση για την απαιτούμενη στελέχωση, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία της ημέρας.

Η συγκεκριμένη σελίδα λειτουργεί ως ένα ενιαίο περιβάλλον λήψης απόφασης, όπου τα δεδομένα της προσομοίωσης μετατρέπονται σε πρακτική πληροφόρηση που υποστηρίζει:

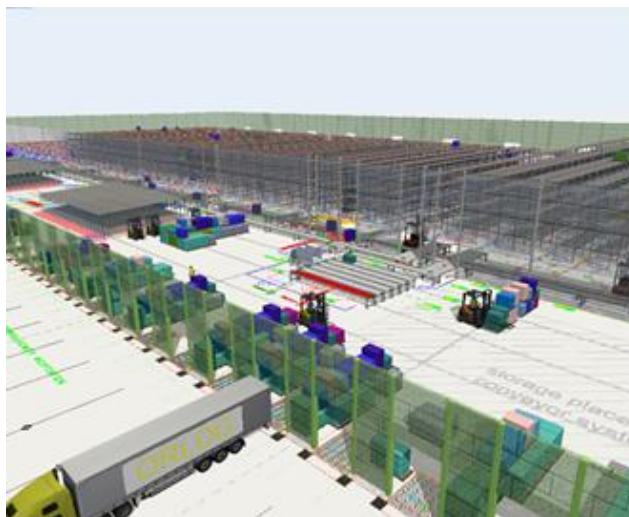
- Τον προγραμματισμό βαρδίων
- Την ανακατανομή διαθέσιμου προσωπικού
- Την προετοιμασία της αποθήκης για μελλοντικό φόρτο εργασίας



Εικόνα 112 Παράδειγμα Λειτουργίας Σελίδας Ψηφιακού διδύμου

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Ακολουθεί ένα στιγμιότυπο οθόνης από το μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο αποτυπώνει λεπτομερώς τη διάταξη του χώρου και τη ροή των υλικών σε μια σύγχρονη αποθηκευτική εγκατάσταση. Το μοντέλο επιτρέπει τη μελέτη της λειτουργίας του συστήματος, με έμφαση στη μοντελοποίηση των διαδικασιών παραλαβής, αποστολής και εσωτερικών διακινήσεων, καθώς και στη λειτουργία ενός αυτοματοποιημένου συστήματος διαχείρισης παλετών τύπου Automated Storage and Retrieval System (ASRS). Ο αυτοματισμός αυτός διαχειρίζεται δύο τύπους παλετών, τις Euro (1,2m×0,8m) και τις Long (2m×0,8m), και αποτελείται από ράφια παλετών, ραουλόδρομους, περιστρεφόμενα τραπέζια, βαγόνια μεταφοράς, ράουλα βαρύτητας καθώς και μη επανδρωμένα περνοφόρα στενού διαδρόμου (AGVs).



Εικόνα 113 Επισκόπηση Μοντέλου Προσομοίωσης Αποθηκευτικής Διάταξης

Το script της Python που έχει αναπτυχθεί για τις ανάγκες του Ψηφιακού Διδύμου αποτελεί κρίσιμο σημείο της λύσης και φαίνεται στην Εικόνα 114. Ο ρόλος του είναι να αυτοματοποιεί την εκτέλεση του μοντέλου προσομοίωσης στο FlexSim, να συλλέγει τα αποτελέσματα που παράγονται και να τα μετασχηματίζει σε δομημένη ψηφιακή μορφή, κατάλληλη για περαιτέρω ανάλυση και απεικόνιση στην πλατφόρμα.

```

Project > DT_Greece4.0_CollectData.py x
FlexsimModelControl C:\Python\FlexsimMo
  venv library root
  DT_Greece4.0.py
  DT_Greece4.0_CollectData.py
  FirstModel.py
  FlexSimPy.pyd
  main.py
  TestFlexSimPy.py
  External Libraries
  Scratches and Consoles
1 import FlexSimPy as fp
2 from datetime import datetime, timedelta
3 import json
4
5 today = datetime.now()
6 next_day = today + timedelta(days=1)
7 model_date = next_day.strftime("%d/%m/%Y")
8
9 pDir = r"C:\Users\Kitsantas\Documents\FlexSimDevelopment\FlexSim 2025\program"
10 controller = fp.launch(evaluationLicense=True, showGUI=False, programDir=pDir)
11
12 controller.open(r"C:\Users\Kitsantas\Desktop\Greece 4.0\DigitalTwin\WarehouseModel\Greece4.0.fsm")
13 controller.reset()
14 controller.runToTime(7200)
15 controller.stop()
16
17 Susages
18 def pct(val):
19     return round(float(val) * 100, 1)
20
21 output = {
22     "model_date": model_date,
23     "resources": [
24         {
25             "category": "Compact Dock Forklifts",
26             "recommended_count": controller.getParameter("CompactDockForklifts"),
27             "utilization": pct(controller.getPerformanceMeasure("PerformanceMeasure1"))
28         },
29         {
30             "category": "Forklifts for Europallets",
31             "recommended_count": controller.getParameter("ForkliftsEuropallets"),
32             "utilization": pct(controller.getPerformanceMeasure("PerformanceMeasure2"))
33         },
34         {
35             "category": "Forklifts for LongPallets",
36             "recommended_count": controller.getParameter("ForkliftsLongPallets"),
37             "utilization": pct(controller.getPerformanceMeasure("PerformanceMeasure3"))
38         }
39     ]
40 }

```

Εικόνα 114 Εκτέλεση και Εξαγωγή Δεδομένων από το Μοντέλο Προσομοίωσης μέσω Python

2.14 Βιομηχανικό μετασύμπαν με την χρήση εξηγηματικής τεχνητής νοημοσύνης για εφαρμογές επιχειρηματικής νοημοσύνης

2.14.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η ανάπτυξη της λύσης του βιομηχανικού μετασύμπαντος απαρτίζεται από ένα σύνολο σταδίων υλοποίησης τα οποία παρουσιάζονται στο παρόν παραδοτέο. Πιο συγκεκριμένα, αυτά είναι:

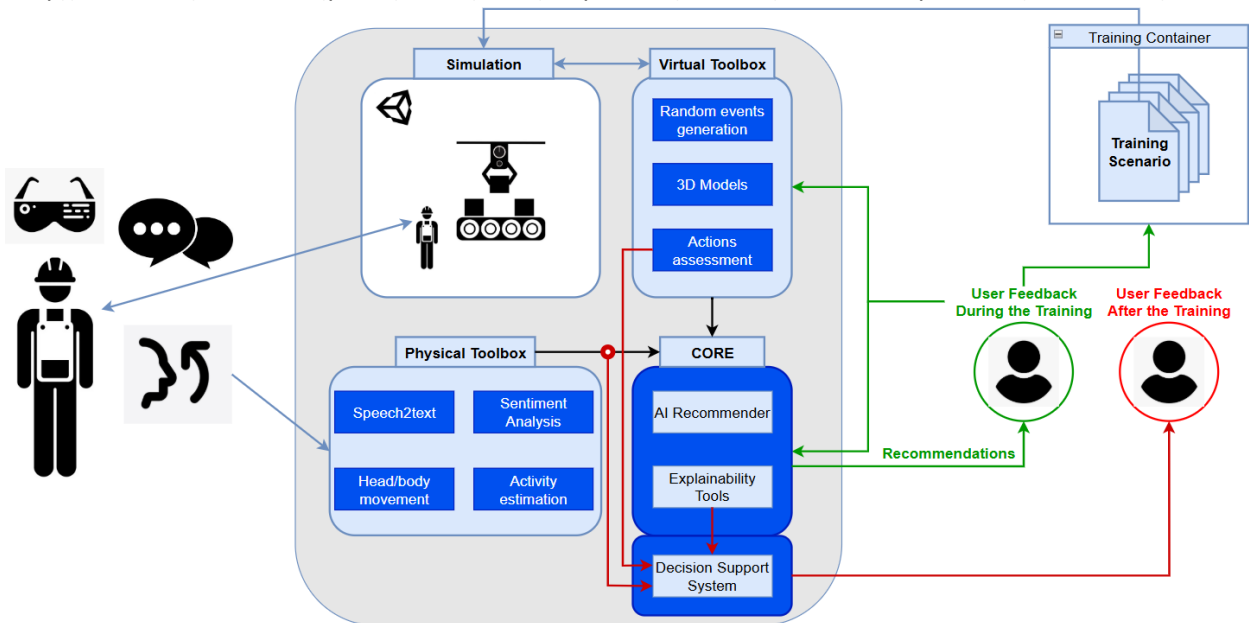


Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- **Συλλογή και διατύπωση σεναρίου προσομοίωσης:** περιλαμβάνει τον καθορισμό των ενεργειών που θα ενσωματωθούν στον εικονικό κόσμο του μετασύνπαντος στο οποίο θα μεταβαίνει ο χρήστης.
- **Δημιουργία φυσικής εργαλειοθήκης:** περιλαμβάνει τα μέσα και τα εργαλεία αλληλεπίδρασης του χρήστη στον πραγματικό κόσμο και η επεξεργασία των δεδομένων αυτών.
- **Δημιουργία ψηφιακής εργαλειοθήκης:** περιλαμβάνει την δημιουργία του εικονικού κόσμου του μετασύνπαντος με ένα σύνολο 3D μοντέλων, απεικονίσεων και οπτικοακουστικών μέσων, καθώς και τα εργαλεία και animations αλληλεπίδρασης του χρήστη στο περιβάλλον αυτό.
- **Δημιουργία πυρήνα:** αποτελείται από τα μοντέλα επεξηγηματικής τεχνητής νοημοσύνης για την καταγραφή της απόδοσης του χρήστη κατά την εκτέλεση του σεναρίου και παραγωγή συστάσεων και επεξηγήσεων για την βελτίωσή του.

2.14.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η αρχιτεκτονική του συστήματος, όπως αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα παρακάτω (Εικόνα 115).



Εικόνα 115 Αρχιτεκτονική του Συστήματος για την Εκπαίδευση του Προσωπικού σε Βιομηχανικό Μετά-Σύνπαν

Αποτελεί μια διαδικασία ψηφιακής εκπαίδευσης του προσωπικού, εφαρμόζοντας γυαλιά ψηφιακής πραγματικότητας (Virtual Reality - VR) και αποτελείται από τα ακόλουθα 4 τμήματα: Το σενάριο προσομοίωσης (Simulation), την εικονική και φυσική εργαλειοθήκη (Virtual & Physical Toolboxes) και τον πυρήνα (Core). Στο σενάριο προσομοίωσης θα αποτυπώνεται το σενάριο εκπαίδευσης (Training Container) το οποίο θα παρέχεται από κάποια βιομηχανία και θα παρέχει τις κατάλληλες πληροφορίες για τους χώρους και τα πόστα εργασίας. Ο χρήστης θα αλληλοεπιδρά σε αυτό μέσω των γυαλιών και των χειριστηρίων. Η προσομοίωση θα περιέχει τα κατάλληλα τρισδιάστατα (3D) μοντέλα και μηχανισμούς τα οποία θα αποτυπώνουν τη διαδικασία της εκπαίδευσης και θα ολοκληρώνουν τη ψηφιακή εργαλειοθήκη. Επιπλέον, οι ενέργειες του χρήστη στο ψηφιακό κόσμο θα επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να αναγνωρίζεται από το σύστημα η δραστηριότητα που πραγματοποιείται και το κατά πόσο αυτή διαφέρει από την ενέργεια που θα έπρεπε να έχει υλοποιηθεί, σύμφωνα με το σενάριο εκπαίδευσης.

2.14.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Συλλογή Πρόθεση Χρήσης και Σχεδιασμός Συσκευών Εικονικής Πραγματικότητας

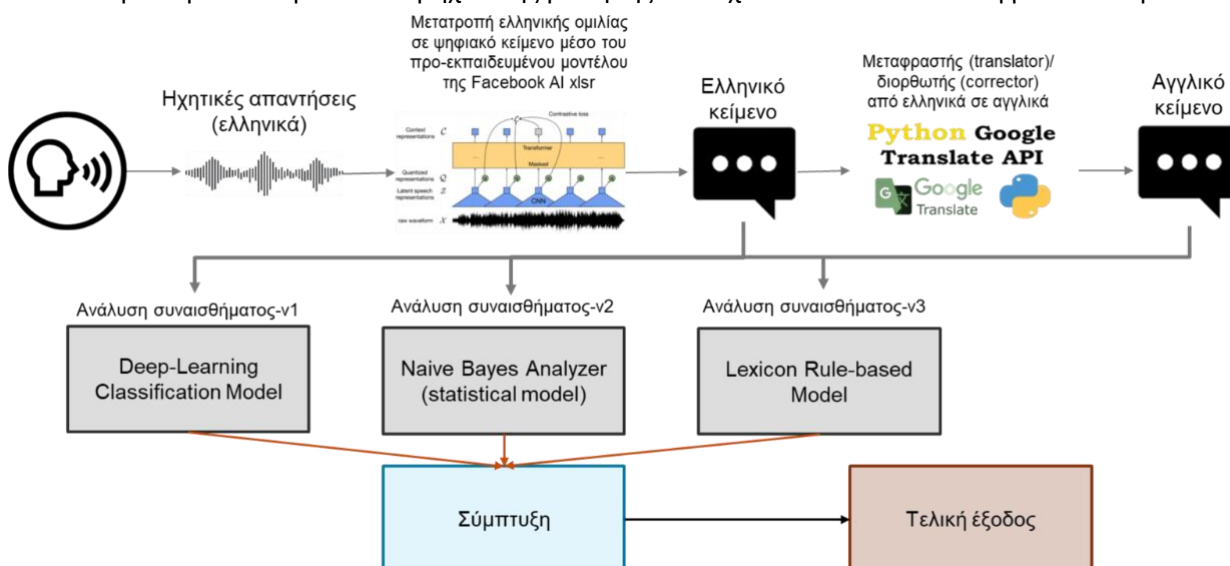
Στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός προηγμένου εκπαιδευτικού συστήματος με χρήση γυαλιών εικονικής πραγματικότητας (VR), πραγματοποιήθηκε η εκπόνηση ερωτηματολογίου με στόχο τη διερεύνηση της πρόθεσης χρήσης φορετών συσκευών από εργαζομένους στην ελληνική βιομηχανία. Το ερωτηματολόγιο

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής (<https://forms.gle/SMsu7W55JxEodvTz6>) βασίστηκε στη Θεωρία Λογισμού Απορρήτου (Privacy Calculus Theory) και περιλάμβανε 53 ερωτήσεις σε πενταβάθμια κλίμακα Likert, εξετάζοντας παράγοντες όπως τα αντιληπτά οφέλη, οι κίνδυνοι, η ανησυχία για την ιδιωτικότητα και η πρόθεση χρήσης. Σκοπός της έρευνας είναι η κατανόηση των στάσεων των εργαζομένων απέναντι στην τεχνολογία VR στο εργασιακό περιβάλλον, με στόχο την ενίσχυση της αποδοχής του τελικού προϊόντος. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω κοινωνικών δικτύων και QR codes, ενώ συνολικά συγκεντρώθηκαν 2243 απαντήσεις.

2.14.3.1 Φυσική εργαλειοθήκη

Ομιλία σε κείμενο και ανάλυση συναισθήματος

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της εκπαίδευσης, ο εκπαιδευόμενος δίνει μια συνέντευξη απαντώντας με ερωτήσεις που αφορούν τα συγκεκριμένα 5 πεδία: α) Ευκολία χρήσης, β) απόλαυση, γ) immersion, δ) intrinsic, ε) ικανοποίηση και στ) χρησιμότητα. Στη συνέχεια, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 116, τα ηχητικά σήματα από τις απαντήσεις του χρήστη απομονώνονται και δίνονται ως είσοδοι σε μοντέλο μετατροπής ομιλίας σε κείμενο, και συγκεκριμένα το Facebook AI xlsr[1, 2]. Σε επόμενο βήμα, το παραγόμενο κείμενο μεταφράζεται στα Αγγλικά, χρησιμοποιώντας το εργαλείο Python Google Translate API[3]. Η μετάφραση υλοποιείται για την αποδοτικότερη ανάλυση συναισθήματος, από προ-εκπαιδευμένα μοντέλα βαθιά και μηχανικής μάθησης που έχουν εκπαιδευτεί σε αγγλικά δεδομένα.



Εικόνα 116 Αρχιτεκτονική του υπό-συστήματος ομιλίας σε κείμενο και ανάλυση συναισθήματος

Στη συνέχεια, το ελληνικό κείμενο εφαρμόζεται σε μοντέλο δυαδικής ταξινόμησης βαθιάς μάθησης[4], ενώ το αγγλικό σε στατιστικό μοντέλο Naive Bayes[5] και σε μοντέλο βασισμένο σε κανόνες[6]. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται παραδείγματα από πιθανές απαντήσεις των χρηστών, οι μεταφράσεις αυτών, και οι αντίστοιχες έξοδοι των τριών μοντέλων. Το υπό-σύστημα βασίζεται κυρίως στο δεύτερο αγγλικό, όπου δίνεται μία μέτρηση για κάθε κλάση, αρνητική, ουδέτερη και θετική, καθώς και μία συνδυαστική. Τέλος, αν το συγκεκριμένο μοντέλο δεν έχει ξεκάθαρο έξοδο (είναι δηλαδή όλες οι μετρήσεις κοντά στο 0,5), τότε αξιοποιούνται το δεύτερο αγγλικό, όπου το -1 αντιστοιχεί σε πλήρως αρνητική απάντηση, ενώ το +1 σε θετική, και το ελληνικό που ταξινομεί το ψηφιακό κείμενο ως αρνητικό ή θετικό.

Για την αξιολόγηση του συστήματος, εφαρμόσαμε 315 ενδεικτικές απαντήσεις, με μετρική την ακρίβεια (accuracy), που ορίζεται ως το ποσοστό των σωστά ταξινομημένων κειμένων προς το σύνολο όλων των προτάσεων. Συγκεκριμένα, 93 προτάσεις χρησιμοποιήθηκαν για την ευκολία χρήσης, 40 για την απόλαυση, 31 σχετικά με το immersion, 13 που αναφέρονται στο intrinsic, 63 ως προς την ικανοποίηση και 75 για την χρησιμότητα, επιτυγχάνοντας ακρίβεια 90,32%, 90,00%, 90,32%, 92,30%, 90,48% και 90,67%, αντίστοιχα. Τέλος, η συνολική ακρίβεια όλων των περιπτώσεων είναι 90,47%.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Πίνακας 14: Παραδείγματα προτάσεων και αποτελέσματα ανάλυσης συναισθήματος από τα τρία μοντέλα

	Κείμενο	Μετάφραση	English sentiment v1, where -1 is negative and +1 positive (regression):	English sentiment v2 (multiple scores):	Greek sentiment 1, where 0 is negative and +1 positive (classification)	
Positive	1	Αυτή η εμπειρία ήταν εκπληκτική και πολύ εκπαιδευτική! Ένωσα ότι μάθαινα γρήγορα και αποτελεσματικά μέσω της εικονικής πραγματικότητας.	This experience was amazing and very educational! I felt like I was learning quickly and effectively through virtual reality.	0.63125	{'neg': 0.0, 'neu': 0.628, 'pos': 0.372, 'compound': 0.8588}	1
	2	Η εικονική πραγματικότητα έκανε τη μάθηση πραγματικά διασκεδαστική. Ήταν σαν να συμμετείχα σε ένα παιχνίδι ενώ ταυτόχρονα μάθαινα πολύτιμες δεξιότητες.	Virtual reality has made learning really fun. It was like participating in a game while learning valuable skills at the same time.	0.241666667	{'neg': 0.0, 'neu': 0.674, 'pos': 0.326, 'compound': 0.8479}	1
	3	Ένωσα ότι κατανοούσα πλήρως τη διαδικασία συναρμολόγησης του ηλεκτρικού πίνακα χάρη στις λεπτομερείς οδηγίες και τα ρεαλιστικά γραφικά.	I felt like I fully understood the process of assembling the electrical panel thanks to the detailed instructions and realistic graphics.	0.427777778	{'neg': 0.0, 'neu': 0.779, 'pos': 0.221, 'compound': 0.6597}	0
	4	Ήθα ήθελα πολύ να δω περισσότερες τέτοιες ψηφιακές εκπαιδευτικές δραστηριότητες, καθώς πιστεύω ότι αυτός είναι ο καλύτερος τρόπος μάθησης για εμένα.	I would love to see more digital learning activities like this as I think this is the best way of learning for me.	0.35	{'neg': 0.0, 'neu': 0.647, 'pos': 0.353, 'compound': 0.8979}	1
	5	Η χρήση των γυαλιών εικονικής πραγματικότητας έκανε την εκπαίδευση πιο διαδραστική και ενδιαφέρουσα, δίνοντάς μου τη δυνατότητα να εξασκηθώ σε πραγματικές συνθήκες χωρίς κίνδυνο.	Using virtual reality glasses made the training more interactive and interesting, enabling me to practice in real conditions without risk.	0.433333333	{'neg': 0.0, 'neu': 0.799, 'pos': 0.201, 'compound': 0.5828}	1
Neutral	6	Η εκπαίδευση μέσω εικονικής πραγματικότητας ήταν αρκετά χρήσιμη, αν και δεν ήταν κάτι που δεν μπορούσα να μάθω και από ένα παραδοσιακό σεμινάριο.	The virtual reality training was quite useful, although it wasn't something I couldn't learn from a traditional tutorial.	0.375	{'neg': 0.0, 'neu': 0.842, 'pos': 0.158, 'compound': 0.4927}	1
	7	Η διαδικασία ήταν σαφής και κατανοητή, χωρίς να παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες ή εκπλήξεις.	The process was clear and understandable, without presenting any particular difficulties or surprises.	0.358333333	{'neg': 0.132, 'neu': 0.599, 'pos': 0.269, 'compound': 0.3182}	0
	8	Η εικονική πραγματικότητα παρέχει έναν καλό τρόπο εξάσκησης, αν και δεν μπορώ να πω ότι είναι καλύτερος από την πρακτική εξάσκηση στον πραγματικό κόσμο.	VR provides a good way to practice, although I can't say it's better than real-world practice.	0.55	{'neg': 0.125, 'neu': 0.725, 'pos': 0.15, 'compound': 0.1265}	1
	9	Η εμπειρία με τα γυαλιά ήταν όπως την περίμενα, χωρίς κάτι το εξαιρετικό, αλλά ούτε και κάτι αρνητικό.	The experience with the glasses was as I expected, nothing extraordinary, but nothing negative either.	0.6	{'neg': 0.0, 'neu': 0.778, 'pos': 0.222, 'compound': 0.612}	1

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

	10	Η εκπαίδευση ολοκληρώθηκε χωρίς προβλήματα, παρόλο που θα μπορούσε να ήταν λίγο πιο διαδραστική και ενδιαφέρουσα.	The training went smoothly, although it could have been a bit more interactive and interesting.	0.5	{'neg': 0.0, 'neu': 0.825, 'pos': 0.175, 'compound': 0.4522}	1
	11	Δεν βρήκα την εικονική πραγματικότητα ιδιαίτερα βοηθητική, καθώς η τεχνολογία δεν φάνηκε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες μου για εκπαίδευση.	I did not find VR particularly helpful as the technology did not seem to meet my training needs.	0.333333333	{'neg': 0.0, 'neu': 0.846, 'pos': 0.154, 'compound': 0.4754}	1
	12	Τα γυαλιά εικονικής πραγματικότητας ήταν άβολα και δύσχρηστα, κάνοντας την εμπειρία λιγότερο ευχάριστη από ό,τι περίμενα.	The VR glasses were uncomfortable and awkward to use, making the experience less enjoyable than I expected.	0.613333333	{'neg': 0.202, 'neu': 0.673, 'pos': 0.125, 'compound': -0.1513}	1
Negative	13	Η εκπαίδευση ήταν κουραστική και με πολλά προβλήματα, με την εικονική πραγματικότητα να μην ανταποκρίνεται στις προσδοκίες μου.	The training was tedious and had many problems, with the virtual reality not meeting my expectations.	0.75	{'neg': 0.153, 'neu': 0.847, 'pos': 0.0, 'compound': -0.4019}	0
	14	Η διαδικασία δεν ήταν επαρκώς εξηγημένη, με αποτέλεσμα να μην μπορώ να κατανοήσω πλήρως τα βήματα της συναρμολόγησης του ηλεκτρικού πίνακα.	The process was not well explained and confusing, resulting in me not being able to fully understand the steps of assembling the electrical panel.	0.5125	{'neg': 0.144, 'neu': 0.856, 'pos': 0.0, 'compound': -0.4047}	0
	15	Η εμπειρία ήταν απογοητευτική και δεν έμαθα όσα ήθελα, καθώς η τεχνολογία της εικονικής πραγματικότητας δεν λειτουργούσε όπως θα έπρεπε.	The experience was frustrating and I didn't learn as much as I wanted to because VR technology didn't work as it should.	0.55	{'neg': 0.116, 'neu': 0.884, 'pos': 0.0, 'compound': -0.4404}	0

2.14.3.2 Ψηφιακή εργαλειοθήκη

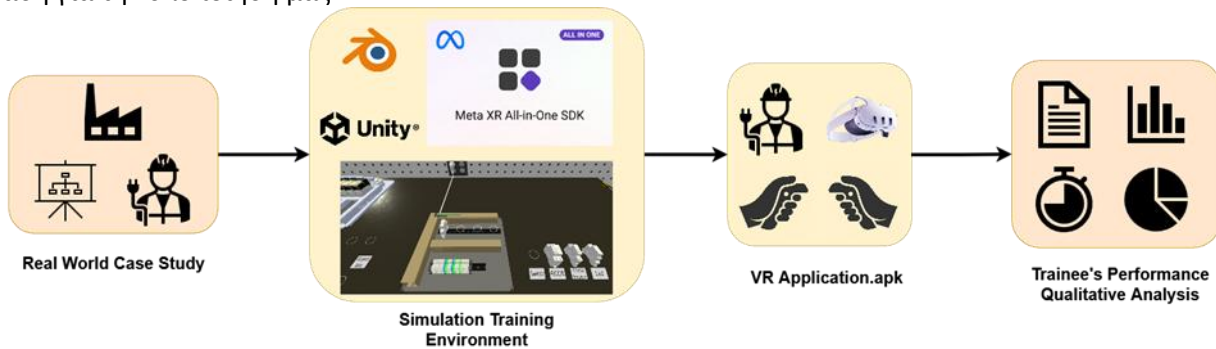
Η προτεινόμενη εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας στοχεύει στη δημιουργία ενός επεκτατικού και διαδραστικού ψηφιακού οικοσυστήματος που ενδυναμώνει τις επιχειρήσεις με τη συλλογή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, την προσομοίωση του εργασιακού περιβάλλοντος, των διαδικασιών του και την εκπαίδευση ή μετεκπαίδευση νέου και υπάρχοντος προσωπικού. Η αρχιτεκτονική του συστήματος, καθιερώνει ένα ψηφιακό πλαίσιο εκπαίδευσης που χρησιμοποιεί γυαλιά ψηφιακής πραγματικότητας ως τον εξοπλισμό διεπαφής της εφαρμογής με το χρήστη. Στο κέντρο της αρχιτεκτονικής αυτής τοποθετείται το περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο υλοποιείται μέσω της μηχανής τρισδιάστατων γραφικών ανοιχτού λογισμικού Unity 3D Engine. Η υλοποίηση του ψηφιακού κόσμου είναι συνυφασμένη με τις ανάγκες, τους χώρους και τις λειτουργίες τις εκάστοτε βιομηχανίας. Ορθά και λεπτομερή σενάρια με πληροφορίες για τον χώρο εργασίας, τη ροή εργασίας και διαφορά περιστατικά, εκφράζονται με τρισδιάστατα μοντέλα κατασκευασμένα σε διάφορες πλατφόρμες όπως Blender 3D, CAD, κτλ. και μηχανισμούς υλοποιημένους σε C# γλώσσα προγραμματισμού. Οι χρήστες αλληλοεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο με τη ψηφιακή εφαρμογή, μέσω των γυαλιών και χειριστηρίων VR Meta Quest 3 ή φυσικών χεριών με αναγνώρισή τους από τις κάμερες των γυαλιών.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, είναι απαραίτητη η σωστή ρύθμιση, εγκατάσταση και σύνδεση των παρακάτω λογισμικών. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να εγκατασταθεί σε έναν προσωπικό υπολογιστή η εφαρμογή Meta Quest Link που αποτελεί την διεπαφή των γυαλιών με το προσωπικό υπολογιστή όπου έχει εγκατασταθεί και τρέχει η μηχανή γραφικών Unity. Ο προσωπικός υπολογιστής θα πρέπει να τρέχει λειτουργικό σύστημα Windows καθώς η εφαρμογή Meta Quest Link δεν είναι ακόμα διαθέσιμη σε άλλα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

λειτουργικά συστήματα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις ελάχιστες απαιτήσεις συστήματος. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες, η εφαρμογή Meta Quest Link θα πρέπει να συνδεθεί καταλλήλως με τα γυαλιά και τα χειριστήρια. Παρόλο που η χρήση κινητού για επίβλεψη της εκπαίδευσης μπορεί να είναι χρήσιμη, δεν είναι απαραίτητη. Μετά τη διασύνδεση του εξοπλισμού με την εφαρμογή Meta Quest Link, ακολουθεί η σύνδεση με τη μηχανή Unity, μέσω του πακέτου ανοιχτού κώδικα Meta XR All-in-One SDK, και η ενσωμάτωση του με τη μηχανή. Οι τελικοί χρήστες μπορούν να τρέξουν την εφαρμογή απευθείας μέσα από τα γυαλιά Meta Quest 3 εφόσον αυτή έχει εξαχθεί στο σκληρό δίσκο των γυαλιών και τα απαραίτητα δικαιώματα εκτέλεσης έχουν αποδοθεί. Στη πράξη όμως εξαιτίας του κακού εξαερισμού των γυαλιών και τις υψηλής κατανάλωσής υπολογιστικών πόρων, παρατηρήθηκε υπερθέρμανση και κωλύματα κατά τη χρήση. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η εκτέλεση της εφαρμογής από το προσωπικό υπολογιστή και η προβολή της εικόνας στα γυαλιά είτε μέσω καλωδίου type-c είτε μέσω ασύρματης σύνδεσης με κοινό Wi-Fi, με μόνο περιορισμό αυτόν της ταχύτητας Mbs της σύνδεσης.

Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας και υπήρξε αλληλεπίδραση με το προσωπικό τους, προκειμένου να αποκτηθεί κατανόηση των επιμέρους ροών εργασίας και των δομών παραγωγής κάθε τομέα. Έπειτα από αυτές τις συζητήσεις, επιλέξαμε τον πόστο εργασίας ενός εργαζομένου από το τμήμα ηλεκτρολογικών κατασκευών μιας τοπικής εταιρείας ως βάση για την υλοποίησή μας.



Εικόνα 117 Αρχιτεκτονική Εφαρμογής Εικονικής Πραγματικότητας

Στην Εικόνα 117 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος. Η αρχιτεκτονική του συστήματος απαρτίζεται από την ανάλυση και μελέτη ενός εργασιακού περιβάλλοντος πραγματικού κόσμου και των δυναμικών του. Ακολούθως, δημιουργήθηκε η εφαρμογή εικονικού περιβάλλοντος, η οποία αποτελεί ψηφιακό δίδυμο του προαναφερθέντα εργασιακού περιβάλλοντος. Τα τρισδιάστατα μοντέλα και γραφικά της εφαρμογής υλοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Blender και τη πλατφόρμα Unity. Μετά την ολοκλήρωση του τρισδιάστατου εικονικού χώρου και τη ενσωμάτωση του στη Unity κατασκευάστηκαν όλοι οι απαραίτητοι μηχανισμοί και αλγόριθμοι για την υλοποίηση όλων των επιθυμητών μηχανισμών.

Η εκπαιδευτική εφαρμογή αξιοποιεί μια πληθώρα μηχανισμών για να προσφέρει μια πλήρως διαδραστική και ρεαλιστική εμπειρία στον χρήστη. Ο χρήστης αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον είτε με τα χειριστήρια VR είτε με τα φυσικά του χέρια, χάρη στον ενσωματωμένο μηχανισμό εκτίμησης φυσικών χεριών. Η αναγνώριση κινήσεων και χεριών, οι βασικοί μηχανισμοί και το σύστημα εισόδου υλοποιούνται μέσω του OVR CAMERARIG PREFAB.

Η πρώτη σκηνή περιλαμβάνει τη διεπαφή χρήστη (UI), ο χρήστης αλληλοεπιδρά μέσω μηχανισμών raycast point-and-click, με τα στοιχεία UI χρησιμοποιώντας τα scripts POINTABLE CANVAS, RAY INTERACTABLE και CLIPPED PLANE SURFACE. Στην αρχική σκηνή που αποτελεί και μενού επιλογών ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει την εφαρμογή κατά τη προτίμησή του (ένταση ήχου, κτλ.). Μόλις ο χρήστης πυροδοτήσει το κουμπί εκκίνησης, μεταφέρεται στη δεύτερη σκηνή (χώρος εκπαίδευσης). Τα εργαλεία και τα εξαρτήματα είναι προ-τοποθετημένα, μέσα σε μια κούτα, ο χρήστης πρέπει να μεταφέρει τα αντικείμενα στο πάγκο και να ελέγξει την πληρότητά τους. Σε περίπτωση που ένα ηλεκτρονικό στοιχείο λείπει, ο χρήστης αλληλοεπιδρώντας με τα στοιχεία UI ενός Panel, πρέπει να συμπληρώσει μια φόρμα

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής και να αιτηθεί να του αποσταλεί το αντικείμενο. Το παραπάνω σενάριο ταυτίζεται με δυναμικές τις βιομηχανίας που μελετήσαμε.

Η ρουτίνα συναρμολόγησης υλοποιείται από τους μηχανισμούς grab-drop-snap και την ορθή σύσταση της φυσικής τους μέσα από Rigidbodies, Colliders και τα scripts ISDK_DISTANCEHANDGRABINTERACTION, GRABBABLE, DISTANCE GRAB INTERACTABLE, SNAP INTERACTOR και MOVE TOWARDS PROVIDER. Αν ένα αντικείμενο πέσει έξω από καθορισμένες θέσεις, που εμφανίζονται στις ράγες του ηλεκτρικού πίνακα, επιστρέφει αυτόματα στην αρχική του θέση με καθυστέρηση 1 δευτερολέπτου μέσω του TIME OUT INTERACTABLE. Για να ενισχυθεί η εμπειρία ρεαλισμού και να υποστηριχθεί η μέθοδος μάθησης μέσω πειραματισμού και λαθών (trial-and-error), έχουν ενσωματωθεί οπτικά εφέ μέσω των MATERIAL PROPERTY BLOCK EDITOR, ROUNDED BOX PROPERTIES και INTERACTABLE COLOR VISUAL, που ενημερώνουν τον χρήστη για τις ενεργές θέσεις κουμπώματος. Οι θέσεις τοποθέτησης (λευκοί κύκλοι) πάνω στις ράγες περιλαμβάνουν στοίβες 4 επιπέδων ανά ηλεκτρονικό στοιχείο για να επιτρέπουν αντιστοιχία διαστάσεων μέσω TAG SET και TAG SET FILTER, ενώ ο μηχανισμός MAX INTERACTORS αποτρέπει την τοποθέτηση πολλών αντικειμένων στο ίδιο σημείο. Η ορθή ή εσφαλμένη τοποθέτηση επισημαίνεται με οπτικά σήματα (π.χ. πράσινο ή κόκκινο φως) πάνω από κάθε θέση του ηλεκτρολογικού πίνακα. Η εμπειρία ενισχύεται και με ηχητικά εφέ που ενεργοποιούνται σε κάθε ενέργεια (πίασιμο, άφημα, κουμπώμα) μέσω των scripts AUDIO SOURCE, AUDIO TRIGGER και POINTABLE UNITY EVENT WRAPPER. Η διαδικασία συνεχίζεται με το βίδωμα των ηλεκτρονικών στοιχείων με χρήση κατσαβιδιού και animation. Αμέσως μετά ξεκινά η φάση καλωδίωσης, όπου ο χρήστης χρησιμοποιεί κόπτη, απογυμνωτή και πρέσα καλωδίων για να ετοιμάσει τον απαραίτητο αριθμό καλωδίων φάσης και ουδέτερου. Η προετοιμασία των καλωδίων γίνεται με χρήση colliders και ορθής αλληλεπίδρασης με τα εργαλεία. Κατά την τοποθέτηση καλωδίων, το σύστημα υποδεικνύει τις θέσεις υποδοχής των στοιχείων προς καλωδίωση, ενώ η ρουτίνα καλωδίωσης υλοποιήθηκε με μηχανισμούς παρόμοιους του grab-drop-snap. Η διαδικασία τελειώνει με το κουμπί Screw Cables, το οποίο ενεργοποιεί το animation ασφάλισης τους στις υποδοχές των ηλεκτρονικών στοιχείων. Μετά, απενεργοποιούνται οι αλληλεπιδράσεις για να αποφευχθούν αλλαγές. Ο χρήστης έχει ελευθερία εκτέλεσης των ενεργειών σε οποιαδήποτε σειρά, προσομοιώνοντας με αυτό το τρόπο τις συνθήκες πραγματικού κόσμου. Τέλος, στη σκηνή 3, ο χρήστης συμπληρώνει ένα ερωτηματολόγιο ενώ όλες οι ενέργειες, χρόνοι, σφάλματα, απαντήσεις και πλεονάζουσες πράξεις (π.χ. δημιουργία περιττών καλωδίων) που έχουν καταγραφεί εξάγονται στο αρχείο metrics.txt για ανάλυση.

Το εικονικό περιβάλλον της εφαρμογής στην πλατφόρμα Unity περιέχει μια σειρά αντικειμένων με τα οποία ο χρήστης καλείται να αλληλεπιδράσει στο σενάριο εκπαίδευσης. Για αυτό το σκοπό έγινε συλλογή έτοιμων ελεύθερων τρισδιάστατων μοντέλων των αντικειμένων από τις ιστοσελίδες Sketchfab, Grabcad και 3Dfindit. Για την εισαγωγή των αντικειμένων στο περιβάλλον χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα σε μορφή αρχείων “.blend” της εφαρμογής λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης Blender. Συγκεκριμένα στο εικονικό περιβάλλον περιέχεται ο ηλεκτρολογικός πίνακας με μια σειρά από επιπλέον στοιχεία καθώς και ορισμένα εργαλεία και εξαρτήματα. Τα αντικείμενα φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 15 Υπόμνημα αντικειμένων στο 3D περιβάλλον του σεναρίου συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα

Ηλεκτρολογικά στοιχεία και εξαρτήματα	Εργαλεία	Σκελετός πίνακα
Ασφάλεια, ρελέ, διακόπτης, λαμπτήρας LED, καλώδια, πλαστικά ακροχτιώνια	Κατσαβίδι, αυτορυθμιζόμενη πρέσα, απογυμνωτής καλωδίων	Κουτί

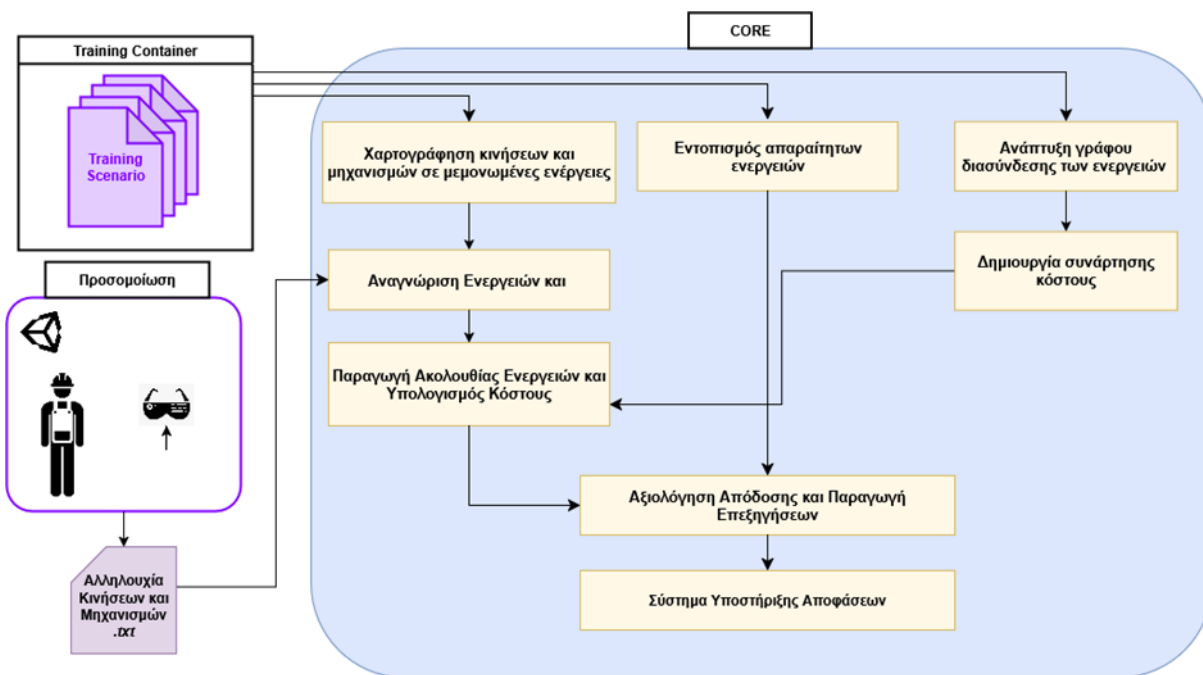
2.14.3.3 Πυρήνας

Το υποσύστημα πυρήνα (core), το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα , λαμβάνει και επεξεργάζεται τα δεδομένα που παράγονται από το περιβάλλον προσομοίωσης. Κάθε φορά που εκτελείται το σενάριο εκπαίδευσης καταγράφεται μέσα από το λογισμικό της Unity μια αλληλουχία γεγονότων, η οποία περιέχει τις κινήσεις του χρήστη και τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης με εργαλεία και άλλα αντικείμενα στο εικονικό περιβάλλον.

Το εικονικό περιβάλλον για το συγκεκριμένο σενάριο περιέχει ορισμένα γνωστά αντικείμενα τα οποία ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει με συγκεκριμένους τρόπους. Ήταν άρα εφικτό να χαρτογραφηθούν

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

οι πιθανές ενέργειες που μπορεί να πραγματοποιήσει ο χρήστης στο εικονικό περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά δεν υπάρχει αντιστοιχία ένα προς ένα των γεγονότων που αναγνωρίζει η Unity με τις χαρτογραφημένες ενέργειες. Για παράδειγμα όταν ο χρήστης τοποθετήσει ένα στοιχείο στον ηλεκτρολογικό πίνακα το λογισμικό καταγράφει δύο γεγονότα. Το πρώτο αντιστοιχεί στην ενέργεια του χρήστη να αφήσει το στοιχείο στον πίνακα και το δεύτερο στο κλείδωμα του στοιχείου στη συγκεκριμένη θέση. Το υποσύστημα πυρήνα έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει τις ενέργειες του χρήστη που μετατρέποντας την αλληλουχία γεγονότων της Unity σε ακολουθία ενεργειών. Το υποσύστημα πυρήνα αξιοποιεί αυτήν την ακολουθία για να αξιολογήσει την απόδοση του εργαζομένου και να παράγει συστάσεις.



Εικόνα 118 Σχηματικό διάγραμμα της δομής του υποσυστήματος πυρήνα

Χαρτογράφηση κινήσεων και μηχανισμών σε μεμονωμένες ενέργειες

Στο εικονικό περιβάλλον ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μετακινήσει τα αντικείμενα και να αλληλεπιδράσει μαζί τους με συγκεκριμένους μηχανισμούς. Υπάρχουν επιπλέον ορισμένοι περιορισμοί και κινήσεις που εκτελούνται αυτόματα από την ίδια την εφαρμογή. Για παράδειγμα στο ξεκίνημα του σεναρίου αφού γίνει συλλογή των ηλεκτρικών στοιχείων, αυτά εμφανίζονται σε μια αρχική θέση στον πάγκο. Ο χρήστης μπορεί να πάρει ένα στοιχείο και να το αφήσει, αλλά αυτό θα “κουμπώσει” μόνο αν αφεθεί κοντά σε μια κενή θέση στις ράγες του πίνακα. Σε αντίθετη περίπτωση, το στοιχείο επιστρέφει αυτόματα στην αρχική του θέση.

Πίνακας 16 Πιθανές ενέργειες στο εικονικό περιβάλλον

	Παίρνω	Αφήνω	Στον πίνακα	Βιδώνω	Τοποθετώ ακροχιτώνιο	Κόβω	Συνδέω	Απογυμνώνω
Ασφάλεια	X	X	X	X				
Λαμπτήρας LED	X	X	X	X				
Διακόπτης	X	X	X	X				
Ρελέ	X	X	X	X				
Καλώδιο φάσης	X	X			X	X	X	X

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Καλώδιο ουδετέρου	X	X	X	X	X	X
Πρέσα	X	X				
Κατσαβίδι	X	X				
Απογυμνωτής	X	X				

Είναι άρα εφικτό να γίνει χαρτογράφηση των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει με τα αντικείμενα. Γενικά κάθε αλληλεπίδραση εμπλέκει ένα, ή δύο αντικείμενα. Στη δεύτερη περίπτωση το πρώτο αντικείμενο είναι ένα ηλεκτρικό στοιχείο ή εξάρτημα και το δεύτερο ένα από τα εργαλεία. Η χαρτογράφηση φαίνεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα. Συνολικά, όπως φαίνεται στον πίνακα υπάρχουν 34 διαφορετικές εφικτές ενέργειες.

Το λογισμικό της Unity έχει τη δυνατότητα να καταγράφει όσα συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς και την τοποθεσία τους. Οι καταγραφές αυτές μπορούν να εξαχθούν σε μορφή αρχείου κειμένου αλλά για τις ενέργειες “παίρνω”, “αφήνω”, “τοποθετώ” και “συνδέω” δεν αντιστοιχούν μία προς μία με τις ενέργειες όπως αποτυπώθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα η Unity αναγνωρίζει τις εξής κατηγορίες συμβάντων:

- Grab: Όταν ένα αντικείμενο “κουμπώνει” (snap) κάπου. Συγκεκριμένα εμφανίζεται όταν ο χρήστης παίρνει ένα αντικείμενο στο χέρι του, όταν κουμπώνει σε μία επιτρεπτή θέση π.χ. στον πίνακα και όταν κουμπώνει στην αρχική θέση αφού έχει αφεθεί από το χρήστη.
- Drop: Όταν ένα αντικείμενο αφήνεται κάπου. Ακολουθείται πάντα από Grab, αφού το αντικείμενο κουμπώνει είτε (α) στον πίνακα αν αφέθηκε εκεί, (β) ξανά στο χέρι του χρήστη αν αυτός το ξαναπιάσει αμέσως και (γ) στην αρχική του θέση αν ο χρήστης δεν το έχει ξαναπιάσει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Όταν ο χρήστης απογυμνώνει ένα καλώδιο εμφανίζεται στο εικονικό περιβάλλον ένα animation. Ο απογυμνωτής δεν είναι πλέον στο χέρι του χρήστη αλλά το περιβάλλον δεν το θεωρεί συμβάν τύπου drop. Αν ο χρήστης δεν πιάσει αμέσως ξανά τον απογυμνωτή αυτός επιστρέφει και κουμπώνει στην αρχική του θέση. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η διαδικασία αποκωδικοποίησης των συμβάντων Grab, Drop σε ενέργειες. Για τις υπόλοιπες ενέργειες υπάρχει μία προς μία αντιστοιχία με τα συμβάντα στο αρχείο κειμένου.

Πίνακας 17 Αποκωδικοποίηση συμβάντων τύπου Grab ή drop σε ενέργειες στο εικονικό περιβάλλον

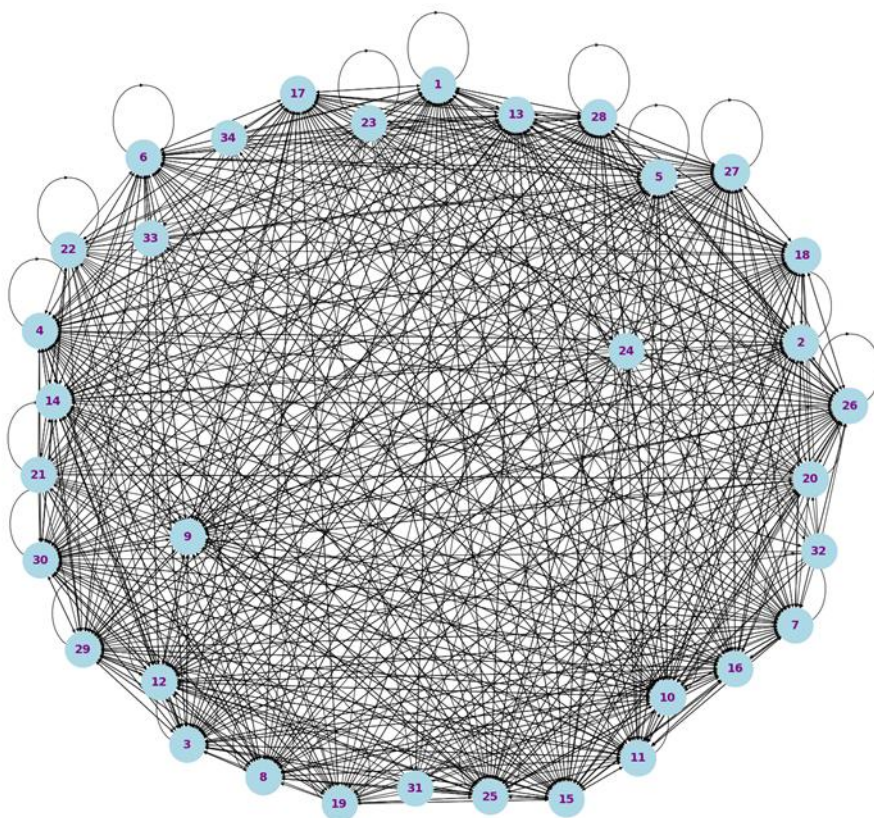
Τοποθεσία τελευταίας ενέργειας/ Αλληλουχία Συμβάντων	Αρχική θέση	Πίνακας	Άλλού
Grab	Παίρνω	-	Καμία Ενέργεια (Αλλαγή χεριού)
Drop-Grab	Αφήνω	Τοποθετώ (για στοιχεία) ή συνδέω (για καλώδια)	Αφήνω και Παίρνω
Grab (για απογυμνωτή μετά από απογύμνωση καλωδίου)	Αφήνω	-	Καμία ενέργεια

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως είναι εφικτό να παραχθεί η ακολουθία ενεργειών του χρήστη κάθε φορά που εκτελείται το σενάριο εκπαίδευσης. Χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση κόστους, της οποίας η δημιουργία περιγράφεται παρακάτω, παράγεται το συνολικό κόστος της ακολουθίας ως άθροισμα του κόστους των επιμέρους ενεργειών.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Για την αξιολόγηση των χρηστών της εφαρμογής γίνεται σύγκριση των ενεργειών τους με την ακολουθία ενεργειών που είναι απαραίτητες για να υλοποιηθεί το σενάριο εκπαίδευσης σωστά και χωρίς παραλήψεις. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του σεναρίου εκπαίδευσης με ειδικούς και καταγράφηκαν οι ενέργειές τους χρησιμοποιώντας τη διαδικασία αναγνώρισης που περιγράφηκε προηγουμένως. Λαμβάνοντας υπ' όψη τις καταγεγραμμένες ενέργειες των ειδικών καταγράφηκε μια βέλτιστη ακολουθία, η οποία περιέχει μόνο τις απαραίτητες ενέργειες.

Για την αναφορά του συστήματος, την κατανόηση, αλλά και την επεξήγηση, ως προς την αποτελεσματικότητα και την απόδοση του χρήστη κατά την εκπαίδευση, δημιουργήσαμε ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης, και συγκεκριμένα ένα γράφημα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Σε αυτόν περιλαμβάνονται το σύνολο των κινήσεων που μπορούν να εκτελεστούν κατά το σενάριο εκπαίδευσης, αποτελείται από 34 ενέργειες — όπως αποτυπώνονται στην εικόνα, και είναι για παράδειγμα: τα παίρνω/αφήνω διακόπτη, τα αφήνω/τοποθετώ led, το βιδώνω την ασφάλεια με κατσαβίδι κ.α. Επίσης, το γράφημα υποδεικνύει την δυνατότητα μετάβασης από τη μία ενέργεια σε μία άλλη. Τα βέλη δείχνουν δηλαδή από κάθε ενέργεια που βρίσκεται ο χρήστης σε ποιες από τις άλλες μπορεί να βρεθεί, ως επόμενο βήμα. Οι ενέργειες αυτές αναγνωρίζονται αυτόματα από το σύστημα όπως αναλύθηκε παραπάνω, αποκωδικοποιώντας τα αρχεία μετακίνησης και τοποθέτησης αντικείμενων από το περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας.



1. Παίρνω/Διακόπτη
2. Αφήνω/Διακόπτη
3. Τοποθετώ/Διακόπτη
4. Παίρνω/Ρελέ
5. Αφήνω/Ρελέ
6. Τοποθετώ/Ρελέ
7. Παίρνω/Ασφάλεια
8. Αφήνω/Ασφάλεια
9. Τοποθετώ/Ασφάλεια
10. Παίρνω/Led
11. Αφήνω/Led
12. Τοποθετώ/Led
13. Παίρνω/Πρέσα
14. Αφήνω/Πρέσα
15. Παίρνω/Απογυμνωτή
16. Αφήνω/Απογυμνωτή
17. Παίρνω/Κατσαβίδι
18. Αφήνω/Κατσαβίδι
19. Κόβω/Ουδέτερο/Απογυμνωτή
20. Κόβω/Φάση/Απογυμνωτή
21. Strip/Φάση/Απογυμνωτή
22. Strip/Ουδέτερο/Απογυμνωτή
23. Τοποθετώ Ακροχτυτώνιο/Φάση/Πρέσα
24. Τοποθετώ Ακροχτυτώνιο/Ουδέτερο/Πρέσα
25. Παίρνω/Καλώδιο Φάσης
26. Αφήνω/Καλώδιο Φάσης
27. Συνδέω/Καλώδιο Φάσης
28. Παίρνω/Καλώδιο Ουδέτερου
29. Αφήνω/Καλώδιο Ουδέτερου
30. Συνδέω/Καλώδιο Ουδέτερου
31. Βιδώνω/Διακόπτη/Κατσαβίδι
32. Βιδώνω/Ρελέ/Κατσαβίδι
33. Βιδώνω/Ασφάλεια/Κατσαβίδι
34. Βιδώνω/Led/Κατσαβίδι

Εικόνα 119 Γράφος των ενεργειών

Στη συνέχεια, για την ανάλυση της απόδοσης του χρήστη ορίστηκε για κάθε ένα βήμα ένα κόστος, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Οι απλές ενέργειες έχουν χαμηλό βάρος (ελάχιστο = 0,5), ενώ αυτές με μεγαλύτερο αντίκτυπο έχουν υψηλότερο (μέγιστο = 2,5).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Πίνακας 18 Τα κόστη των ενεργειών

Ενέργεια	Κόστος	Ενέργεια	Κόστος	Ενέργεια	Κόστος
Παίρνω/Διακόπτη	0.5	Παίρνω/Πρέσα	0.5	Παίρνω/Καλώδιο Φάσης	0.5
Αφήνω/Διακόπτη	0.5	Αφήνω/Πρέσα	0.5	Αφήνω/Καλώδιο Φάσης	0.5
Τοποθετώ/Διακόπτη	1	Παίρνω/Απογυμνωτή	0.5	Συνδέω/Καλώδιο Φάσης	1.5
Παίρνω/Ρελέ	0.5	Αφήνω/Απογυμνωτή	0.5	Παίρνω/Καλώδιο Ουδέτερου	0.5
Αφήνω/Ρελέ	0.5	Παίρνω/Κατσαβίδι	0.5	Αφήνω/Καλώδιο Ουδέτερου	0.5
Τοποθετώ/Ρελέ	1	Αφήνω/Κατσαβίδι	0.5	Συνδέω/Καλώδιο Ουδέτερου	1.5
Παίρνω/Ασφάλεια	0.5	Κόβω/Ουδέτερο/Απογυμνωτή	1	Βιδώνω/Διακόπτη/Κατσαβίδι	1.5
Αφήνω/Ασφάλεια	0.5	Κόβω/Φάση/Απογυμνωτή	1	Βιδώνω/Ρελέ/Κατσαβίδι	1.5
Τοποθετώ/Ασφάλεια	1	Strip/Φάση/Απογυμνωτή	2	Βιδώνω/Ασφάλεια/Κατσαβίδι	1.5
Παίρνω/Led	0.5	Strip/Ουδέτερο/Απογυμνωτή	2	Βιδώνω/Led/Κατσαβίδι	1.5
Αφήνω/Led	0.5	Τοποθετώ	2		
Τοποθετώ/Led	1	Ακροχυτώνιο/Φάση/Πρέσα	2		
		Τοποθετώ	2		
		Ακροχυτώνιο/Ουδέτερο/Πρέσα	2		

Τέλος, για κάθε εκπαιδευόμενο δημιουργείται, μέσα από το γράφημα, το μονοπάτι που ακολούθησε, μέχρις ότου να ολοκληρώσει το σενάριο εκπαίδευσης. Σε κάθε επιπλέον κόμβο που βρίσκεται ο χρήστης, προστίθεται και το επιπλέον κόστος μετάβασης.

Για την ακολουθία που προκύπτει από κάθε εκπαίδευση δημιουργείται και το αντίστοιχο μονοπάτι στο γράφημα το οποίο συνάρτησή του χρόνου υλοποίησης, αλλά και των κοστών σε κάθε ενέργεια, υπολογίζεται το τελικό σκορ. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζουμε το άθροισμα των κοστών κάθε ενέργειας του εκπαιδευόμενου $C_{tra} = \sum_{i=1}^n w(a_i)$, όπου $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ το σύνολο των ενεργειών που υλοποιήθηκαν από τον χρήστη και το αντίστοιχο κόστος. Το τελικό σκορ προκύπτει από την ακόλουθη συνάρτηση:

$$S_{final} = 100 \cdot \left(\alpha \cdot \frac{C_{opt}}{C_{tra}} + \beta \cdot \frac{T_{opt}}{T_{tra}} \right) \quad (1),$$

όπου C_{opt} το συνολικό κόστος της βέλτιστης διαδρομής, T_{opt} ο χρόνος τη βέλτιστης διαδρομής, και T_{tra} ο χρόνος του εκπαιδευόμενου, σε δευτερόλεπτα. Οι παράγοντες α και β έχουν οριστεί 0,7 και 0,3, αντίστοιχα, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στο κόστος των ενεργειών και μικρότερο σε αυτό του χρόνου. Το τελικό σκορ προκύπτει με αναγωγή στο 100, και στην περίπτωση που ο χρήστης ολοκληρώσει με επιτυχία την εκπαίδευση με ίδιες μετρήσεις με την βέλτιστη διαδρομή θα έχει μέτρηση 100%. Αντίθετα, αν κάνει τις διπλάσιες κινήσεις, σε διπλάσιο χρόνο, θα έχει 50%.

Οι βέλτιστες μετρήσεις δεν έχουν οριστεί συγκεκριμένα, αλλά η καλύτερη απόδοση μεταξύ των εκπαιδευόμενων ορίζει αυτές τις τιμές. Συγκεκριμένα, κάθε φορά που θα προκύπτει επιτυχημένη εκπαίδευση με $C_{tra} < C_{opt}$ ή/και $T_{tra} < T_{opt}$, η τελική μέτρηση θα ξεπερνάει το 100 υποδεικνύοντας την υψηλή απόδοση του εργαζομένου. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση οι βέλτιστες τιμές ανανεώνονται $C_{tra} := C_{opt}$ και $T_{tra} := T_{opt}$

Η μετρική αυτή χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του χρήστη και συγκρίνεται με παλαιότερες μετρήσεις του ίδιου, διατηρώντας έτσι ένα ιστορικό της εξέλιξης (η μη) του εκπαιδευόμενου. Τέλος, γνωρίζοντας, μέσα από το γράφημα, το σύνολο των επιμέρους ενεργειών καθώς και το πόσες φορές

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

εκτελέστηκαν από τον χρήστη κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, δίνεται επιπλέον και αναλυτικότερη ερμηνεία, και εξήγηση, ως προς την απόδοση του χρήστη, για κάθε μία από τις κατηγορίες ενεργειών, όπως περιγράφεται στο παρακάτω κεφάλαιο.

Με στόχο τη διευκόλυνση της λήψης αποφάσεων από τα στελέχη, μετά την ολοκλήρωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας για κάθε εργαζόμενο παράγεται αναλυτική αναφορά αξιολόγησης της απόδοσής του. Για να καταστεί η αναφορά πιο αποδοτική, ευανάγνωστη και κατάλληλη για συγκρίσεις μεταξύ εκπαιδευομένων, ενσωματώνεται διάγραμμα αστέρα (radar chart) το οποίο απεικονίζει την ποσοστιαία απόδοση του εκπαιδευομένου σε κάθε επιμέρους τομέα της εκπαίδευσης. Τα ποσοστά απόδοσης υπολογίζονται με βάση την επιτυχία εκτέλεσης των επιμέρους διαδικασιών, καθώς και τον αριθμό επαναλήψεων που απαιτήθηκαν από τον εκπαιδευόμενο για την ορθή ολοκλήρωση κάθε κίνησης ή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τα ποσοστά επιτυχίας της στα καθήκοντα:

- Παραλαβή καλωδίων/αντικειμένων (Get Cables/Items)
- Τοποθέτηση καλωδίων/αντικειμένων (Leave Cables/Items)
- Τοποθέτηση αντικειμένων στη θέση τους (Place Items)
- Βίδωμα εξαρτημάτων (Screw Items)
- Κοπή καλωδίων (Cut Cables)
- Αφαίρεση μόνωσης (Strip Cables)
- Σύνδεση καλωδίων (Connect Cables)

Επιπλέον, παράγεται συνοδευτικό κείμενο μέσω Μεγάλου Γλωσσικού Μοντέλου (Large Language Model – LLM), το οποίο, με βάση το συνολικό ποσοστό απόδοσης του εκπαιδευομένου, αξιολογεί την ανάγκη για επανεκπαίδευση ή περαιτέρω πρακτική. Συγκεκριμένα:

- Ποσοστό άνω του 90%: Αναφέρεται ότι ο εργαζόμενος ολοκλήρωσε με επιτυχία τη διαδικασία εκπαίδευσης.
- Ποσοστό μεταξύ 80% και 89%: Η απόδοση κρίνεται ικανοποιητική, με δυνατότητα βελτίωσης σε ορισμένους τομείς. Προτείνεται επιπλέον πρακτική για ενίσχυση δεξιοτήτων.
- Ποσοστό κάτω του 80%: Επισημαίνεται η ανάγκη επανεκπαίδευσης και ενδεχομένως η περαιτέρω εξοικείωση και με το εργαλείο εκπαίδευσης.



Εικόνα 120 Διάγραμμα αστέρα για την ποσοστιαία απόδοση του εκπαιδευομένου στις επιμέρους ενέργειες



Name
Surname



The Final Score is: 82.38%
This radar chart shows the employee's performance in various training activities. The scores represent the level of proficiency in each activity. Higher values indicate better performance in the respective area.
Performance Breakdown:
- 'Get Cables/Items': 56.52%
- 'Leave Cables/Items': 63.33%
- 'Place Items': 83.33%
- 'Screw Items': 100.0%
- 'Cut Cables': 80.0%
- 'Strip Cables': 80.0%
- 'Connect Cables': 80.0%
The performance shows some progress. It is encouraged for the employee to revisit certain areas and practice more before the final assessment to enhance understanding and skills.

Εικόνα 121 Παράδειγμα παραγόμενου αρχείου pdf για την συνολική απόδοση του εκπαιδευομένου και του αντίστοιχου κειμένου-σχολιασμού

2.14.3.4 Μηχανισμός ερωτήσεων-απαντήσεων

Με στόχο τη συστηματική αποτίμηση της εμπειρίας των εργαζομένων μετά την ολοκλήρωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας στο εικονικό περιβάλλον, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας μηχανισμός

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής ερωτοαπαντήσεων. Η ανάπτυξη του μηχανισμού ακολούθησε μια πολυεπίπεδη μεθοδολογική προσέγγιση, η οποία διαρθρώθηκε σε επιμέρους στάδια.

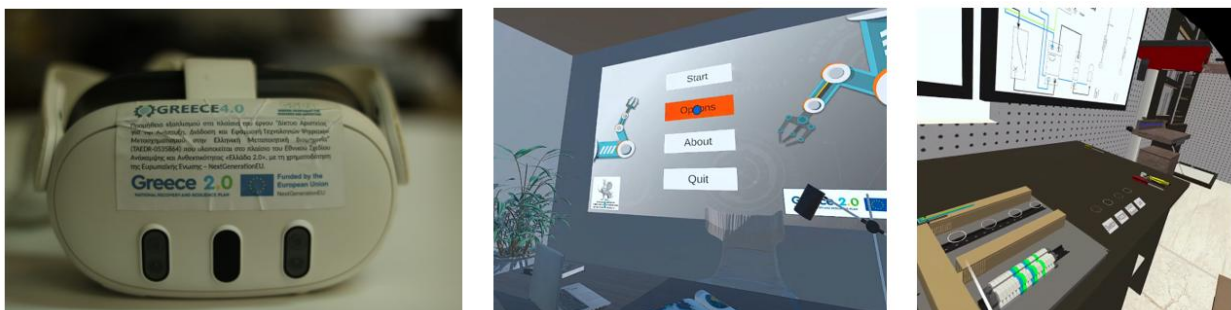
Καταρχάς, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό τον εντοπισμό των βασικών παραγόντων που σχετίζονται με την εμπειρία του χρήστη σε τεχνολογικά περιβάλλοντα εκπαίδευσης. Από την ανασκόπηση αυτή αναδείχθηκαν έξι βασικοί παράγοντες:

- Ικανοποίηση από τη συνολική εμπειρία (satisfaction),
- Ευκολία χρήσης (ease of use),
- Αίσθηση απόλαυσης κατά την αλληλεπίδραση (enjoyment),
- Εμβύθιση (immersion),
- Εσωτερικό κίνητρο συμμετοχής (intrinsic motivation),
- Αντιλαμβανόμενη χρηστικότητα της εφαρμογής (usefulness).

Για την ποσοτική αποτίμηση των παραπάνω παραμέτρων συγκροτήθηκε ένα δομημένο ερωτηματολόγιο. Κάθε παράγοντας εκπροσωπήθηκε από σύνολο στοχευμένων ερωτήσεων, οι οποίες διαμορφώθηκαν με βάση πρότυπα ερωτηματολόγια του πεδίου. Οι ερωτήσεις αξιολογούνται από τους συμμετέχοντες μέσω πενταβάθμιας κλίμακας τύπου Likert (1 = Διαφωνώ απόλυτα έως 5 = Συμφωνώ απόλυτα).

Η υλοποίηση του μηχανισμού βασίστηκε στη χρήση ενός γλωσσικού μοντέλου το οποίο αναλαμβάνει την παρουσίαση των ερωτήσεων στον εκάστοτε χρήστη με τυχαία σειρά, διασφαλίζοντας την αποφυγή προκατάληψης κατά την απάντηση. Η διαδραστική αυτή διαδικασία επιτρέπει τη συλλογή εξατομικευμένων απαντήσεων σε πραγματικό χρόνο. Οι απαντήσεις των χρηστών καταγράφονται και ταυτόχρονα διοχετεύονται σε έναν ειδικά διαμορφωμένο αλγόριθμο ανάλυσης συναισθήματος. Ο αλγόριθμος αυτός έχει παρουσιαστεί αναλυτικά σε προηγούμενο παραδοτέο και αποτελεί βασικό στοιχείο για τη συσχέτιση της γνωστικής και συναισθηματικής εμπειρίας των εκπαιδευόμενων. Ο μηχανισμός των ερωτοαπαντήσεων λειτουργεί ως κρίσιμο εργαλείο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας του εκπαιδευτικού περιβάλλοντος, συμβάλλοντας στην τεκμηριωμένη βελτίωση τόσο του περιεχομένου όσο και της διεπαφής χρήστη.

2.14.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

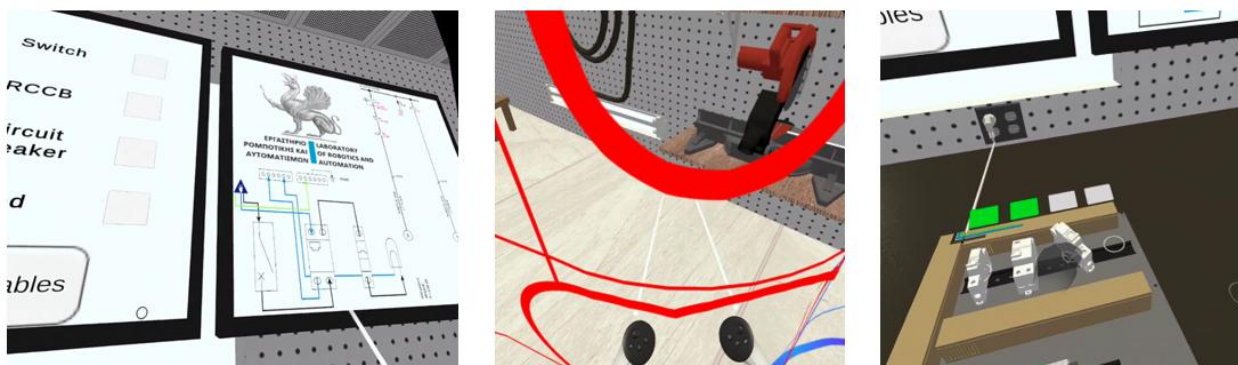


Εικόνα 122 (Α) VR Head Mounted Display (HMD), (Β) Εισαγωγική σκηνή ρυθμίσεων, (Γ) Σκηνή εκπαίδευσης και εικονικό περιβάλλον

Εικόνα 2: (Α) VR Head Mounted Display (HMD), (Β) Εισαγωγική σκηνή ρυθμίσεων, (Γ) Σκηνή εκπαίδευσης και εικονικό περιβάλλον

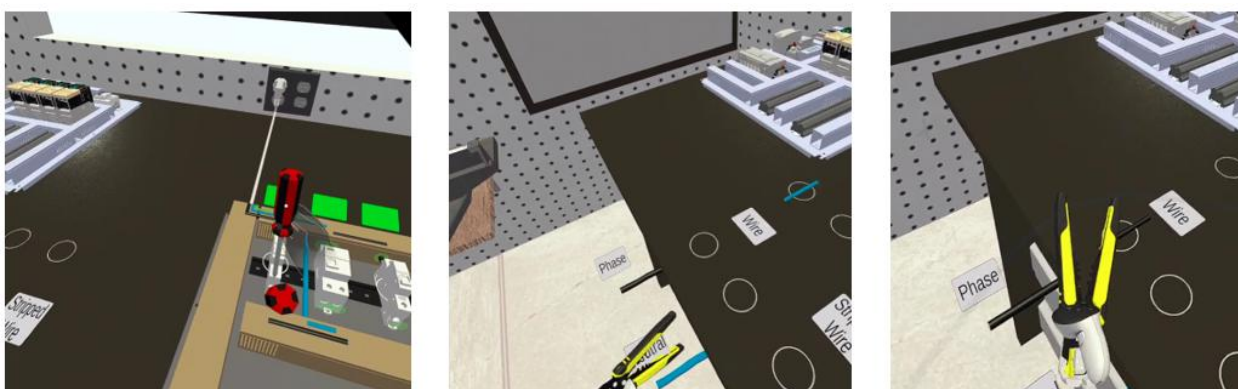
Η εκπαιδευτική προσομοίωση εικονικής πραγματικότητας αποτελείται από τρεις διακριτές σκηνές (Εικόνα 122B, Εικόνα 122Γ-6B, 6Γ). Στην πρώτη σκηνή (Εικόνα 122B), οι χρήστες ρυθμίζουν τις προτιμήσεις τους και εξοικειώνονται με τους βασικούς μηχανισμούς της εικονικής πραγματικότητας. Παράλληλα, κατά τη χρήση της εφαρμογής με τον απαραίτητο εξοπλισμό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα είτε να παραμείνει στατικός είτε να κινηθεί εντός μιας προκαθορισμένης, ασφαλούς ζώνης στον πραγματικό χώρο. Και στις δύο περιπτώσεις ενεργοποιείται ο μηχανισμός pass-through με τη μόνη διαφορά αυτής του μέγιστου ορίου ασφαλούς ζώνης. Παρόλο που τα γυαλιά εικονικής πραγματικότητας δεν

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής αναγνωρίζουν φυσικά αντικείμενα του πραγματικού περιβάλλοντος, όταν ο χρήστης υπερβεί τα όρια της οριοθετημένης περιοχής, ο μηχανισμός ενεργοποιείται αυτόματα. Με την ενεργοποίηση του μηχανισμού προβάλλεται στον χρήστη η εικόνα του πραγματικού κόσμου, εξασφαλίζοντας την ασφάλειά του και αποτρέποντας πιθανούς τραυματισμούς (Εικόνα 3B). Με την επιστροφή του χρήστη στην οριοθετημένη ζώνη η προβολή εικόνας επιστρέφει στην εφαρμογή.



Εικόνα 3: (Α) Μονογραμμικό ηλεκτρολογικό σχηματικό και σχηματικό καλωδίωσης (Β) Pass-through view μηχανισμός (Γ) Τοποθέτηση ηλεκτρολογικών στοιχείων στο πίνακα

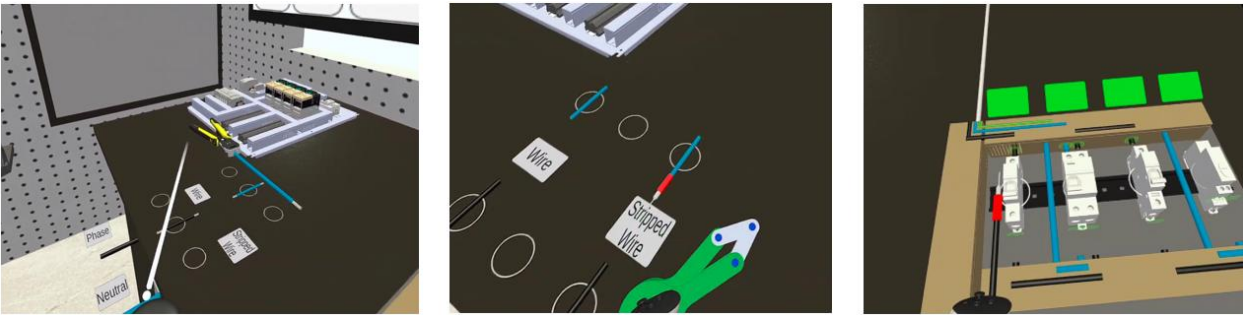
Στη δεύτερη σκηνή (Εικόνες 2Γ-6B), πραγματοποιείται η κύρια φάση εκπαίδευσης, όπου οι χρήστες κατασκευάζουν έναν ηλεκτρικό πίνακα ακολουθώντας ηλεκτρολογικά σχηματικά σχέδια (Εικόνα 3Α). Με τη χρήση των κατάλληλων 3D εργαλείων και εξαρτημάτων και εκτελώντας ενέργειες όπως πιάσιμο (Εικόνα 3Γ), κούμπωμα (Εικόνα 4Α) και ακολουθώντας διάφορες αλληλουχίες, πρέπει να κατασκευάσουν τον ηλεκτρονικό πίνακα με τα ηλεκτρονικά στοιχεία ασφαλισμένα στις ράγες του. Η διαδικασία συνοδεύεται από οπτική και ηχητική ανατροφοδότηση, ενώ παρέχεται η δυνατότητα δοκιμής και επανάληψης, ενισχύοντας τη μάθηση μέσω πειραματισμού και λαθών.



Εικόνα 4: (Α) Ασφάλιση ηλεκτρονικών στοιχείων στη βάση του πίνακα (Β) Κόψιμο καλωδίου με μόνωση (Γ) Απογύμνωση καλωδίου

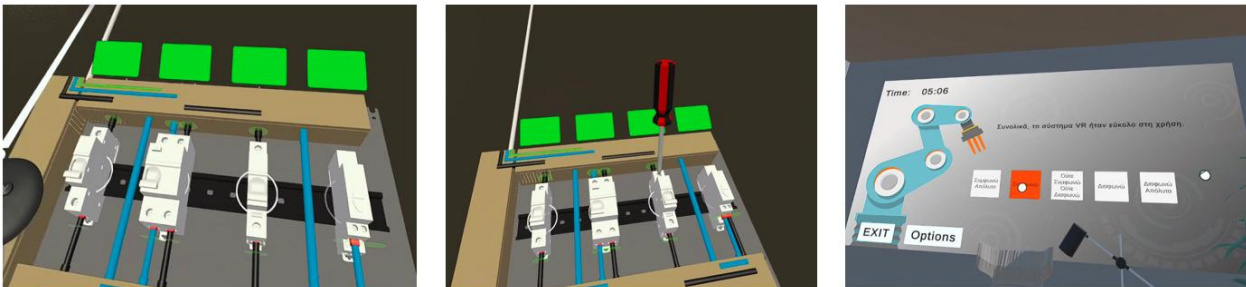
Αφού τα ηλεκτρονικά στοιχεία έχουν τοποθετηθεί, ο χρήστης ξεκινά την διαδικασία καλωδίωσης των στοιχείων. Αρχικά, κόβει ένα μονωμένο καλώδιο από το ρολό με τη χρήση του κόφτη. Στη συνέχεια, χρησιμοποιεί το εργαλείο απογύμνωσης για να αφαιρέσει τη μόνωση από τα άκρα του καλωδίου. Τέλος, περνάει τους ακροδέκτες στις απογυμνωμένες άκρες του καλωδίου και τις πρεσάρει για να τις ασφαλίσει. Το καλώδιο είναι πλέον έτοιμο για σύνδεση στις υποδοχές των μονάδων του πίνακα. Ο χρήστης πρέπει να συμβουλευτεί το ηλεκτρολογικό σχέδιο για να καθορίσει τον αριθμό φασικών (μαύρων) και ουδέτερων (μπλε) καλωδίων. Κατά τη διαδικασία παρέχεται οπτική ανατροφοδότηση μέσω animations. Αυτά βοηθούν στην κατανόηση των βημάτων όπως εκτελούνται στην πραγματικότητα (Εικόνες 4B,4Γ,5A,5B).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 5: (Α) Animation απογύμνωσης των άκρων των καλωδίου (Β) Ενθυλάκωση και πρεσάρισμα ακροδεκτών καλωδίου (Γ) Καλωδίωση πίνακα

Αφού τοποθετηθούν οι μονάδες στον πίνακα, εμφανίζεται ένα παζλ που επισημαίνει τα ελλείποντα καλώδια. Με βάση το σχηματικό διάγραμμα και την οπτική ανατροφοδότηση, ο χρήστης πρέπει να πραγματοποιήσει τη σωστή καλωδίωση. Η διαδικασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση των καλωδίων σε ενδείξεις σύνδεσης, οι οποίες αλλάζουν χρώμα από πράσινο σε κίτρινο. Όταν ολοκληρωθεί η καλωδίωση, οι αλληλεπιδράσεις με καλώδια απενεργοποιούνται. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα επαναφοράς για επανάληψη της διαδικασίας, ενισχύοντας την εκπαίδευση μέσω δοκιμής και σφάλματος.



Εικόνα 6: (Α) Ολοκλήρωση ηλεκτρολογικού πίνακα (Β) Ασφάλιση καλωδίων στις υποδοχές των ηλεκτρονικών στοιχείων (Γ) Σκηνή ερωτηματολογίου

Στην τρίτη και τελευταία σκηνή, της εφαρμογής και αφού η εκπαίδευση του χρήστη έχει ολοκληρωθεί (Εικόνα 6B), καλείται να απαντήσει ένα σύντομο ερωτηματολόγιο (Εικόνα 6Γ), αξιολογώντας την εμπειρία του και παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για ποιοτική ανάλυση. Τέλος, διατίθεται demo της υπάρχουσας λύσης, το οποίο είναι διαθέσιμο με τη μορφή βίντεο στον παρακάτω σύνδεσμο(<https://youtu.be/-xdzBHiTbxM>)

2.15 Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες

2.15.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες αποτελεί μια καινοτόμο λύση που αξιοποιεί ρομποτική τεχνολογία, υπολογιστική όραση και έξυπνους αλγορίθμους για την αυτόματη, ακριβή και αποδοτική παρακολούθηση αποθεμάτων σε βιομηχανικά και εμπορικά περιβάλλοντα. Η λύση στοχεύει στη μείωση του ανθρώπινου λάθους, την επιτάχυνση των διαδικασιών ελέγχου και την ενίσχυση της διαφάνειας και της απόδοσης στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η υλοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια:

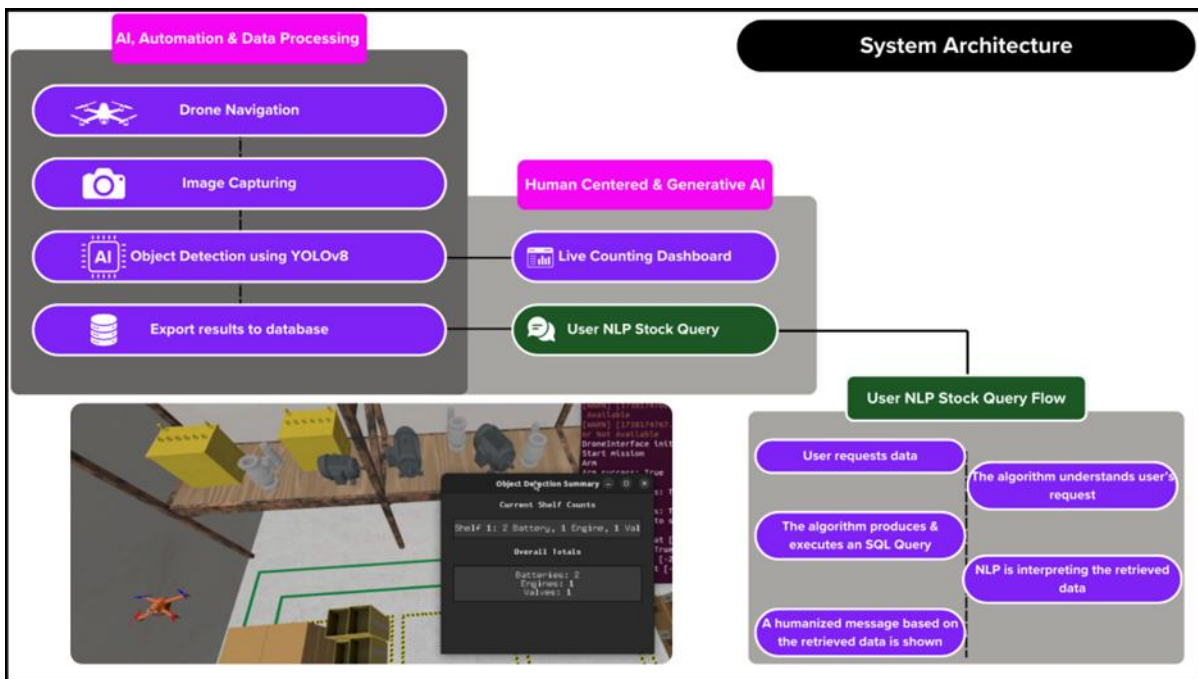
- **Δημιουργία εικονικού περιβάλλοντος αποθήκης:** Ανάπτυξη προσομοιωμένου 3D περιβάλλοντος που αναπαριστά ρεαλιστικά τις συνθήκες και τη δομή μιας αποθήκης για σκοπούς σχεδιασμού, εκπαίδευσης και δοκιμών.
- **Δημιουργία 3D μοντέλων βιομηχανικού εξοπλισμού προς αναγνώριση:** Κατασκευή λεπτομερών τρισδιάστατων μοντέλων των ραφιών, παλετών, μηχανημάτων και άλλου εξοπλισμού ώστε να υποστηρίζεται η οπτική αναγνώριση και πλοήγηση.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Ενσωμάτωση ρομποτικού συστήματος (φορητής μονάδας): Επιλογή και ενσωμάτωση ρομποτικής πλατφόρμας (π.χ. κινητό ρομπότ ή drone) που φέρει τους απαραίτητους αισθητήρες και υπολογιστική ισχύ για αποθήκες διαφόρων διαστάσεων.
- Ανάπτυξη μεθόδου πλοήγησης του συστήματος: Σχεδίαση και υλοποίηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης (π.χ. SLAM, path planning) για ασφαλή και αποδοτική μετακίνηση εντός του αποθηκευτικού χώρου.
- Ανάπτυξη συστήματος οπτικής αναγνώρισης αντικειμένων: Χρήση τεχνολογιών υπολογιστικής όρασης (π.χ. deep learning, YOLO, OpenCV) για την αναγνώριση προϊόντων και εξοπλισμού.
- Ανάπτυξη συστήματος καταμέτρησης αποθεμάτων: Σχεδίαση αλγορίθμων που βασίζονται στα δεδομένα της οπτικής αναγνώρισης για την αυτόματη καταμέτρηση αντικειμένων και την ενημέρωση αποθέματος.
- Ενσωμάτωση έξυπνων αλγορίθμων αλληλεπίδρασης με το σύστημα: Ανάπτυξη αλγορίθμων φυσικής γλώσσας και επικοινωνίας για την υποστήριξη φιλικής και αποδοτικής αλληλεπίδρασης με τον χρήστη.
- Σχεδίαση και υλοποίηση διεπαφής χρήστη (UI/UX): Δημιουργία εργονομικού και φιλικού περιβάλλοντος διεπαφής για την παρακολούθηση της πλατφόρμας, προβολή αποτελεσμάτων καταμέτρησης και διαχείριση λειτουργιών.
- Ανάπτυξη συστήματος διαρκούς καταγραφής αποθέματος: Δημιουργήθηκε με την χρήση βάσης δεδομένων (MariaDB) σύστημα σε μορφή διαδραστικού πάνελ καταγραφής των αποθεμάτων, το οποίο βασίζεται σε μία προσαρμοσμένη πρότυπη πλατφόρμα με την χρήση γλώσσα σήμανσης HTML, και με την γλώσσα προγραμματισμού PHP ώστε να αντλούνται τα δεδομένα.

Αυτό το διάστημα ολοκληρώθηκε η ενσωμάτωση έξυπνων αλγορίθμων φυσικής γλώσσας χάρη στους οποίους δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να αξιοποιήσει δυνατότητες σημασιολογικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων της καταγραφής. Πραγματοποιείται, η προετοιμασία για την μεταφορά των αλγορίθμων σε φυσικό πρωτότυπο.

2.15.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης



Εικόνα 123 Γενική αρχιτεκτονική λύσης

Παραπάνω στην Εικόνα 123, παρουσιάζεται η τελική έκδοση της αρχιτεκτονικής, η οποία τροποποιήθηκε για την περαιτέρω βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος. Έχει προστεθεί ο κλάδος των αλγορίθμων

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής φυσικής γλώσσας, και ο κλάδος που αφορά την προβολή των ιστορικών δεδομένων καταμέτρησης των αποθεμάτων. Η Αρχιτεκτονική διαμορφώνεται ως εξής:

Διαμορφώθηκε ένα περιβάλλον το οποίο προσομοιάζει ένα αντίγραφο μίας αποθήκης, όπου χρησιμοποιείται μία κινητή πλατφόρμα (Quadcopter Drone) μέσα στο περιβάλλον προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στην καταμέτρηση.

Environment (Περιβάλλον)

Το σύστημα χρησιμοποιεί αρχεία URDF έτσι ώστε να ενσωματωθεί το Drone μες στο περιβάλλον προσομοίωσης. Το περιβάλλον της προσομοίωσης πρόκειται για μία προσαρμοσμένη έκδοση του AWS RoboMaker's Small Warehouse, το οποίο στη συνέχεια μορφοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Blender. Η αλλαγή αφορούσε την προσαρμογή της αρχικής έκδοσης στο σενάριο της ηλεκτρομηχανολογικής αποθήκης, το οποίο πραγματεύεται η λύση.

Simulation (Προσομοίωση)

Η προσομοίωση γίνεται στο λογισμικό Gazebo, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για αντίστοιχες εφαρμογές, διαχειρίζεται δεδομένα από το Drone όπως μετρήσεις αισθητήρων, την δυναμική και την κινηματική του Drone. Ο έλεγχος του Drone γίνεται από το State Machine μέσω του ROS, όπου ένα προδιαγεγραμμένο μοντέλο καταστάσεων καθοδηγούν την συμπεριφορά και τις δράσεις του Drone (μετακίνηση, καταμέτρηση αποθέματος, επιστροφή στον σταθμό κ.α.)

Navigation (πλοήγηση)

Η πλοήγηση γίνεται με την χρήση προδιαγεγραμμένων διαδρομών, χάρη στις οποίες το Drone πλοηγείται μπροστά από τα αποθέματα ώστε να γίνει η καταμέτρησή τους. Με την χρήση LIDAR λαμβάνεται υπόψιν η δυναμική αποφυγή εμποδίων και η πλοήγηση σε δυναμικό περιβάλλον γενικότερα.

Stock Counting (καταμέτρηση αποθέματος)

Ένα από τα σημαντικότερα μέρη της λύσης είναι η καταμέτρηση αποθέματος. Προς το παρόν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος YOLO v8, όπου έχει εκπαιδευτεί για τον εντοπισμό διαφορετικών ηλεκτρομηχανολογικών εξαρτημάτων (π.χ. Μπαταρίες, μπλοκ κινητήρα, ηλεκτρική μηχανή κ.α.).

User NLP Query Flow (Διάδραση μέσω φυσικής γλώσσας)

Χάρη σε έξυπνους αλγορίθμους, τα προϊόντα τα οποία καταμετρώνται αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων, στη συνέχεια ο χειριστής του συστήματος, έχει την δυνατότητα να θέσει ερωτήματα σε φυσική γλώσσα, τα ερωτήματα αυτά μετατρέπονται σε ερωτήματα τύπου SQL, και τα αποτελέσματα τα οποία απορρέουν από το ερώτημα, μετατρέπονται σε φυσική γλώσσα πίσω. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα σημασιολογικής επεξήγησης των αποθεμάτων και επιτρέπει σε έναν μη τεχνικά έμπειρο χρήστη να ενημερωθεί άμεσα για τα αποθέματα με τρόπο φιλικό προς αυτόν.

2.15.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Αναφορικά με την παραπάνω υλοποίηση σε επίπεδο συστήματος, παρακάτω αναλύονται αναλυτικά τα βήματα που οδηγούν στον σχεδιασμό της παρούσας ενδιάμεσης αρχιτεκτονικής της λύσης.

Environment (περιβάλλον) και Simulation (προσομοίωση): Η λύση βασίζεται τεχνικά στο ROS το οποίο έχει εγκατασταθεί στο λειτουργικό σύστημα Ubuntu 22.04, στο ίδιο λειτουργικό σύστημα είναι εγκατεστημένο και το περιβάλλον της προσομοίωσης (Gazebo). Προκειμένου να επιτευχθεί λειτουργικότητα στα παραπάνω, χρησιμοποιείται το παρακάτω πακέτο ROS:

- *gazebo_ros_pkgs*: Αυτό το πακέτο προσθέτει την λειτουργικότητα του ROS επάνω στο περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo, επιτρέποντας την προσομοίωση της κίνησης και της διάδρασης του Drone με το περιβάλλον της αποθήκης.
- *ardrone_autonomy*: Για τον έλεγχο του Parrot AR 2.0, Drone, χρησιμοποιείται το παραπάνω πακέτο το οποίο επιτρέπει στο URDF του ρομπότ να δέχεται εντολές και να αποστέλλει δεδομένα από τους ενσωματωμένους αισθητήρες. Για να χρησιμοποιείται το πακέτο αυτό έχει δημιουργηθεί αντίστοιχο αρχείο το οποίο χρησιμοποιεί κατά βάση τις εντολές /cmd_vel (για την πλοήγηση), /ardrone/navdata (δεδομένα τηλεμετρίας), /ardrone/image_raw (ροή κάμερας).
- *smach*: Εξετάζεται η προσπάθεια ενσωμάτωσης της παραπάνω βιβλιοθήκης έτσι ώστε να υλοποιηθεί ένα πιο δομημένο State Machine.

Navigation (Πλοήγηση): Για την πλοήγηση χρησιμοποιείται το πακέτο move-base το οποίο εμπεριέχει ενσωματωμένο μέσα του planners & controllers ώστε να μπορεί το drone να πλοηγηθεί στο περιβάλλον της προσομοίωσης με ασφάλεια. Ταυτόχρονα με την χρήση του costmap_2d, οριστικοποιείται η δυνατότητα δυναμικής αποφυγής εμποδίων.

Επιπρόσθετα με τη Stereo Camera (RGBD) που προϋπήρχε στο τετρακόπτερο, έχει προστεθεί και ένας αισθητήρας τύπου 2D LIDAR, ο οποίος χρησιμοποιείται για την δυναμική μετακίνηση εντός της αποθήκης. Έχει αναπτυχθεί αλγόριθμος που προς το παρόν, εάν εντοπιστεί κατά την μετάβαση στην προδιαγεγραμμένη πορεία καταμέτρησης, κάποιο εμπόδιο εντός μίας συγκεκριμένης ελάχιστης απόστασης προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε το Drone μεταβαίνει σε κατάσταση “Hover”, ώστε το εμπόδιο να αποχωρήσει από την πορεία.

Καταμέτρηση αποθέματος μέσω τεχνητής όρασης: Χρησιμοποιείται το YOLOv8_ros προκειμένου ως ROS wrapper για το YOLOv8, επιτρέποντας την διασύνδεση του YOLO με το περιβάλλον προσομοίωσης, το πακέτο αυτό μέσω του topic /camera/image_raw λαμβάνει την ζωντανή ροή της κάμερας και στη συνέχεια δημοσιεύει τα εντοπισμένα αντικείμενα ως topics (/detect_objects). Υπάρχει και ενσωμάτωση με την βιβλιοθήκη της Python OpenCV προκειμένου να σχηματίζονται τα bounding boxes κατά τον εντοπισμό ενός αντικειμένου.

Εκπαίδευση αλγορίθμου YOLOv8: Προκειμένου να εκπαιδευτεί ο αλγόριθμος για τον εντοπισμό αντικειμένων μέσα στο περιβάλλον προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος YOLOv8. Για το σύνολο δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές εικόνες ηλεκτρομηχανολογικών εξαρτημάτων (όπως μπλοκ κινητήρα, ανεμιστήρες ψύξης κ.α.). Στη συνέχεια διαμορφώθηκε το παρακάτω πρωταρχικό dataset με την εξής σύσταση:

Πίνακας 19: Πλήθος εικόνων ανά κλάση του συνόλου εκπαίδευσης, αξιολόγησης και δοκιμής

Κατηγορία	Εκπαίδευση	Αξιολόγηση	Δοκιμή	Total (Class)
OVERFLOW-TANK	814	97	54	965
RADIATOR-HOSE	797	100	53	950
RADIATOR-CAP	666	85	50	801
ENGINE-BLOCK	627	82	42	751
RADIATOR	624	76	40	740
RADIATOR-FAN	602	70	36	708
WATER-PUMP	440	51	24	515
TOTAL (SPLIT)	4570	561	299	5430

Οι παραπάνω εικόνες προήλθαν από ένα πλήθος άλλων σχετικών συνόλων δεδομένων, τα οποία απαρτίζονται από εικόνες πραγματικών δεδομένων. Ενδεικτικές εικόνες από το εν λόγω σύνολο δεδομένων απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 124 Ενδεικτικές εικόνες από το σύνολο εκπαίδευσης του αλγορίθμου εντοπισμού δεδομένων

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Στη συνέχεια ακολούθησε annotation των εν λόγω εικόνων, σύμφωνα με τις κλάσεις που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 20: Υπερ-παράμετροι εκπαίδευσης του μοντέλου εντοπισμού και αναγνώρισης αντικειμένων

Παράμετροι	Τιμή	Παράμετροι	Τιμή
model	yolov8n.pt	weight_decay	0.001
epochs	150	warmup_epochs	10
patience	50	warmup_momentum	0.8
batch	64	warmup_bias_lr	0.1
pretrained	TRUE	label_smoothing	0.1
optimizer	AdamW	box	7.5
lrf	0.01	cls	0.5
cos_lr	TRUE	dfi	1.5
close_mosaic	20	mosaic	1
iou	0.7	mixup	0.2
lr0	0.0005	dropout	0.2
momentum	0.9		

Τελικά ακολούθησε εκπαίδευση χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα του YOLOv8, και σύμφωνα με τους διαθέσιμους πόρους που είχαμε και λόγω του χρονικού περιορισμού καταλήξαμε στην χρήση του μοντέλου YOLOv8n-nano. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ένα πολύ ελαφρύτερο δίκτυο και για αυτόν ακριβώς τον λόγο, επέτρεψε την χρήση πιο απαιτητικών υπολογιστικά παραμέτρων, όπως αυξημένο batch size, που με τη σειρά τους οδήγησαν σε ανάλογη απόδοση, με αυτή μεγαλύτερων και πιο σύνθετων εκδόσεων του YOLO. Το συγκεκριμένο μοντέλο Yolo v8n (nano), απέδωσε πιο ολοκληρωμένη απόδοση, έναντι μεταγενέστερων εκδόσεων, ελαφριών πάλι μοντέλων (Yolo v9t, Yolo v9s). Επιπλέον, λόγω πολύ ταχύτερης εξαγωγής συμπερασμάτων, το μοντέλο παρουσίασε καλύτερη συνολική επίδοση, καθώς συνεχώς ανανέωνε τις προβλέψεις του, διορθώνοντας τυχόν λάθη.

Για την αναγνώριση των αντικειμένων χρησιμοποιείται ένα προσαρμοσμένο script το οποίο καλεί την συνάρτηση εντοπισμού αντικειμένων χρησιμοποιώντας τον ενσωματωμένο tracker μέσα από το πακέτο ultralytics, στο συγκεκριμένο script προς το παρόν εκτυπώνεται στο παράθυρο εκτέλεσης εντολών και τα αντικείμενα τα οποία καταμετρούνται, κάτι το οποίο στην τελική έκδοση θα γίνεται διαφορετικά μάλλον χρησιμοποιώντας παραθυριακό περιβάλλον. Τελικά ακολούθησε Fine Tuning, του μοντέλου και σε συνθετικά δεδομένα τα οποία προέρχονται από τα προς αναγνώριση μοντέλα του σεναρίου προσομοίωσης που παρουσιάζεται στην λύση, μέσα από περίπου 400 συνθετικές φωτογραφίες, όπως παρακάτω:



Εικόνα 102: Ενδεικτικές εικόνες από το σύνολο εκπαίδευσης του αλγορίθμου στον προσομοιωτή

Αποθήκευση σε βάση δεδομένων & αλγόριθμοι φυσικής γλώσσας: Συμπληρωματικά με το Live Panel, το οποίο δείχνει κατά την διάρκεια της καταμέτρησης σε πραγματικό χρόνο τα καταμετρούμενα προϊόντα, αναπτύχθηκε μία εφαρμογή βασισμένη σε βάση δεδομένων τύπου MySQL. Χάρη σε αυτή την εφαρμογή δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα να μπορεί να καταμετρά τα προϊόντα, και αυτά να αποθηκεύονται, για μελλοντική αναφορά ή επεξήγηση.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Μαζί με τα αποτελέσματα της καταμέτρησης, πλέον αποθηκεύονται και στιγμιότυπα που παράγονται μέσα από το YOLO κατά την διάρκεια της καταμέτρησης, ανά ράφι, έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον χειριστή, να μπορεί να αποφανθεί για το αν το κάθε στιγμιότυπο εμπεριέχει πραγματικές καταμετρήσεις, ή το σύστημα οδηγήθηκε σε False Positives.

Ανά κύκλο καταμέτρησης (Run) επίσης αποθηκεύονται και στοιχεία όπως η διάρκεια του κύκλου καταμέτρησης (σε δευτερόλεπτα), καθώς και ο αριθμός καταμετρήσεων, τόσο συνολικά όσο και ανά κλάση διαφορετικού ηλεκτρομηχανολογικού εξαρτήματος.

Χρησιμοποιώντας την εν λόγω εφαρμογή μας δόθηκε η δυνατότητα πειραματισμού και αντικειμενικής σύγκρισης των αποτελεσμάτων, σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος, δεδομένου ότι μπορούμε να οπτικοποιήσουμε τις καταμετρήσεις, και να τις συγκρίνουμε με κύκλους καταμέτρησης που οι συνθήκες ήταν ιδανικότερες.

Η υλοποίηση της πλατφόρμας, έγινε χρησιμοποιώντας την γλώσσα σήμανσης html και CSS, καθώς και την γλώσσα PHP ώστε να μπορέσουν οι πληροφορίες να αντληθούν από την βάση δεδομένων (στην εν λόγω εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκε η MariaDB). Τέλος η ανάπτυξη της έγινε μέσα σε Docker Container, επιτρέποντας την εύκολη επανάληψη και αναπαραγωγή του περιβάλλοντος, ανεξάρτητα από υπολογιστή. Επίσης κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί η πλατφόρμα καταμέτρησης να συμπεριληφθεί και επάνω στον υπολογιστή που θα φέρει το φυσικό Drone, δεδομένου της εύκολης εγκατάστασης του Docker Container, αλλά και της χαμηλής ανάγκης σε κατανάλωση πόρων και ενέργειας.

Οι αλγόριθμοι φυσικής γλώσσας που χρησιμοποιήσαμε, έχουν να κάνουν με την διεπαφή του χειριστή και την κατανόηση των αποτελεσμάτων από την βάση δεδομένων. Η εν λόγω πτυχή της εφαρμογής στοχεύει στο να μπορέσει κάποιος που δεν είναι εξοικειωμένος να αντλήσει με ευκολία και φυσικά, τα αποτελέσματα τα οποία αναζητά ανά κύκλο καταγραφής.

Για την υλοποίηση του παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε σαν API το πρωτόκολλο του LangChain, ενώ για μοντέλο NLP, χρησιμοποιήθηκε μία ανοιχτή έκδοση του LLaMA της Meta. Στην πράξη, ο χρήστης θέτει τα ερωτήματα σε φυσική γλώσσα, τα ερωτήματα μετατρέπονται με την διαδικασία text-to-SQL, σε ερωτήματα SQL, στη συνέχεια τα ερωτήματα αυτά αναζητώνται στην βάση δεδομένων, και τα αποτελέσματα που επιστρέφουν, μετατρέπονται πάλι πίσω σε φυσική γλώσσα. Επομένως, κάποιος χειριστής, μπορεί να ρωτήσει:

“Τί αντικείμενα εμπεριέχονται στο πρώτο ράφι στην τελευταία καταμέτρηση;”

Η πρόταση αυτή θα μετατραπεί σε ερώτημα SQL, για παράδειγμα:

```
SELECT id, counting_id, shelf, battery_count, valve_count, engine_count, timestamp
FROM your_table_name
WHERE shelf = 1
ORDER BY id DESC
LIMIT 1;
```

Στη συνέχεια θα εκτελεστεί το ερώτημα και θα επιστρέψει αποτελέσματα:

id	counting_id	shelf	battery_count	valve_count	engine_count	timestamp
105	12	1	4	1	0	2025-05-01 10:30:00

Αυτό το αποτέλεσμα θα ερμηνευτεί με τον τρόπο που απεικονίζεται παρακάτω:

Shelf Status Report — Shelf 1

Date & Time: May 1st, 2025, 10:30 AM
Counting Session: 12
Record ID: 105

Summary:
During the latest inventory scan, shelf 1 was found to be predominantly stocked with batteries, totaling 4 units. A single valve was also present, while no engines were detected.

Interpretation:
The current composition indicates that shelf 1 is primarily allocated for battery storage, with minimal valve presence and no engine stock at this time. This distribution may suggest a focused operational need for batteries on this shelf or a recent restocking activity prioritizing batteries.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Δίνοντας βάση στην σημασιολογική ερμηνεία (semantic explanation) των αποτελεσμάτων. Η αρχιτεκτονική της βάσης δεδομένων και συγκεκριμένα του πίνακα που εμπεριέχει και αποθηκεύει τα δεδομένα καταγραφής, έχει την παρακάτω μορφή:

Field	Description
#id	A unique identifier for each record in database.
#counting_id	A reference to the specific counting session associated with this record
#shelf	The identifier for the shelf being scanned (1-4)
#battery_count	The number of batteries detected on the shelf
#valve_count	The number of valves detected on the shelf
#engine_count	The number of engines detected on the shelf
#timestamp	The exact time when the counting cycle was completed

Η αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε δομημένο πίνακα εξασφαλίζει ακριβή καταγραφή των αποθεμάτων για κάθε κύκλο καταμέτρησης. Αυτή η δομή επιτρέπει την εύκολη υποβολή ερωτημάτων για την παρακολούθηση των επιπέδων απογραφής με την πάροδο του χρόνου, τη δημιουργία αναφορών και την παρακολούθηση των τάσεων των αποθεμάτων. Το πεδίο #timestamp παρέχει χρονικό πλαίσιο για λεπτομερή ιστορική ανάλυση, διασφαλίζοντας ότι κάθε κύκλος καταμέτρησης τεκμηριώνεται για μελλοντική ανασκόπηση, βελτιστοποιώντας έτσι τη διαχείριση αποθεμάτων και τη λήψη αποφάσεων.

2.15.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα από την εκπαίδευση και δοκιμή των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης κατά την ανάπτυξη του. Επιπλέον, παρουσιάζονται στην συνέχεια αποτελέσματα και χρήση της εφαρμογής σε ένα σενάριο καταμέτρησης στην αποθήκη που έχει προσομοιωθεί.

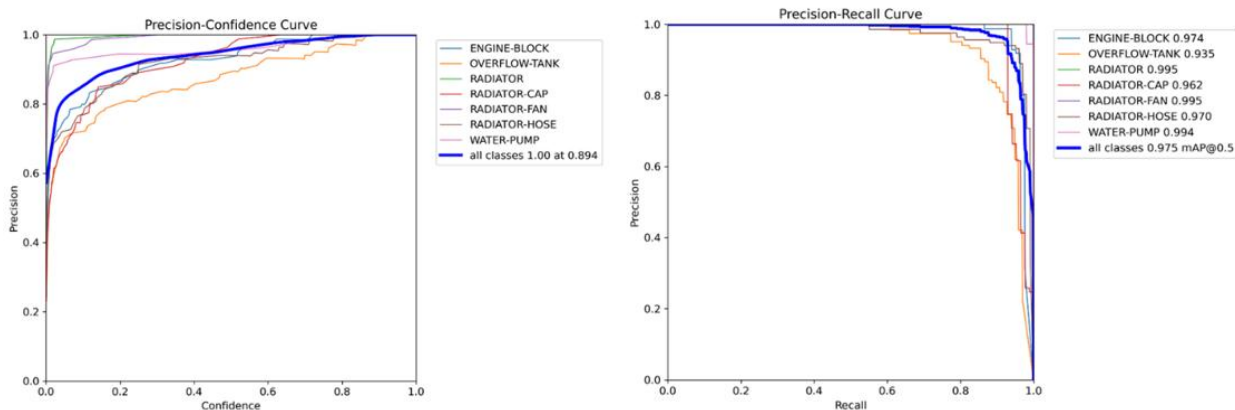
Για τη καμπύλη Precision (Ακρίβειας)-Recall (Ανάκλησης) παρατηρείται ότι οι περισσότερες κλάσεις παραμένουν κοντά στην επάνω δεξιά γωνία του διαγράμματος, κάτι που υποδηλώνει καλή απόδοση και ισορροπία μεταξύ ανάκλησης και ακρίβειας. Η παχιά μπλε γραμμή, απεικονίζει όλες τις κλάσεις μαζί και διατηρεί υψηλή τιμή, σε ευρύ φάσμα τιμών recall (ανάκλησης), έως και κοντά στο 1. Η συνολική mAP (@0.5) = 0.975.

Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην καμπύλη Precision (Ακρίβειας)-Confidence (Εμπιστοσύνης), δείχνουν ότι για την πλειοψηφία των κλάσεων, όσο αυξάνεται η εμπιστοσύνη, τόσο αυξάνεται και η ακρίβεια. Επίσης συνολικά οι κλάσεις, επιτυγχάνουν ακρίβεια 1.00 σε τιμή εμπιστοσύνης 0.894.

Η Καμπύλη Recall (Ανάκλησης)-Confidence (Εμπιστοσύνης), δείχνει τη σχέση μεταξύ της ανάκλησης (recall) και της εμπιστοσύνης (confidence). Η καμπύλη για όλες τις κατηγορίες (μπλε γραμμή) δείχνει ότι η συνολική ανάκληση παραμένει υψηλή (0.99 σε μηδενικά επίπεδα εμπιστοσύνης), διατηρώντας ένα ευρύ φάσμα τιμών εμπιστοσύνης. Επιτυγχάνοντας έτσι, παραπλήσια ανάκληση, με τα μεγαλύτερα μοντέλα.

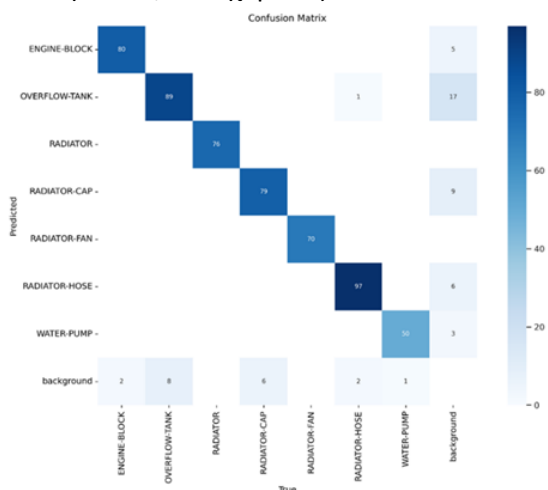
Η καμπύλη F1-Confidence (Εμπιστοσύνης) δείχνει ότι το μοντέλο επιτυγχάνει απόδοση, με F1 score που φτάνει το 0.95 όταν η εμπιστοσύνη είναι 0.544 για όλες τις κλάσεις. Δηλαδή επιτυγχάνεται καλή ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και ανάκλησης, για ένα αρκετά ευρύτερο φάσμα τιμών εμπιστοσύνης. Οι περισσότερες κατηγορίες έχουν F1 score πάνω από 0.8, μέχρι υψηλά επίπεδα εμπιστοσύνης (έως και 0.8). Παρατηρείται πτώση του F1 score στις πολύ υψηλές τιμές εμπιστοσύνης (0.8-1.0), κάτι που υποδηλώνει ότι το μοντέλο γίνεται αυστηρότερο, θυσιάζοντας την ανάκληση, προς αύξηση της ακρίβειας, στις πολύ έμπιστες προβλέψεις.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 125 Ενδεικτικές αποτελέσματα ακριβείας και εμπιστοσύνης του μοντέλου YOLO για τον εντοπισμό αντικειμένων

Ο πίνακας σύγχυσης, δείχνει ότι το μοντέλο επιτυγχάνει καλή απόδοση ταξινόμησης στην πλειοψηφία των κλάσεων, με τις περισσότερες σωστές προβλέψεις να βρίσκονται στη διαγώνιο. Παράλληλα, τα λίγα σφάλματα που προκύπτουν, σχετίζονται κυρίως, με την λανθασμένη πρόβλεψη ως φόντο (background), ενώ το αληθές είναι κάποια κλάση (False Positive Background), ή το αντίστροφο (False Negative Background). Αυτό υποδεικνύει, ότι σχεδόν όλες αυτές οι λίγες συγχύσεις, αφορούν σφάλματα ταξινόμησης, μεταξύ κλάσεων και φόντου, και όχι μεταξύ κλάσεων.



Εικόνα 126 Πίνακας σύγχυσης του μοντέλου για την κατηγοριοποίηση των αντικειμένων

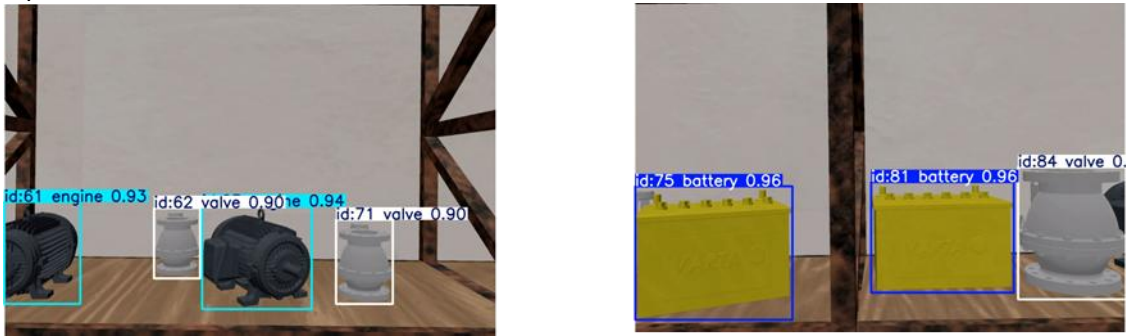
Παρακάτω παραθέτονται εικόνες από την αναγνώριση των παραπάνω κλάσεων χρησιμοποιώντας τα βάρη που προέκυψαν από την εκπαίδευση:



Εικόνα 127 Ενδεικτικές εικόνες για την περαιτέρω εκπαίδευση του μοντέλου αναγνώρισης αντικειμένων

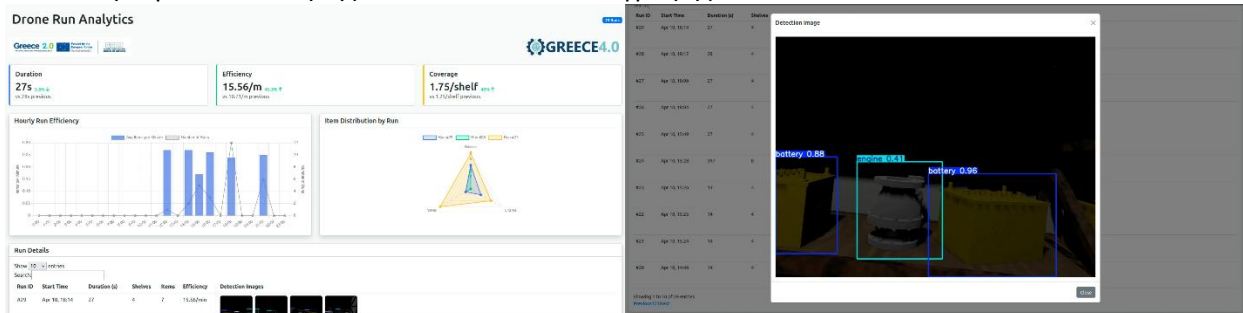
P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Μετά το Fine Tuning, για τον εντοπισμό των κλάσεων που εμπριέχονται στο σενάριο της προσομοίωσης (Battery, Valve & Engine), ακολουθούν παραδείγματα εντοπισμού των παραπάνω από εικόνες που ελήφθησαν από το Drone:



Εικόνα 128 Ενδεικτικά αποτελέσματα αναγνώρισης αντικειμένων από το περιβάλλον προσομοίωσης

Ταυτόχρονα παρουσιάζεται η πλατφόρμα στην οποία ο χειριστής μπορεί να δει τα ιστορικά δεδομένα από τους κύκλους των καταμετρήσεων. Το Live Dashboard Καταμετρήσεων αποτελεί το κεντρικό εργαλείο παρακολούθησης και αξιολόγησης των αυτόνομων δρομολογίων καταμέτρησης που πραγματοποιεί drone στην αποθήκη. Το drone σαρώνει ράφια, αναγνωρίζει αντικείμενα όπως μπαταρίες, βαλβίδες και κινητήρες μέσω υπολογιστικής όρασης και αποθηκεύει τις πληροφορίες σε SQL βάση δεδομένων. Το dashboard προσφέρει σε πραγματικό χρόνο: (α) συνολική διάρκεια δρομολογίου με βελτίωση έναντι του προηγούμενου run, (β) αποδοτικότητα (Efficiency) μετρώντας τον αριθμό αντικειμένων ανά λεπτό, δίνοντας ξεκάθαρη εικόνα της ταχύτητας και αποτελεσματικότητας του drone, (γ) κάλυψη ραφιών (Coverage), δηλαδή πόσα ράφια σαρώθηκαν κατά μέσο όρο ανά δρομολόγιο, (δ) γραφική απεικόνιση απόδοσης ανά ώρα, παρουσιάζοντας την κατανομή των runs μέσα στη μέρα, (ε) ανάλυση κατανομής αντικειμένων ανά run μέσω διαγράμματος ραντάρ (radar chart), συγκρίνοντας τα τελευταία runs ως προς τα είδη αντικειμένων και (στ) λεπτομέρειες τελευταίου run (ID, ώρα έναρξης, διάρκεια, αριθμός ραφιών, συνολικά αντικείμενα, αποδοτικότητα) μαζί με εικόνες από τις καταγραφές του drone. Το σύστημα είναι πλήρως αυτοματοποιημένο και βασίζεται σε δεδομένα που αποθηκεύονται και ανακτώνται σε πραγματικό χρόνο από SQL βάση δεδομένων, προσφέροντας ακρίβεια, διαφάνεια και δυνατότητα βελτιστοποίησης των διαδικασιών απογραφής.



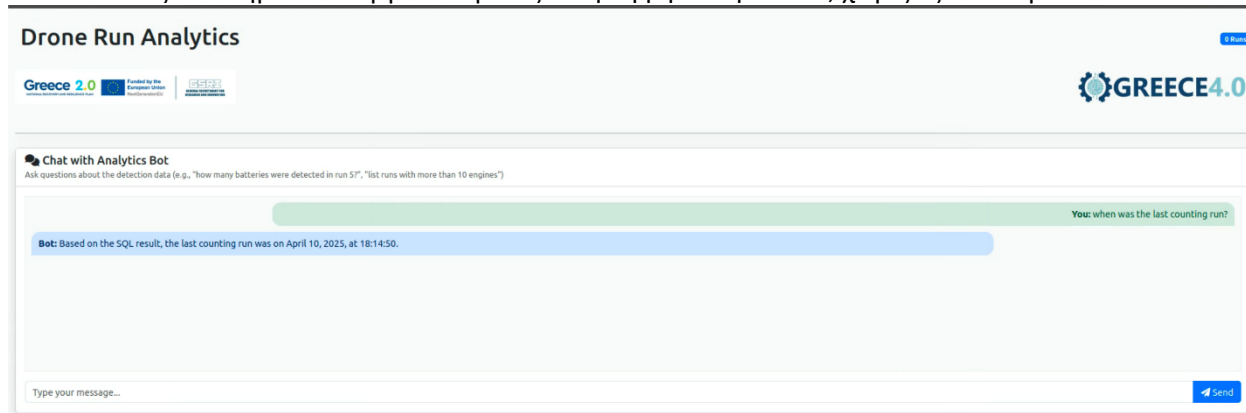
Εικόνα 129 Ενδεικτικά εικόνες από το dashboard καταγραφών με στατιστικά στοιχεία (δεξιά) και λεπτομέρειες καταγραφής χαμηλής φωτεινότητας (αριστερά)

Τελικά παρουσιάζεται η εφαρμογή διεπαφής με τον αλγόριθμο φυσικής γλώσσας (NLP), στον οποίο μπορεί ο χειριστής να θέσει τα ερωτήματα, και να λάβει πίσω απάντηση φυσικής γλώσσας.

Η διεπαφή ενσωματώνει ένα φιλικό σύστημα φυσικής γλώσσας, επιτρέποντας στον χρήστη να θέτει απλές ερωτήσεις, όπως “Πότε έγινε η τελευταία καταμέτρηση;”.

Το σύστημα ακολουθεί μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική επεξεργασίας ερωτημάτων. Αρχικά, πραγματοποιείται καθαρισμός και μετασχηματισμός του ερωτήματος, όπου το αρχικό ερώτημα του χρήστη μετατρέπεται αυτόματα σε γραμμολογικά πιο σωστή και αποδοτική εκδοχή, ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση από το μοντέλο NLP. Έπειτα, ακολουθεί η επεξεργασία φυσικής γλώσσας, όπου το βελτιωμένο ερώτημα εισάγεται σε ένα μοντέλο φυσικής γλώσσας που κατανοεί την πρόθεση του χρήστη και παράγει το κατάλληλο SQL query. Στη συνέχεια, το παραγόμενο query εκτελείται

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής απευθείας στη βάση δεδομένων SQL όπου βρίσκονται αποθηκευμένες όλες οι καταγραφές του drone και εξάγει την ανθρωποκεντρική απάντηση μετατρέποντας τα αποτελέσματα σε καθαρή και ευανάγνωστη απάντηση, την οποία επιστρέφει η διεπαφή στον χρήστη. Με αυτό τον τρόπο, ακόμα και χρήστες χωρίς τεχνικές γνώσεις μπορούν να ανακτούν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα γεφυρώνει τη φυσική γλώσσα με τα δεδομένα, κρύβοντας την πολυπλοκότητα της βάσης πίσω από έναν διάλογο, αποτελώντας ένα σημαντικό εργαλείο για έξυπνη λήψη αποφάσεων, χωρίς εξειδικευμένα dashboards.



Εικόνα 130 Διεπαφή χρήστη για την φιλική εξαγωγή αποτελεσμάτων από το ιστορικό των καταμετρήσεων

Οι παραπάνω δύο πλατφόρμες βρίσκονται σε μορφή web application, έτσι ώστε να είναι προσβάσιμες ανά πάσα στιγμή από τον χειριστή, είτε στον ίδιο χώρο με το Drone, είτε με την κατάλληλη παραμετροποίηση και εξ αποστάσεως.

Αναφορικά με την παρουσίαση υλικού τελικής έκδοσης, επισυνάπτεται σύντομο βίντεο, στο οποίο το Drone μες στο περιβάλλον προσομοίωσης, με την έναρξη της προκαθορισμένης αποστολής, ξεκινά από την αρχική του θέση, απογειώνεται, και στη συνέχεια προχωρά στην προσέγγιση των ραφιών. Σε κάθε ράφι, επιλέγεται μία εικόνα, όταν το Drone βρίσκεται σε πτητική ισορροπία, και στέλνεται στη συνέχεια για αναγνώριση στο node του detection. Όταν τα αντικείμενα αναγνωριστούν, εξάγεται στο παράθυρο της γραμμής εντολών το αποτέλεσμα του detection.

Σύνδεσμος: <https://www.youtube.com/watch?v=ZtS7FVXtKBQ>

2.16 Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής

2.16.1 Στάδια υλοποίησης ης λύσης

Οι επιμέρους εργασίες ανάπτυξης των μηχανισμών προστασίας δεδομένων σε κόμβο αιχμής είναι οι εξής:

- Βασικοί μηχανισμοί συλλογής δεδομένων με πολλαπλά βιομηχανικά πρωτόκολλα
- Σχεδιασμός και υλοποίηση Dashboard και UI
- Σχεδιασμός και υλοποίηση βασικών πρωτογενών στοιχείων ασφάλειας πχ. Κρυπτογράφηση, γέννηση κλειδιών, διαχείριση πιστοποιητικών κτλ.
- Ενσωμάτωση πρωτογενών στοιχείων μετακβαντικής κρυπτογραφίας στο σύστημα και προηγμένοι μηχανισμοί πρωτογενών στοιχείων ασφαλείας
- Μηχανισμοί αυτοπροστασίας και ανίχνευσης ανωμαλιών στο κόμβο αιχμής. Μηχανισμοί καταγραφής και δημοσιοποίησής τους
- Μηχανισμοί δημιουργίας και διαχείρισης μοναδικής ταυτότητας κόμβου
- Συνεχής έλεγχος και προσαρμογή των εφαρμοσμένων τεχνολογιών

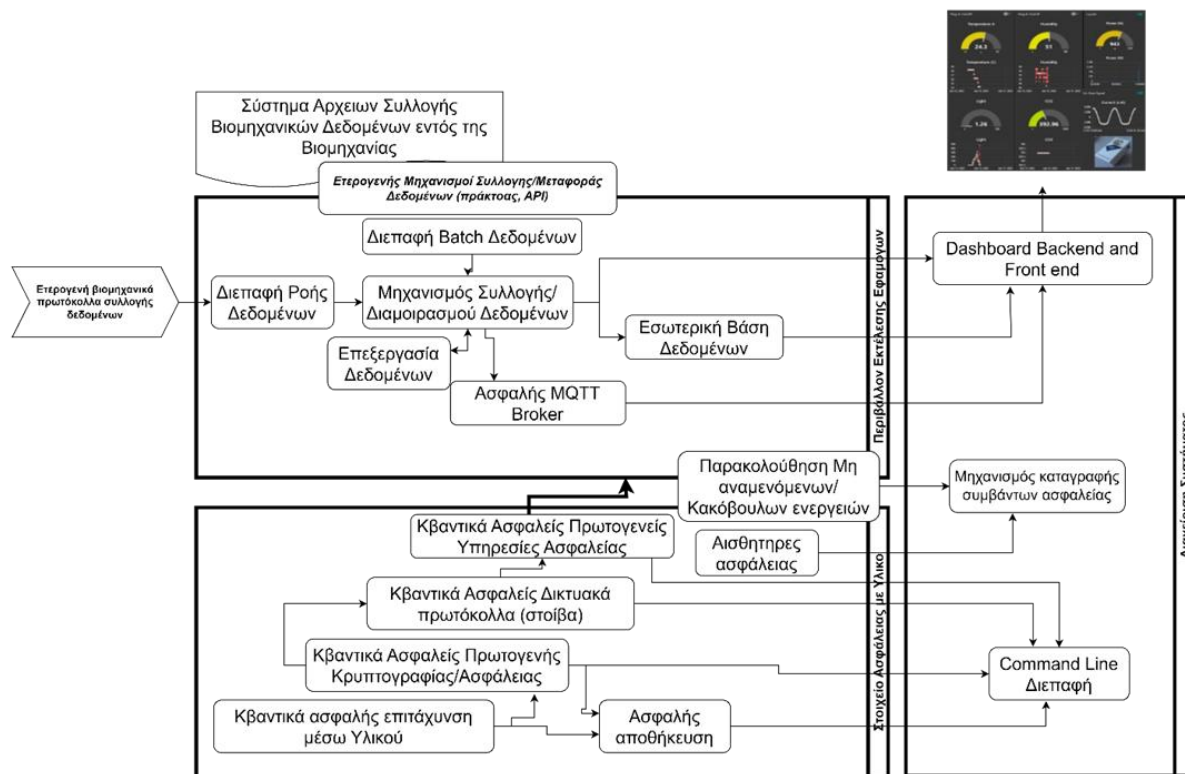
Η τελική υλοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει όλα τα παραπάνω στοιχεία όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο παραδοτέο Π1.2 και Π2.1. Πιο συγκεκριμένα υλοποιήθηκαν οι μηχανισμοί συλλογής δεδομένων με χρήση διάφορων βιομηχανικών και μη πρωτόκολλόν επικοινωνίας όπως OPC-UA, Bluetooth, Wi-Fi, Modbus/etherbus (και διάφορες παραλλαγές τους). Τα συλλεγόμενα δεδομένα αποθηκεύονται ασφαλώς σε τοπική βάση δεδομένων εντός του κόμβου αιχμής και είναι προσβάσιμα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής στον χρήστη μέσω διεπαφής με το χρήστη που έχει υλοποιηθεί πλήρως. Έτσι τα δεδομένα εμφανίζονται με εύληπτο τρόπο. Στην τελική έκδοση έχει υλοποιηθεί σε λογισμικό ή/και υλικό (συν-σχεδιασμός με λογισμικό) διαφόρων πρωτογενών στοιχείων ασφαλείας με έμφαση στην μετακβαντική κρυπτογραφία συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών γέννησης και διαχείρισης κλειδιών και πιστοποιητικών. Στον κόμβο αιχμής έχουν ενσωματωθεί οι αντίστοιχες βιβλιοθήκες λογισμικού/υλικού που παρέχουν την αναμενόμενη λειτουργικότητα. Το κομμάτι των πρωτόγενών που αναφέρεται σε μετακβαντική κρυπτογραφία έχει ολοκληρωθεί παρέχοντας πρωτογενείς για τα προτυποποιημένα συστήματα Key Encapsulation Mechanisms (KEM) και Ψηφιακών υπογραφών δλδ MLKEM, MLDSA καθώς και κάποια προς πιστοποίηση συστήματα KEM και Ψηφιακών Υπογραφών. Σχετικές βιβλιοθήκες παρέχονται στην τελική λύση.

Ο μηχανισμός καταγραφής ανωμαλιών και δημοσιοποίησης δεδομένων ασφαλείας έχει υλοποιηθεί πλήρως και περιλαμβάνει την γέννηση αρχείων σε JSON format με πεδία που αναφέρονται στο συμβάν που ανιχνεύτηκε, πληροφορίες για την ανωμαλία με την οποία σχετίζεται και την σχετική επίθεση κυβερνοασφάλειας καθώς και την επικινδυνότητά της. Τέλος, η υλοποίηση των μηχανισμών δημιουργίας και διαχείρισης μοναδικής ταυτότητας του κόμβου είναι σε εξέλιξη.

2.16.2 Αρχιτεκτονική Τελικής έκδοσης

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σαν σημείο αναφοράς η αρχιτεκτονική του συστήματος. Όπως έχει αναφερθεί και στο παραδοτέο Π1.2 και Π2.1 η αρχιτεκτονική αποτελείται από 3 τμήματα. Το Περιβάλλον Εκτέλεσης Εφαρμογών, το Υποσύστημα Στοιχείων Ασφάλειας με Υποστήριξη Υλικού το οποίο υλοποιεί και υποστηρίζει την ασφάλεια του κόμβου αιχμής και το υποσύστημα Διαχείρισης Εφαρμογών και Ασφάλειας, το οποίο περιλαμβάνει τις από άκρο σε άκρο διαδικασίες διαχείρισης του κόμβου και των υποσυστημάτων του. Στα παρακάτω υποκεφάλαια δίνεται μια εποπτική περιγραφή της υλοποίησης των επιμέρους υποσυστημάτων και σε επόμενο μέρος αναλύουμε πιο διεξοδικά τα πιο σημαντικά επιμέρους τμήματα της αρχιτεκτονικής που συνεισφέρουν ουσιαστικά και στην επίτευξη των καίριων στόχων αποδοτικότητας του συστήματος.



Εικόνα 131 Αρχιτεκτονική Μηχανισμών Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής

2.16.2.1 Περιβάλλον Εκτέλεσης Εφαρμογών

Στο υποσύστημα αυτό έχει υλοποιηθεί πλήρως το Dashboard (διεπαφή χρήστη) τόσο το frontend όσο και το Backend της λύσης. Η υλοποίηση είναι βασισμένη στο NODE-RED framework και μέσω αυτής και στο backend με τη χρήση κατάλληλα υλοποιημένων API για το μηχανισμό συλλογής δεδομένων παρουσιάζει προς το χρήστη όλες τις συλλεγόμενες από το βιομηχανικό περιβάλλον τιμές. Επίσης το Dashboard χρησιμεύει και σαν τρόπος γραφικής αναπαράστασης των ανιχνευμένων συμβάντων στον κόμβο αιχμής, δρώντας έτσι σαν ένας έλεγχος αυτό προστασίας του συστήματος.

Πέραν του γραφικού περιβάλλοντος, έχει υλοποιηθεί πλήρως και ένας command – line μηχανισμός επικοινωνίας με το χρήστη που αναφέρεται στη λειτουργικότητα του Υποσυστήματος Στοιχείων Ασφάλειας με Υποστήριξη Υλικού. Η διεπαφή αυτή δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να εκτελέσει λειτουργίες ασφάλειας όπως η γέννηση και διαχείριση κλειδιών και πιστοποιητικών ασφαλείας καθώς και η κρυπτογράφηση ή ψηφιακή υπογραφή μηνυμάτων ή δεδομένων γενικότερα. Το σύστημα αυτό είναι πλήρως υλοποιημένο από την ενδιάμεση έκδοση της λύσης και υποστηρίζει τις τρέχουσες λειτουργίες του Στοιχείου Ασφάλειας με Υποστήριξη Υλικού.

2.16.2.2 Υποσύστημα Στοιχείων Ασφάλειας με Υποστήριξη Υλικού

Σε αυτό το υποσύστημα υλοποιείται η κβαντικά ασφαλούς στοίβα του συστήματος η οποία περιλαμβάνει κβαντικά ασφαλείς πρωτογενείς λειτουργίες κρυπτογραφίας, δικτυακά πρωτόκολλα και υπηρεσίες. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η στοίβα έχει ενσωματώσει διάφορες υπάρχουσες βιβλιοθήκες ασφαλείας για μετακβαντική κρυπτογραφία όπως η liboqs, rqm4 και έχει κτιστεί πάνω τους κατάλληλη υλοποίηση 2 δημοφιλών πρωτόκολλων δικτυακής ασφάλειας, το TLS1.3 (στην κβαντικά ασφαλή του έκδοση) και το πρωτόκολλο EDHOC (στην κβαντικά ασφαλή του έκδοση). Οι παρεχόμενες λύσεις είναι διαμορφωμένες ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν τόσο σε γενικού σκοπού κόμβους αιχμής όσο και σε χαμηλών πόρων κόμβους αιχμής. Παράλληλα για την επιτάχυνση της κβαντικά ανθεκτικής ψηφιακής υπογραφής έχει υλοποιηθεί σε υλικό (σε τεχνολογία FPGA εντός του Συστήματος μέσα στο Τσιπ του κόμβου αιχμής) ένας επιταχυντής των βασικών αριθμητικών πράξεων που πραγματοποιούνται στους σχετικούς κρυπτογραφικούς αλγορίθμους (Lattice Based Cryptography σχημάτων).

Τέλος, χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα ανίχνευσης μέσω της κρυπτογραφικής στοίβας τότε υπάρχει παραβίαση ακεραιότητας ή αυθεντικότητας ενός μηνύματος σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σχετικός αισθητήρας ασφαλείας που ανιχνεύει τέτοιου τύπου παραβίαση, καταγράφει το σχετικό συμβάν και ειδοποιεί τον χρήστη. Επίσης έχει υλοποιηθεί και ένας αισθητήρας που με τη χρήση Heuristic τεχνικών καθώς και χρήση τεχνητής νοημοσύνης ανιχνεύεται από τα χαρακτηριστικά του επεξεργαστή κατά τη λειτουργία του (π.χ. κατανάλωση ισχύος, χρήση CPU, μνήμης και δικτύου κτλ.) ανώμαλες συμπεριφορές που μπορεί να οφείλονται σε κακόβουλες πράξεις.

2.16.2.2.1 Υποσύστημα Διαχείρισης Εφαρμογών και Ασφάλειας

Το σύστημα διαχείρισης Εφαρμογών και Ασφάλειας λειτουργεί υποστηρικτικά στα άλλα 2 τμήματα της λύσης παρέχοντας συντονιστική δράση και μηχανισμούς αποθήκευσης/προεπεξεργασίας δεδομένων. Στην τελική λύση όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην αρχιτεκτονική έχουν υλοποιηθεί πλήρως συμπεριλαμβανομένου του μηχανισμού συλλογής και διαμοιρασμού δεδομένων που χρησιμοποιεί το στοιχείο MQTT Broker για να κάνει διαθέσιμα τα συλλεγόμενα από το βιομηχανικό περιβάλλον δεδομένα. Στην τελική λύση έχει υλοποιηθεί και τοπική βάση δεδομένων όπου βιομηχανικά δεδομένα αποθηκεύονται παροδικά μέχρι να καταναλωθούν από κάποιο άλλο υποσύστημα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί πλήρως και ένας FIDO Server που λειτουργεί με στόχο τη διαχείριση του κύκλου ζωής των διαπιστευτηρίων συσκευών και σε εξέλιξη είναι και η ενσωμάτωση ενός OIDC Provider για αυθεντικοποίηση χρηστών και δημιουργία διακριτικών (tokens).

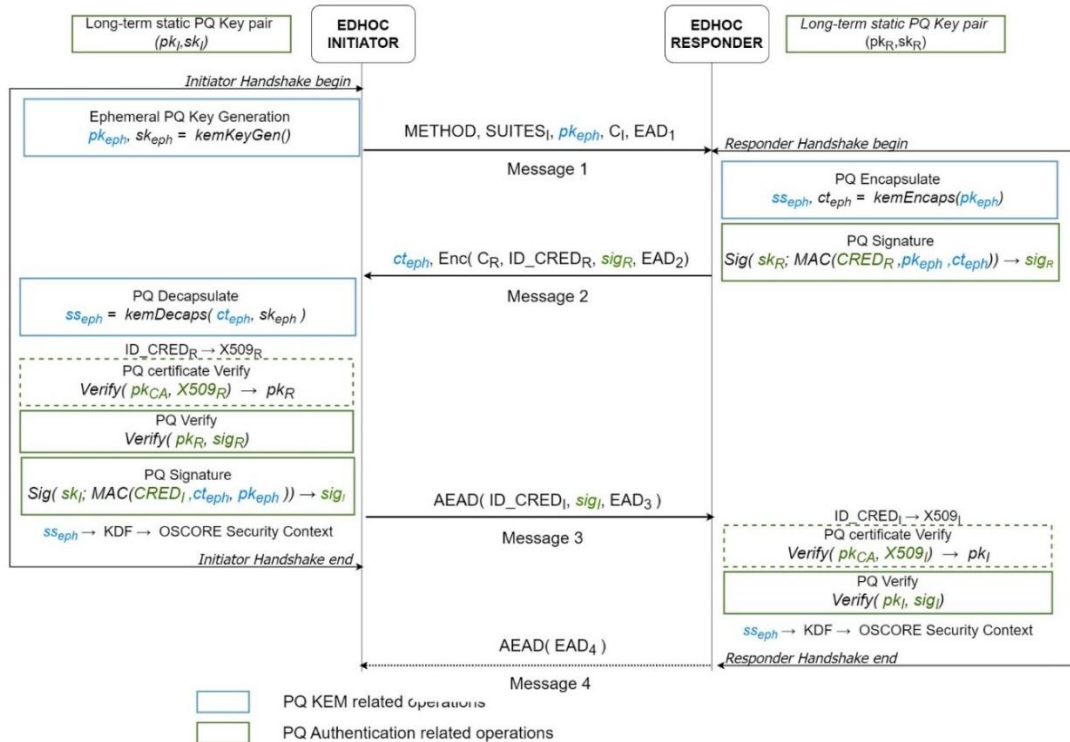
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

2.16.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.16.3.1 PQ-EDHOC

Στην ενδιάμεση και τελική έκδοση της λύσης έχουμε επεκτείνει το πρωτόκολλο Ephemeral Diffie-Hellman Over COSE (EDHOC) (IETF RFC9528)ⁱ ώστε να υποστηρίζει κρυπτογραφικούς αλγόριθμους ανθεκτικούς σε κβαντικές επιθέσεις. Η υλοποίηση υποστηρίζει Μετα-Κβαντικούς Μηχανισμούς Εγκλεισμού Κλειδιού (PQC Key Encapsulation Mechanisms, KEMs) για παραγωγή κλειδίων και Μετα-Κβαντικές Ψηφιακές Υπογραφές (PQC Digital Signatures) για αυθεντικοποίηση, σύμφωνα με τη διαδικασία τυποποίησης PQC του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST)ⁱⁱ, οδηγώντας σε μια πλήρη Μετα-Κβαντική (PQ) έκδοση του πρωτοκόλλου EDHOC, που αναφέρεται ως PQ-EDHOC.

Το EDHOC είναι ένα εξαιρετικά συμπαγές και ελαφρύ πρωτόκολλο ανταλλαγής κλειδίων Diffie-Hellman με αυθεντικοποίηση, το οποίο επιτρέπει την εγκαθίδρυση ενός κοινόχρηστου μυστικού με βάση εφήμερα κλειδιά. Παρέχει προστασία ταυτότητας, τέλεια εμπιστευτικότητα προόδου (perfect forward secrecy) και αμοιβαία αυθεντικοποίηση με βάση διαπιστευτήρια που έχουν καθιερωθεί μέσω εξωζωνικών (out-of-band) μεθόδων. Απαιτούνται αρκετές τροποποιήσεις για την πλήρη προσαρμογή του πρωτοκόλλου EDHOC στην ασφάλεια μετακβαντικής κρυπτογραφίας (PQC). Για την προσαρμογή του πρωτοκόλλου στο μετακβαντικό περιβάλλον, ο μηχανισμός ανταλλαγής κλειδίων του EDHOC μετατρέπεται σε ένα σχήμα KEM μέσω αρχιτεκτονικής προσαρμογής. Αυτή η αλλαγή περιλαμβάνει την αντικατάσταση των κλασικών δημόσιων κλειδίων Diffie-Hellman (DH) με εφήμερα μετα-κβαντικά δημόσια κλειδιά, καθώς και την ενθυλάκωση του κλειδιού κατά την ανταλλαγή μηνυμάτων όπως αναφέρεται λεπτομερώς στο Π2.1. Στον κόμβο αιχμής επικεντρωνόμαστε στην μέθοδο αυθεντικοποίησης 0 που χρησιμοποιεί ψηφιακές υπογραφές και πιστοποιητικά ΠΙ:-X509 που ακολουθούν τη δομή του COSE. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου καθώς και οι αλλαγές που γίνονται ώστε να μετατραπεί σε μετακβαντικό φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (οι αλλαγές στο πρωτόκολλο είναι χρωματισμένες) και αναλύονται διεξοδικά στο παραδοτέο Π2.1.



Εικόνα 132 Ανταλλαγή Μηνυμάτων στο PQ-EDHOC

2.16.3.1.1 Μετα-Κβαντικοί Μηχανισμοί Εγκλεισμού Κλειδιού (PQC KEMs) και Ψηφιακές Υπογραφές

Όπως αναφέρεται και στο παραδοτέο Π2.1 η PQ EDHOC υλοποίησή μας περιλαμβάνει αρκετούς PQC KEMs και ψηφιακές υπογραφές όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

KEMS	Ψηφιακές Υπογραφές
Crystals-Kyber (security Level 1 and 3)/MLKEM	Crystals-Dilithium (security Level 1 and 2)/MLDSA
HQC	Falcon (security Level1)
BIKE	HAWK (security Level 1)
	HAETAE (security Level 2)

Όλοι οι συνδυασμοί αλγορίθμων KEM με Ψηφιακές Υπογραφές στο PQ EDHOC πλαισιώνονται από το ίδιο AES-CCM με ρύθμιση 16-62-128, SHA-256 για κατακερματισμό και μήκος MAC 8 byte. Το μητρώο IANA COSE επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει κωδικούς για τους νέους αυτούς μετακβαντικούς συνδυασμούς, όπως παρουσιάζεται και στο παραδοτέο P2.1.

2.16.3.2 Επιταχυντής Υλικού (FPGA) για MLKEM/MLDSA.

Τα πρωτόκολλα μετακβαντικής κρυπτογραφίας που υλοποιούνται στην λύση του κόμβου αιχμής υποστηρίζονται από βιβλιοθήκες μετακβαντικής κρυπτογραφίας βασισμένες στις $rqm4$, $rqclean$ βιβλιοθήκες ανοικτού κώδικα. Πέραν όμως από αυτό, οι παραπάνω βιβλιοθήκες έχουν επεκταθεί με κατάλληλο υλισμικό (firmware) ώστε να αξιοποιούν επιταχυντή υλικού Κρυπτογραφικών Πρωτογενών Μετα-Κβαντικών Αλγορίθμων (PostQuantum CryptoPrimitive, PQC). Ο συγκεκριμένος επιταχυντής αποτελεί μια σειρά από περιφερειακά υλικού IP πυρήνα για FPGA, τα οποία παρέχουν επιταχυνόμενες σε υλικό λειτουργίες ψηφιακών υπογραφών (DS) και μηχανισμών ενθυλάκωσης κλειδιού (KEM) βάσει των τυποποιημένων από το NIST αλγορίθμων μετα-κβαντικών DS και KEM (δηλαδή των αλγορίθμων CRYSTALS-Dilithium και CRYSTALS-Kyber, αντίστοιχα). Κάθε ένας από αυτούς τους IP πυρήνες έχει βελτιστοποιηθεί για γρήγορη επικοινωνία υλικού-προς-λογισμικό χρησιμοποιώντας τη διεπαφή AXI stream bus και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δυναμικά αναδιαμορφούμενα συστήματα FPGA, τόσο για επεξεργαστές βασισμένους σε RISC-V όσο και σε ARM Cortex-A, εφόσον συνυπάρχουν σε υλικό FPGA ή σε MPSoC με ενσωματωμένη υφαντουργία FPGA. Είναι συμβατοί πλήρως με τις προτεινόμενες λύσεις στον κόμβο αιχμής.

Οι δύο IP πυρήνες υλικού του επιταχυντή προσφέρουν λειτουργικότητα μετα-κβαντικών υπογραφών (ML DS) και μηχανισμών ενθυλάκωσης κλειδιού (ML KEM) για όλες τις βαθμίδες ασφαλείας των αλγορίθμων, στηριζόμενοι σε έναν εξαιρετικά γρήγορο πολλαπλασιαστή Number Theoretic Transform (NTT) για όλες τις πράξεις αριθμητικής σε δακτύλιο πολυωνύμων (Matrix-to-Matrix και Matrix-to-Vector) εντός των αλγορίθμων ML DS και ML KEM. Αυτός ο πολλαπλασιαστής NTT έχει υλοποιηθεί με τη χρήση εργαλείων High Level Synthesis (HLS).

Πέρα από τους IP πυρήνες υλικού, η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει τον απαραίτητο κώδικα firmware λογισμικού για πρόσβαση στους πυρήνες, όταν αναπτύσσονται στο FPGA fabric ενός ενσωματωμένου συστήματος. Ο κώδικας αυτός αντιστοιχίζει τις διευθύνσεις μνήμης του AXI bus για κάθε IP πυρήνα σε ευρέως χρησιμοποιούμενα APIs για ML DS και ML KEM, ώστε οι πυρήνες να είναι διαθέσιμοι σε εφαρμογές PQC που τα χρειάζονται.

Πιο συγκεκριμένα, ακολουθήσαμε την προσέγγιση σχεδίασης για το NTT πολλαπλασιασμό που βασίζεται σε εργαλεία HLS και καταφέρνει να εξαλείψει την εξάρτηση δεδομένων μεταξύ των διαφόρων βρόχων του αναδρομικού αλγορίθμου NTT προς βελτίωση της ταχύτητας υπολογισμών. Εισαγάγαμε μια επαναδιατύπωση του κώδικα C/C++ για NTT, και στη συνέχεια βελτιστοποιώντας περαιτέρω αυτήν την προσέγγιση μέσω της προσαρμογής της τεχνικής βασισμένης σε FFT που περιγράφεται στο⁵ για το πεδίο του NTT. Αυτή η αρχιτεκτονική αυξάνει τον ρυθμό πρόσβασης των στοιχείων επεξεργασίας NTT στη μνήμη και ελαχιστοποιεί την εξάρτηση μεταξύ των βρόχων ανάγνωσης και εγγραφής μνήμης εντός του αλγορίθμου, από την οποία προκύπτει η τελική βελτιστοποιημένη αρχιτεκτονική. Επίσης, με τη χρήση του `dependence pragma` εντός του πηγαίου κώδικα που παρέχεται στα εργαλεία HLS, εξαλείφεται αποτελεσματικά η εξάρτηση των επιμέρους στοιχείων δεδομένων μεταξύ τους στην βελτιστοποιημένη αρχιτεκτονική. Χρησιμοποιώντας ως μελέτη περίπτωσης την έκδοση NTT που χρησιμοποιείται στην PQC υπογραφή Dilithium, αποδεικνύεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση οδηγεί σε βελτίωση καθυστέρησης

⁵ D. Cohen, "Simplified control of FFT hardware," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 24, no. 6, pp. 577–579, 1976.

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής 20–50% με τη χρήση μόλις δύο παράλληλων μονάδων butterfly του NTT σε σύγκριση με άλλες υπάρχουσες λύσεις NTT με HLS στη βιβλιογραφία.

2.16.3.3 Αισθητήρες Ανίχνευσης ανωμαλιών/εισβολών ασφαλείας.

Η προτεινόμενη λύση παρέχει αισθητήρα ανίχνευσης ανωμαλιών, ο οποίος σε πραγματικό, μη απομονωμένο περιβάλλον (non-sandboxed) συλλέγει μετρικές απόδοσης όπως το φορτίο CPU, τη δραστηριότητα μνήμης, το φορτίο δίσκου και τη δικτυακή κίνηση, χωρίς να απαιτεί ειδικά hooks ή προκαταρκτικά σύνολα δεδομένων. Μέσω ανάλυσης αυτών των φυσικών χαρακτηριστικών, εντοπίζει ανωμαλίες και ταξινομεί συμβάντα βάσει του πλαισίου ATT&CK του MITRE, αποτυπώνοντας κακόβουλες ενέργειες ως αλληλουχία εκμεταλλεύσεων (exploits) σε πραγματικό χρόνο. Η προσέγγιση αυτή ελαχιστοποιεί την εξάρτηση από sandboxed παρακολούθηση API/System calls, επιτρέποντας την άμεση διαχείριση και αναφορά των μετρήσεων στο κεντρικό SIEM μέσω REST ή Message Broker, είτε με προκαθορισμένο rolling είτε βάσει κανόνων ενεργοποίησης. Πιο αναλυτικά, ο αισθητήρας βασίζεται σε τεχνολογίες βαθιάς μάθησης (DL) για ανίχνευση ανωμαλιών και ταξινόμηση χρησιμοποιώντας τρεις τύπους Νευρωνικών Δικτύων: ένα Πλήρως Συνδεδεμένο Δίκτυο (FCN), ένα Συνελκτικό Νευρωνικό Δίκτυο (CNN) και ένα Δίκτυο Μακράς Διάρκειας – Βραχυπρόθεσμης Μνήμης (LSTM).

Τα μοντέλα έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο (run-time) τόσο σε επιτραπέζια όσο και σε ενσωματωμένα συστήματα με λειτουργικό Linux. Η αρχιτεκτονική αυτή αξιοποιεί εύκολα μετρικές—όπως το φορτίο CPU, τη δραστηριότητα μνήμης και την αξιοποίηση δίσκου—που διαχέουν πληροφορία σχετικά με τη ροή των διεργασιών του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, εντοπίζονται ανωμαλίες και ταξινομούνται κακόβουλες ενέργειες βάσει του πλαισίου MITRE ATT&CK, το οποίο αποτυπώνει κάθε επίθεση ως αλληλουχία από exploits.

Δημιουργήθηκε μια πλήρη, ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδίασης του αισθητήρα αυτού που καλύπτει όλα τα στάδια: από τη συλλογή κατάλληλου dataset—το οποίο παράγεται μέσω μιας n-gram προσέγγισης που μιμείται τη συμπεριφορά του κακόβουλου λογισμικού μέσα από την αποσύνθεσή του σε MITRE ATT&CK exploits—έως τη μηχανική χαρακτηριστικών (feature engineering) που περιλαμβάνει επιλογή (feature selection) και κανονικοποίηση (normalization) τους. Στη συνέχεια, εκπαιδεύονται και αξιολογούνται τρεις τύποι ταξινομητών DL—Fully Connected Networks (FCN), Convolutional Neural Networks (CNN) και Recurrent Neural Networks με LSTM (RNN/LSTM)—με στόχο την επίτευξη υψηλής ακρίβειας (Accuracy) και χαμηλών ποσοστών ψευδώς θετικών (FPR) και ψευδώς αρνητικών (FNR) συναγερμών.

Για την ανίχνευση πολύπλοκης κακόβουλης συμπεριφοράς, η μέθοδος στηρίζεται στην αναγνώριση των MITRE ATT&CK exploits μέσα στην πραγματική ροή υπολογισμών της συσκευής Linux, όπως αυτή αντικατοπτρίζεται στις μετρικές CPU load, memory usage και disk utilization. Επιπλέον, η λύση υποστηρίζει ευέλικτους μηχανισμούς αναφοράς: είτε με προκαθορισμένο rolling σε τακτά διαστήματα, είτε μέσω κανόνων ενεργοποίησης (triggers), οι οποίοι αποστέλλουν τα αποτελέσματα σε ένα κεντρικό SIEM ή άλλο σύστημα παρακολούθησης μέσω REST ή Message Broker. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα παραμένει ανεξάρτητο από sandboxed περιβάλλοντα, εκμεταλλεύεται μόνο τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος και προσφέρει αξιόπιστη, ολοκληρωμένη και σε πραγματικό χρόνο ταξινόμηση κακόβουλων δραστηριοτήτων.

2.16.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

2.16.4.1 Εφαρμογή PQ-EDHOC

Η ανοιχτού κώδικα υλοποίηση του PQ-EDHOC είναι διαθέσιμη στο GitHub, συμπεριλαμβανομένων του κώδικα και της τεκμηρίωσης. Όπως αναφέρεται στο P2.1, η υλοποίηση βασίζεται στη βιβλιοθήκη uOSCORE-uEDHOCⁱⁱⁱ, μια ελαφριά βιβλιοθήκη C για EDHOC και OSCORE, ανεξάρτητη από το λειτουργικό σύστημα, σχεδιασμένη για μικροελεγκτές και βελτιστοποιημένη για χρήση μόνο στο stack.

Οι λειτουργίες PQC ενσωματώθηκαν στον crypto-wrapper της βιβλιοθήκης, προσθέτοντας υποστήριξη για PQC KEMs, ψηφιακές υπογραφές PQC και επαλήθευση πιστοποιητικών PQ-X.509. Εφαρμόζουμε τις αρχιτεκτονικές τροποποιήσεις που εξηγήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα στη βιβλιοθήκη UEDHOC. Επιπλέον, ο κώδικας της βιβλιοθήκης προσαρμόστηκε ώστε τα μεγέθη των buffer να μπορούν να

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής καλύψουν τις αυξημένες απαιτήσεις δεδομένων του PQC σε σύγκριση με την κλασική Κρυπτογραφία Δημόσιου Κλειδιού (PKC), ενώ παράλληλα επιτρέπει τον καθορισμό των μεγεθών των buffer κατά τον χρόνο μεταγλώττισης, με βάση τους επιλεγμένους αλγορίθμους PQC.

Τέσσερις κρυπτογραφικές μονάδες εξασφαλίζουν τη διαλειτουργικότητα: η liboqs^{iv} και η tpmq^v για συστήματα βασισμένα σε Linux με μη περιορισμένους πόρους, ενώ τα pqm4^{vi} και PQClean^{vii} χρησιμοποιούνται στο Zephyr OS^{viii} για ενσωματωμένα συστήματα με επεξεργαστές Cortex-M4. Επιπλέον, για να αξιολογηθούν σε πραγματικά σενάρια περιορισμένων δικτύων, τα μηνύματα CoAP πρέπει να διασπαστούν χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό CoAP Block-Wise Transfer^{ix}. Για αυτό, η βιβλιοθήκη libcoap ενσωματώθηκε στα παραδείγματα Linux και η CoAP API χρησιμοποιήθηκε από το υποσύστημα δικτύου του Zephyr OS για το ενσωματωμένο σύστημα. Οι συναρτήσεις callback Tx/Rx EDHOC υλοποιήθηκαν για να διαχειρίζονται τη μετάδοση και λήψη των μηνυμάτων.

Η αυτόνομη μονάδα PQ-EDHOC απαιτεί τα υποστηριζόμενα IANA σύνολα κρυπτογραφικών αλγορίθμων και τα πιστοποιητικά αυθεντικοποίησης PQ ως υποχρεωτικά δεδομένα εισόδου. Για την αυθεντικοποίηση του άλλου μέρους σε μια διαδικασία αμοιβαίας αυθεντικοποίησης, η μονάδα πρέπει να διαθέτει τα πιστοποιητικά αυθεντικοποίησης του άλλου μέρους, τα οποία πρέπει να είναι προεγκατεστημένα ή αποκτημένα εκτός δικτύου, ή το δημόσιο κλειδί και το πιστοποιητικό CA, εάν χρησιμοποιείται υποδομή δημόσιου κλειδιού. Η μονάδα εξάγει ένα κοινό OSCORE security context για κάθε μέρος, που περιλαμβάνει ένα OSCORE master secret και ένα OSCORE master salt, χρησιμοποιώντας τη διεπαφή EDHOC Exporter. Επίσης, επιστρέφει κλειδιά σταθερού μήκους, ψευδοτυχαία (PRK) που προκύπτουν από τα κοινά μυστικά PQ, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλους εφαρμοσμένους αλγορίθμους ασφαλείας, εάν χρειαστεί.

2.16.4.2 Αποτελέσματα Επιταχυντή Υλικού

Υλοποιώντας τον επιταχυντή που σχεδιάστηκε με τη χρήση HLS στην πλακέτα Zynq Ultrascale+ MPSoC, πετύχαμε συχνότητες 150–400 MHz, ανάλογα με τους χρονικούς περιορισμούς που ορίσαμε. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματά μας για μια υλοποίηση NTT με $n=256$ και 23-bit αριθμούς συμπεριλαμβανοντας και την εύρεση υπολοίπου πολυωνύμων με τη μέθοδο του Montgomery για το Dilithium, όπου έχουμε ως modulo $q=8380417$. Σε σύγκριση με άλλες υλοποιήσεις radix-2 NTT, πετυχαίνουμε σημαντική μείωση των κύκλων καθυστέρησης, περίπου 50%, χωρίς αύξηση των υπόλοιπων πόρων σε ανάλογο βαθμό. Ωστόσο, σε σύγκριση με εργασίες που αφορούν υλοποιήσεις radix-4 NTT, διαπιστώνουμε ότι ο HLS synthesizer βελτιστοποιεί το σχεδιασμό κοντά στο βέλτιστο όριο καθυστέρησης, ενώ ο δικός μας σχεδιασμός υστερεί ελαφρώς. Σε σχέση με άλλες πλήρεις υλοποιήσεις υλικού για πολλαπλασιαστή NTT μια υλοποίηση χρησιμοποιώντας γλώσσα περιγραφής υλικού σε Spartan-6· μετατρέψαμε τους πόρους των συγκεκριμένων slices της πλακέτας σε LUTs και FFs για να κάνουμε σύγκριση, επιτυγχάνοντας σχεδιασμό συγκρίσιμων επιδόσεων.

Αλγόριθμος	Καθυστέρηση (CC)	LUT	FF	BRAM	DSP	B
NTT	1424	2015	1371.0	5.0	12	2.0
NTT (Mert et al.)	2308	63241	19387.0	-	48	1.0
NTT (Mert et al.)	3075	12565	-	48.0	32	8.0
NTT (Nguyen et al.) ⁴	294	1977	2329.0	2.0	8	4.0
INTT	1621	2515	1747.0	5.0	24	2.0
Πολλαπλασιαστής ¹	4602	4918	3728.0	10.0	50	2.0
Πολλαπλασιαστής ²	3178	6933	5099.0	15.0	62	2.0
Πολλαπλασιαστής (Mert)	7969	3432	4448.0	14.0	14	-

2.16.4.3 Αποτελέσματα Αισθητήρων Ανίχνευσης ανωμαλιών/είσβολών ασφαλείας.

Για να παρασχεθεί ένα λειτουργικό proof-of-concept, επιλέξαμε να εστιάσουμε σε ένα σενάριο χρήσης, το malware SysJoker, για το οποίο δεν υπάρχει προς το παρόν γνωστό δημόσια διαθέσιμο σύνολο δεδομένων. Το SysJoker είναι ένα backdoor malware, που ανακαλύφθηκε τον Δεκέμβριο του 2021 από

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής την Intezer, μια εταιρεία λογισμικού. Το SysJoker είναι πολυπλατφορμικό malware συστήματος, ικανό να μολύνει Windows, Linux και MacOS.

Το SysJoker εμφανίζεται ως ενημέρωση συστήματος και δημιουργεί τις δικές του εγγραφές domain για το Command and Control (C2) αποκωδικοποιώντας ένα string που ανακτάται από το Google Drive. Το malware είναι γραμμένο σε C++ και λειτουργεί διαφορετικά ανάλογα με το στοχευόμενο λειτουργικό σύστημα. Βάσει του Attack Graph του SysJoker από την AttackIQ, το πιο ενδιαφέρον στοιχείο είναι ο συσχετισμός της συμπεριφοράς του malware με τις τεχνικές που ορίζονται στη βάση γνώσεων MITRE ATT&CK. Συνεπώς αποτελεί καλό σενάριο επαλήθευσης καλής λειτουργίας του αισθητήρα μας. Εξετάζεται συνεπώς η ακρίβεια των μοντέλων του αισθητήρα ξεχωριστά ως φαίνεται παρακάτω.

Το FCN μοντέλο επέδειξε καλή απόδοση όσον αφορά το ποσοστό ψευδώς θετικών (FPR), ωστόσο παρουσίασε σημαντική αδυναμία στο ποσοστό ψευδώς αρνητικών (FNR). Συγκεκριμένα, το μοντέλο με χρονικό παράθυρο μεγέθους (20,20) βρέθηκε το πιο αποδοτικό ως προς την ακρίβεια, με συνολική ακρίβεια 94,43 %. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο ταξινομήσε το 67,71 % των στιγμιοτύπων SysJoker malware ως κανονικά, καθιστώντας το μη αξιόπιστο. Η υψηλή τιμή του FPR συνέβαλε κυρίως στην συνολική ακρίβεια του μοντέλου.

Το CNN μοντέλο πέτυχε FPR 0,06%, FNR 20,04 % και ακρίβεια (ACY) 98,29% με παράθυρο (20,20). Με παράθυρο (40,20), το FPR βελτιώθηκε σε 0,32% ενώ το FNR μειώθηκε σε 4,3 %, σημαντικά καλύτερο από το 20,04% του (20,20), και η ακρίβεια δοκιμών ανήλθε σε 99,35%. Η αύξηση του παραθύρου σε (60,20) δεν βελτίωσε περαιτέρω την απόδοση: το FPR και το FNR έγιναν 1,29% και 8,06% αντίστοιχα, και η ακρίβεια έπεσε σε 98,15%. Το CNN με (40,20) ξεπέρασε τόσο το (20,20) όσο και το (60,20), ταξινομώντας μόνο το 4,3 % των στιγμιοτύπων malware ως κανονικά και το 0,32 % των κανονικών περιπτώσεων ως επίθεση SysJoker. Επιπλέον, το CNN αριστεύει σε σχέση με οποιοδήποτε παράθυρο του FCN, κάτι αναμενόμενο καθώς τα CNN μπορούν να εξάγουν πιο αποδοτικά πρότυπα σε σχέση με τα FCN.

Το LSTM μοντέλο έδειξε βέλτιστα αποτελέσματα με παράθυρο (60,20), επιτυγχάνοντας τα χαμηλότερα FPR και FNR, 0,23% και 3,47% αντίστοιχα, και την υψηλότερη ακρίβεια 99,51%. Αντίθετα, με παράθυρο (40,20) το LSTM παρουσίασε την χειρότερη απόδοση, με FPR 1,57% και FNR 5,61%, οδηγώντας σε ακρίβεια 98,09%. Το παράθυρο (20,20) απέδωσε μετρίως: FPR 0,88%, FNR 7,05 % και ακρίβεια 98,62%. Το LSTM με (60,20) ξεπέρασε το CNN με (40,20) κατά -0,09% στο FPR, -0,87% στο FNR και +0,16% στην ακρίβεια. Συνεπώς, το LSTM μοντέλο επέδειξε υψηλότερη απόδοση σε όλες τις μετρικές σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο χρησιμοποιηθέν μοντέλο, όπως ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι τα LSTM μπορούν να συλλαμβάνουν χρονοεξαρτήσεις σε σειρές δεδομένων πιο εξελιγμένα.

2.17 Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα

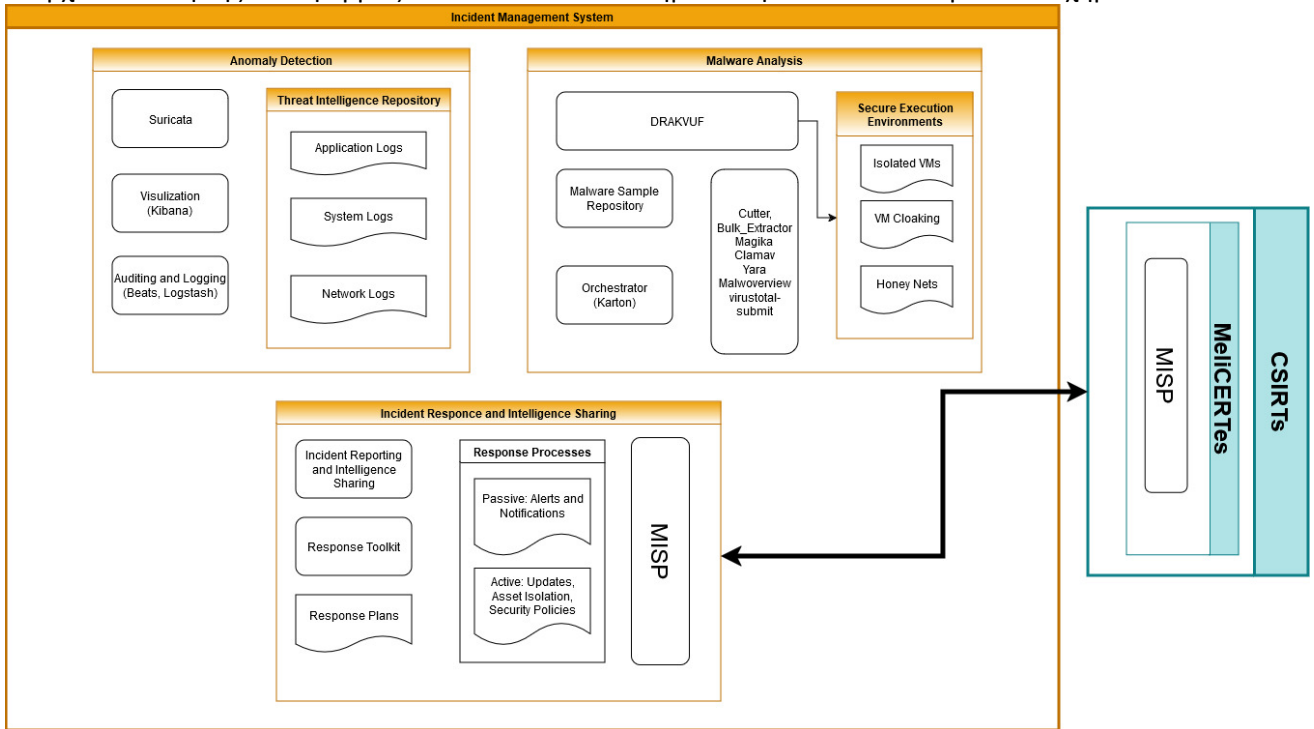
2.17.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Στην παρούσα τελική έκδοση έχουν ολοκληρωθεί οι παρακάτω εργασίες.

1. Συλλογή εγκατάσταση και παραμετροποίηση των επιμέρους εργαλείων
 - a. στατικής και δυναμικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού
 - b. cyber threat intelligence και καταγραφής και αναγνώρισης ανωμαλιών
 - c. αντιμετώπισης συμβάντων και διαμοιρασμού πληροφοριών
2. Ολοκλήρωση των εργαλείων στατικής ανάλυσης με τη βοήθεια του orchestrator.
3. Αυτόματη καταγραφή συμβάντων μετά την στατική και δυναμική ανάλυση κακόβουλου λογισμικού.
4. Εγκατάσταση και δοκιμαστική λειτουργία των agents συλλογής δεδομένων του υποσυστήματος αναγνώρισης ανωμαλιών.
5. Ολοκλήρωση των εργασιών ολοκλήρωσης των δύο υποσυστημάτων με το υποσύστημα αντιμετώπισης συμβάντων.
6. Δοκιμαστική λειτουργία της ενοποιημένης λύσης.

2.17.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας σε επίπεδο υποσυστημάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 133 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης συστήματος

Τα κύρια υποσυστήματα είναι:

1. Το υποσύστημα στατικής και δυναμικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού
2. Το υποσύστημα cyber threat intelligence και καταγραφής και αναγνώρισης ανωμαλιών
3. Το υποσύστημα ανάλυσης και αντιμετώπισης συμβάντων σε συνδυασμό με το υποσύστημα διαμοιρασμού πληροφοριών

Τα υποσυστήματα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης ανάλυσης και αντιμετώπισης συμβάντων κυβερνοασφάλειας και του διαμοιρασμού των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με εξωτερικούς οργανισμούς όπως οι εθνικοί CSIRTs (Computer Security Incident Response Teams).

Το υποσύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού παρέχει ασφαλές περιβάλλον εκτέλεσης (DrakVuf) για την δυναμική ανάλυση δειγμάτων κακόβουλου λογισμικού με τη μορφή virtual machines τα οποία είναι δομημένα, έτσι ώστε να μην γίνονται ορατά στο κακόβουλο λογισμικό (VMCloak). Επίσης παρέχει ένα σετ από εργαλεία στατικής ανάλυσης (PyREBox, SSMA, bamfdetect, Mal Tindex) σε συνδυασμό με classifiers που αποφασίζουν για το αν ένα λογισμικό φαίνεται να συμπεριφέρεται με κακόβουλο τρόπο ή όχι.

Το υποσύστημα cyber threat intelligence, καταγραφής και αναγνώρισης ανωμαλιών καταγράφει και αναλύει ανωμαλίες στην λειτουργία, στην συμπεριφορά και στο δικτύου συσκευών του οργανισμού. Αποτελείται από μια σειρά agents που είναι εγκατεστημένοι στα endpoints της υποδομής όπως και στις ίδιες τις βιομηχανικές συσκευές οι οποίοι συλλέγουν και διαμοιράζουν αρχεία καταγραφής λειτουργίας των endpoints και των συσκευών. Η συλλογή των καταγραφών γίνεται με τα εργαλεία Bezats και WinBeats.

Στο υποσύστημα καταγραφής και ανάλυσης συμβάντων όπου χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο MISP, γίνεται δομημένη καταγραφή του εκάστοτε συμβάντος μαζί με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που το συνοδεύουν. Η κάθε καταγραφή εμπλουτίζεται με πληροφορίες παρόμοιων συμβάντων και επιθέσεων που συλλέγονται από εξωτερικές πηγές με τη βοήθεια του cyber threat intelligence εργαλείου IntelMQ.

2.17.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Το αρχικό βήμα ήταν να παραμετροποιηθεί ένας εξυπηρετητής ως Hypervisor, ο οποίος θα φιλοξενεί όλες τις εικονικές μηχανές που θα χρειαστούν για την υλοποίηση του Project. Ο εξυπηρετητής που επιλέχθηκε είναι ένα Hewlett Packard φυσικό μηχάνημα στον οποίο εγκαταστάθηκε το λογισμικό Proxmox. Το Proxmox είναι ανοιχτό λογισμικό βασισμένο σε Linux Debian που επιτρέπει στους διαχειριστές του να δημιουργούν, να διαχειρίζονται και να παραμετροποιούν εικονικές μηχανές. Επιπρόσθετα, το λογισμικό Proxmox παρέχει την δυνατότητα να αναγνωρίζει εξωτερικά μέσα αποθήκευσης τα οποία δεν αποτελούν μέρος του αρχικού φυσικού μηχανήματος. Τα μέσα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από όλες τις εικονικές μηχανές που δημιουργούνται μέσα στον Hypervisor. Για το συγκεκριμένο Project δημιουργήθηκαν έξι εικονικές μηχανές, για τις οποίες ακολουθεί αναλυτική περιγραφή.

2.17.3.1 VPN-Server

Για λόγους ασφαλείας αποφασίστηκε να εγκατασταθεί ένας VPN server, ο οποίος θα είναι η μοναδική εικονική μηχανή με πρόσβαση στο διαδίκτυο. Έχει εγκατεστημένες δύο κάρτες δικτύου για πρόσβαση σε δύο διαφορετικά δίκτυα. Η μία κάρτα επικοινωνεί με το τοπικό δίκτυο της υποδομής έχοντας επικοινωνία με την προεπιλεγμένη πύλη και το διαδίκτυο, και η άλλη κάρτα επικοινωνεί με το απομονωμένο εσωτερικό δίκτυο της φάρμας των εικονικών μηχανών. Με αυτό τον τρόπο προστίθεται ασφάλεια στο συνολικό περιβάλλον, εφόσον δεν εκτίθενται όλες οι εικονικές μηχανές στο διαδίκτυο, παρά μόνο οι θύρες που απαιτούνται για την λειτουργία VPN. Το λογισμικό παροχής VPN υπηρεσιών που εγκαταστάθηκε, είναι το λογισμικό ανοιχτού κώδικα Wireguard. Για την επικοινωνία ανταλλάζονται κλειδιά κρυπτογράφησης μεταξύ του client και του server με σκοπό την δημιουργία ενός ασφαλούς tunnel επικοινωνίας μεταξύ τους. Όλη η πληροφορία που περνά μέσα από αυτό το tunnel είναι κρυπτογραφημένη, το οποίο καθιστά την υποκλοπή δεδομένων ανέφικτη. Η κάθε τερματική συσκευή που χρειάζεται να συνδεθεί με τον VPN-Server θα πρέπει να έχει εγκατεστημένη στο λειτουργικό της σύστημα ένα λογισμικό για VPN υπηρεσίες το οποίο θα πρέπει να υποστηρίζει το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί το λογισμικό Wireguard.

2.17.3.2 Υποσύστημα αναγνώρισης ανωμαλιών

Το υποσύστημα αναγνώρισης ανωμαλιών αποτελείται από ένα Intrusion Detection System (Suricata) και πολλαπλά instances εργαλείων συλλογής δεδομένων (logstash).

Το Suricata είναι μια μηχανή ανίχνευσης απειλών ανοιχτού κώδικα, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως σύστημα ανίχνευσης εισβολής (IDS) και σύστημα πρόληψης εισβολής (IPS) ή να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ασφάλειας δικτύου. Ως ένα δωρεάν και ισχυρό εργαλείο, το Suricata παρακολουθεί την κυκλοφορία του δικτύου χρησιμοποιώντας ένα εκτενές σύνολο κανόνων και μια γλώσσα υπογραφής. Στο έργο χρησιμοποιήθηκε μόνο η λειτουργία IDS του Suricata. Ως παθητικό IDS, το Suricata μπορεί να παρακολουθεί όλη την κίνηση που περνά μέσα από το δίκτυο και να ειδοποιεί τον διαχειριστή όταν συναντήσει οτιδήποτε κακόβουλο ή έστω με κακόβουλη συμπεριφορά. Πραγματοποιεί ανάλυση πακέτων του δικτύου με βάση κάποιες βιβλιοθήκες που διατηρεί και επιπρόσθετα συγκρίνει την ροή της κίνησης με συγκεκριμένα μοτίβα ρών τα οποία είναι αναγνωρισμένα ως απειλές. Τα συμβάντα καταγράφονται σε αρχεία καταγραφών στον διακομιστή και αποστέλλονται μέσω του logstash στο κεντρικό σύστημα καταγραφής συμβάντων του έργου και σε μία πλατφόρμα γραφικών αναλύσεων, όπου τα δεδομένα παρουσιάζονται με πιο φιλική μορφή προς τον χρήστη.

2.17.3.3 Υποσύστημα καταγραφής και ανάλυσης συμβάντων.

Για την καταγραφή και ανάλυση συμβάντων χρησιμοποιείται ο συνδυασμός βάσης δεδομένων (Elastic Search) και εργαλείου visualization (Kibana). Το Elastic Search και το Kibana είναι δύο διαφορετικά εργαλεία τα οποία αλληλοσυμπληρώνονται για την άψογη εμπειρία του χρήστη. Το Elasticsearch δίνει την δυνατότητα αποθήκευσης, αναζήτησης και ανάλυσης τεράστιων όγκων δεδομένων σε υπερβολικά μικρό χρόνο και παράγει αποτελέσματα σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Είναι σε θέση να επιτύχει γρήγορες απαντήσεις αναζήτησης επειδή αντί να αναζητά απευθείας το κείμενο, αναζητά ένα ευρετήριο.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Χρησιμοποιεί μια δομή που βασίζεται σε έγγραφα αντί για πίνακες και σχήματα και συνοδεύεται από εκτεταμένα API REST για την αποθήκευση και την αναζήτηση των δεδομένων.

Το kibana είναι μία πλατφόρμα που δίνει σχήμα και μορφή στα δεδομένα που διαβάζει από το elastic search ανάλογα με τις ρυθμίσεις που κάνει ο διαχειριστής. Υπάρχει δυνατότητα διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων αυτών, καθώς επίσης και έλεγχος προσβασιμότητας στην πλατφόρμα ανάλογα με την φύση του χρήστη που συνδέεται σε αυτήν. Το μεγάλο πλεονέκτημα του είναι πως μπορεί να δουλέψει με δεδομένα παντός τύπου. Τα δεδομένα μπορεί να είναι δομημένο ή μη δομημένο κείμενο, αριθμητικά δεδομένα, δεδομένα χρονοσειρών, γεωχωρικά δεδομένα, αρχεία καταγραφής, μετρήσεις, συμβάντα ασφαλείας και άλλα. Ανεξάρτητα από τα δεδομένα, το Kibana μπορεί να βοηθήσει στην ανακάλυψη μοτίβων και σχέσεων ακόμα και να οπτικοποιήσει τα αποτελέσματα.

2.17.3.4 Υποσύστημα στατικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού.

Το υποσύστημα στατικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού αποτελείται από πλήθος μικρών και στοχευμένων εργαλείων στατικής ανάλυσης και έναν orchestrator που αναλαμβάνει την διεκπεραίωση της ανάλυσης με τα εργαλεία αυτά.

Σε αυτόν τον διακομιστή είναι εγκατεστημένο το λειτουργικό σύστημα Ubuntu και πάνω σε αυτό έχουν εγκατασταθεί εξειδικευμένα εργαλεία στατικής ανάλυσης όπως το Cutter, το Magika, το Bulk_Extractor, το Clamav, το Yara, το Malwareview και το Virustotal-submit. Ως στατική ανάλυση ορίζεται η τεχνική που εξετάζει τον κώδικα και τις ιδιότητες ενός κακόβουλου αρχείου χωρίς να το εκτελεί.

Επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά των εργαλείων που εγκαταστάθηκαν φαίνονται παρακάτω:

- Cutter: ένας ισχυρός αποσυναρμολογητής που μου επιτρέπει να μεταφράσω τον κρυπτικό κώδικα της μηχανής σε μια πιο αναγνώσιμη από τον άνθρωπο μορφή.
- Magika: Ένα εργαλείο ανοιχτού κώδικα που εντοπίζει με ακρίβεια τύπους δυαδικών αρχείων και αρχείων κειμένου. Χρησιμοποιεί ένα εξαιρετικά βελτιστοποιημένο μοντέλο βαθιάς μάθησης, που επιτρέπει την ακριβή αναγνώριση τύπων αρχείων μέσα σε κλάσματα δευτερολέπτου.
- Bulk_Extractor: Ένα πρόγραμμα C++ που σαρώνει ένα δίσκο, ένα αρχείο ή έναν κατάλογο αρχείων και εξάγει χρήσιμες πληροφορίες χωρίς να αναλύει το σύστημα αρχείων ή τις δομές του συστήματος αρχείων. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία χαρακτηριστικών που μπορούν εύκολα να αναλυθούν ή να υποβληθούν σε επεξεργασία με αυτοματοποιημένα εργαλεία
- Clamav: Ένα εργαλείο ανίχνευσης κακόβουλου λογισμικού που χρησιμοποιεί μερικές βάσεις δεδομένων ορισμών που περιέχουν αποτυπώματα δειγμάτων κακόβουλου λογισμικού
- Yara: Ένα εργαλείο που στοχεύει (αλλά δεν περιορίζεται σε) να βοηθήσει τους ερευνητές κακόβουλου λογισμικού να εντοπίσουν και να ταξινομήσουν δείγματα κακόβουλου λογισμικού. Με το YARA μπορούν να δημιουργηθούν περιγραφές οικογενειών κακόβουλου λογισμικού βάσει κειμένου ή δυαδικών μοτίβων. Κάθε περιγραφή, γνωστός και ως κανόνας, αποτελείται από ένα σύνολο συμβολοσειρών και μια δυαδική έκφραση που καθορίζουν τη λογική της
- Malwareview: Ένα εργαλείο αναζήτησης απειλών πρώτης απάντησης που εκτελεί έναν γρήγορο και αρχικό έλεγχο δειγμάτων κακόβουλου λογισμικού, διευθύνσεων URL, διευθύνσεων IP, domains, οικογενειών κακόβουλου λογισμικού, IOC και Hashes. Είναι σε θέση να λαμβάνει αναφορές δυναμικής και στατικής συμπεριφοράς, να ανεβάζει και να κατεβάζει δείγματα από διάφορα Endpoints. Το εργαλείο προσφέρει πληροφορίες νοημοσύνης από Virus Total, Hybrid Analysis, URLHaus, Polyswarm, Malshare, Alien Vault, Malpedia, Malware Bazaar, ThreatFox, Triage, InQuest.
- Virustotal-submit: Ένα εργαλείο που αναλαμβάνει την μεταφόρτωση του sample στο VirusTotal και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανάλυσης. Το VirusTotal επιθεωρεί στοιχεία με πάνω από 70 σαρωτές προστασίας από ιούς και υπηρεσίες αποκλεισμού διευθύνσεων URL/τομέων. Κατά την υποβολή ενός αρχείου ή μιας διεύθυνσης URL, τα βασικά αποτελέσματα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

κοινοποιούνται στον υποβάλλοντα, καθώς και μεταξύ των χρηστών που εξετάζουν αρχεία, οι οποίοι χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα για να βελτιώσουν τα δικά τους συστήματα.

Για τον αυτοματισμό της στατικής ανάλυσης έχει χρησιμοποιηθεί το εργαλείο Karton που δρα ως orchestrator και αναλαμβάνει να καλεί παράλληλα όλα τα παραπάνω εργαλεία, να συλλέγει τα αποτελέσματα ανάλυσης και να τα στέλνει, μέσω REST Interface, στο MISP για την καταγραφή και ανάλυση συμβάντος κυβερνοασφάλειας.

2.17.3.5 Υποσύστημα δυναμικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού

Το υποσύστημα δυναμικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού αποτελείται κυρίως από το εργαλείο Drakvuf και την υποδομή για δημιουργία και διαχείριση εικονικών μηχανών που δρούν ως sandbox για την εκτέλεση και ανάλυση του κακόβουλου λογισμικού.

Το Drakvuf είναι ένα αυτοματοποιημένο εργαλείο black-box ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού. Παρέχει ένα φιλικό γραφικό περιβάλλον που επιτρέπει στους χρήστες να ανεβάσουν αρχεία προς ανάλυση. Κατά το ανέβασμα του αρχείου το Drakvuf εκκινεί μία εικονική μηχανή με Hypervisor τον εαυτό του και εκεί εκτελεί και αναλύει το αρχείο. Τρέχοντας τα ύποπτα αρχεία σε εικονικές μηχανές που βρίσκονται σε πλήρως απομονωμένο περιβάλλον, δεν υπάρχει καμία πιθανότητα το κακόβουλο λογισμικό, αν υπάρχει, να βλάψει τον διακομιστή ή κάποια άλλη συσκευή μέσα στο δίκτυο. Οι διαχειριστές μπορούν να δουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης στο ίδιο γραφικό περιβάλλον, αλλά σε διαφορετικό μενού. Από τις πληροφορίες που εξάγονται από εκεί, μπορεί να διαπιστωθεί εάν το αρχείο που υποβλήθηκαν από τον χρήστη είναι κακόβουλο ή όχι. Ο τρόπος ανάπτυξης προγραμματιστικά του Drakvuf, του δίνει την δυνατότητα να μην γίνεται αντιληπτό από έξυπνα κακόβουλα λογισμικά ότι αναλύεται από εικονική μηχανή σε απομονωμένο περιβάλλον. Αυτό το καθιστά ίσως το καλύτερο sandbox εργαλείο ανοιχτού κώδικα αυτήν την στιγμή. Στο έργο έγινε προσπάθεια εγκατάστασης του Drakvuf σε εικονική μηχανή της φάρμας, αλλά αντιμετωπίστηκαν προβλήματα στην λειτουργία του. Δεν υπήρξε συνεργασία μεταξύ του κεντρικού Hypervisor με αυτόν του ίδιου του Drakvuf όταν σηκώνει την εικονική μηχανή για να πραγματοποιήσει την ανάλυση. Έπειτα από πολλές προσπάθειες, η εγκατάσταση του πραγματοποιήθηκε σε φυσικό υλικό όπου λειτούργησε χωρίς κανένα απολύτως πρόβλημα.

2.17.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και επεξηγούνται τα αποτελέσματα από την τελική έκδοση της υλοποίησης του έργου.

Αναγνώριση Ανωμαλιών. Στο παρακάτω παράδειγμα το Suricata δέχεται σαν είσοδο μία ροή δικτυακής κίνησης που είναι αποθηκευμένη ως αρχείο .pcap. Το Suricata εκκινεί την διαδικασία και μετά το πέρας της, δημιουργεί ένα αρχείο καταγραφής το οποίο αποστέλλεται στο εργαλείο MISP. Το MISP θα εξετάσει το αρχείο, θα το αναλύσει με βάση τους κανόνες του και θα αποφασίσει αν απαιτείται η δημιουργία ενός event.

```
root@suricata-server: /home/suricata-server/workspace
```

```
root@suricata-server:/home/suricata-server/workspace# python3 run_it_and_misp_it.py
t "Link to Suricata fast.log in S3"
[*] Running command: sudo suricata -c /etc/suricata/suricata.yaml -r ../traffic.pcap
i: suricata: This is Suricata version 7.0.5 RELEASE running in USER mode
i: threads: Threads created -> RX: 1 W: 4 FM: 1 FR: 1 Engine started.
i: suricata: Signal Received. Stopping engine.
i: pcap: read 1 file, 6033 packets, 3152013 bytes
[+] Command executed successfully.
[*] Uploading file to S3...
[+] File uploaded to S3: http://10.10.192.126:9000/suricata/fast.log
[*] Creating MISP event with external link...
[+] MISP event created successfully. Event ID: 60
root@suricata-server:/home/suricata-server/workspace#
```

P2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Στο MISP δημιουργήθηκε ένα event με μοναδικό ID και στον αρχικό πίνακα εμφανίζονται γενικές πληροφορίες όπως η ημερομηνία, ο χρήστης, το επίπεδο επικινδυνότητας και αν το συμβάν έχει μοιραστεί σε κάποια κοινότητα ή είναι μόνο για ιδιωτική προβολή.

The screenshot displays the MISP interface. On the left is a sidebar with navigation options like 'View Event', 'Edit Event', and 'Publish Event'. The main area shows the details of an event titled 'Suricata analysis of traffic.pcap'. Key information includes: Event ID: 60, UUID: 3fb688c-5992-4639-a1f3-202eect36a49, Creator org: ORGNAME, Owner org: ORGNAME, Creator user: admin@admin.test, Date: 2025-08-01, Threat Level: Medium, and Analysis: Completed. A red warning box states: 'Contextualisation: Your event has neither tags nor galaxy clusters attached...'. Below the details is a 'Galaxies' section with a search box and '+ Add' button. On the right, a 'Related Events' table lists several events with columns for OR, Date, and Count.

Στον επόμενο τομέα του συμβάντος εμφανίζονται αναλυτικότερες πληροφορίες για το είδος της ανάλυσης που έγινε, ποιο είναι το αρχείο καταγραφής που λήφθηκε, την IP διεύθυνση από την οποία λήφθηκε. Ακόμα, φαίνεται το ιστορικό άλλων συμβάντων με τα ίδια χαρακτηριστικά, καθώς επίσης και οι ενέργειες που μπορεί να προβεί ο χρήστης.

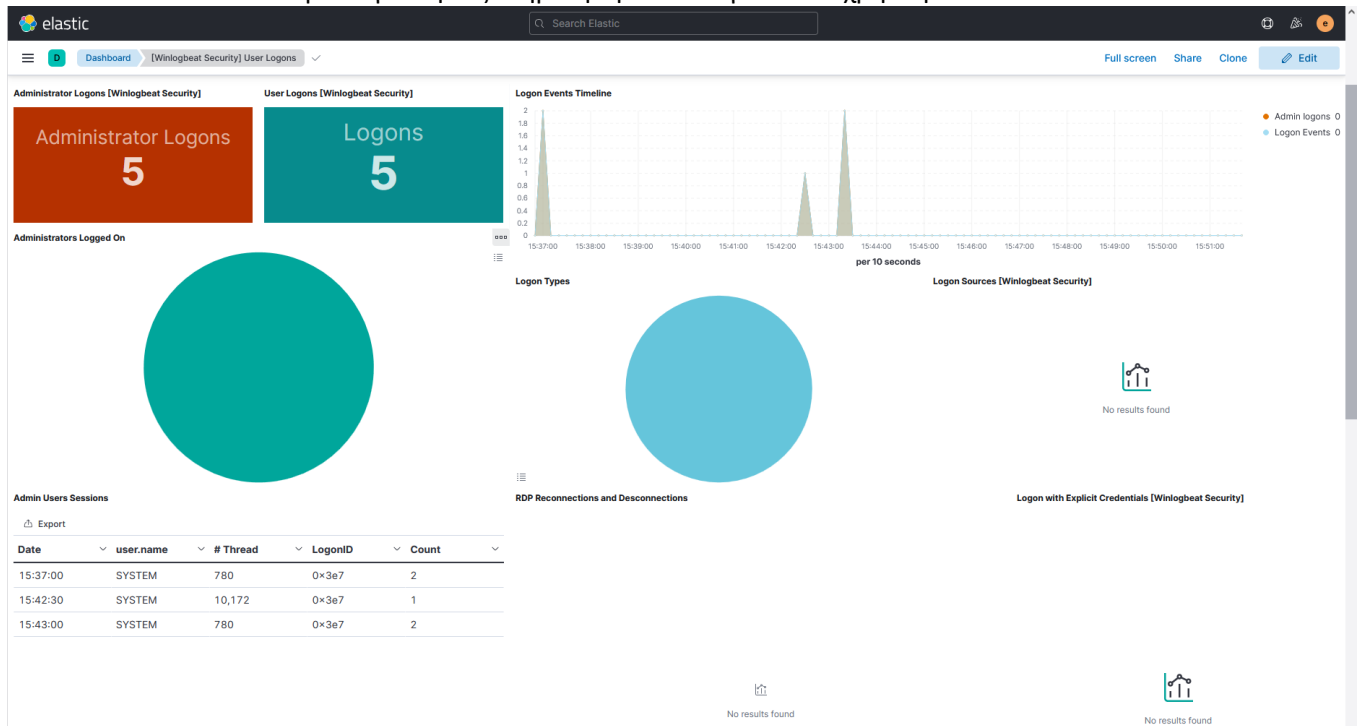
This screenshot shows a table of related events and a discussion section. The table has columns: Date, Org, Category, Type, Value, Tags, Galaxies, Comment, Correlate, Related Events, and Feed hits. One event is listed with Date: 2025-08-01, Category: External analysis, Type: link, Value: <http://10.10.192.126:9000/suricata/fast.log>, Comment: Link to Suricata fast.log in S3, and Related Events: 34 36 37 38. Below the table is a 'Discussion' section with a text input area and a 'Send comment' button.

Τέλος, δίνεται η δυνατότητα κατεβάσματος του αρχείου καταγραφής τοπικά, σε περίπτωση που οι διαχειριστές επιθυμούν να έχουν γνώση βήμα βήμα για την ανάλυση που έκανε το εργαλείο Suricata. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ξεκάθαρα πως το Suricata έχει αναγνωρίσει το κακόβουλο στοιχείο μέσα στην ροή δεδομένων.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

```
fastlog - Notepad
File Edit Format View Help
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49202 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023882:5] ET INFO HTTP Request to a *.top domain [**] [Classification: Potentially Bad Traffic] [Priority: 2] {TCP} 172.16.4.193:49220 -> 198.105.121.50:80
[**] [1:2221001:1] SURICATA HTTP gzip decompression failed [**] [Classification: Generic Protocol Command Decode] [Priority: 3] {TCP} 172.16.4.193:49220 -> 198.105.121.50:80
[**] [1:2221001:1] SURICATA HTTP gzip decompression failed [**] [Classification: Generic Protocol Command Decode] [Priority: 3] {TCP} 198.105.121.50:80 -> 172.16.4.193:49220
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2022962:5] ET EXPLOIT_KIT Evil Redirector Leading to EK Jul 12 2016 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 104.28.18.74:80 -> 172.16.4.193:49195
[**] [1:2024092:4] ET EXPLOIT_KIT Evil Redirector Leading to EK March 15 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 104.28.18.74:80 -> 172.16.4.193:49195
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49223 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49223 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49209 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49209 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49209 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49209 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49215 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49208 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024048:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49208 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2024049:6] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI Struct Mar 13 2017 M2 [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49208 -> 194.87.234.129:80
[**] [1:2023401:8] ET EXPLOIT_KIT RIG EK URI struct Oct 24 2016 (RIG-v) [**] [Classification: Exploit Kit Activity Detected] [Priority: 1] {TCP} 172.16.4.193:49203 -> 194.87.234.129:80
```

Καταγραφή και Ανάλυση Συμβάντων (Event Logging and Visualization). Για τα εργαλεία Elastic-Kibana επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα στοιχεία σχετικά με την είσοδο χρηστών που πραγματοποιήθηκαν στο λειτουργικό σύστημα της εικονικής μηχανής που εξομοιώνει μία τερματική συσκευή σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Winlogbeat, που παρέχει την δυνατότητα καταγραφής όλων των συμβάντων του Event Viewer των Windows και την προώθηση τους στο Elastic Search. Το Kibana αντλεί αυτά τα στοιχεία από την βάση δεδομένων του Elastic Search και οπτικοποιεί τα αποτελέσματα για την εξυπηρέτηση των αναγκών του χρήστη.



Οι στατιστικοί πίνακες που δημιουργούνται, απεικονίζουν το πόσοι χρήστες έκανα είσοδο στο λειτουργικό σύστημα της τερματικής συσκευής, πόσοι από αυτούς ήταν απλοί χρήστες οι διαχειριστές και ποια ημερομηνία και ώρα πραγματοποιήθηκε η ενέργεια εισόδου.

Στατική Ανάλυση Κακόβουλου Λογισμικού. Για την στατική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ένα εκτελέσιμο αρχείο με όνομα bj.exe όπου εξετάστηκε από όλο το σύνολο των εργαλείων. Το αρχείο δηλώνεται σαν

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής είσοδο στον Karton Orchestrator και αυτός με την σειρά του καλεί να εκτελεστούν όλα τα εργαλεία στατικής ανάλυσης. Κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης, στέλνονται τα δεδομένα στο MISP όπου δημιουργείται ένα νέο συμβάν.

```
root@remnux:/home/remnux/workspace# python scanAndMISPIt.py infected/bj.exe
[*] Starting analysis for: bj.exe
[*] Running ClamAV...
[*] Running Ghidra...
[*] Querying VirusTotal...
[*] Running DIEC...
[*] Running FLOSS...
[*] Running PEframe...
[*] Running CAPA...
[*] Running Radare2...
[*] Creating MISP event...
[+] MISP event created successfully.
Event ID: 61
root@remnux:/home/remnux/workspace#
```

Στο συμβάν εμφανίζονται όλες οι γενικές πληροφορίες για τους χρήστες, όπως επίσης και τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων ανά εργαλείο.

The screenshot displays the MISP web interface for an event titled "Automated malware analysis for bj.exe". The event ID is 61. The interface includes a navigation menu on the left with options like "View Event", "Edit Event", and "Publish Event". The main content area shows event details such as UUID, Creator org, Owner org, Creator user, Protected Event status, Tags, Date, Threat Level, Analysis, and Distribution. A prominent red warning box states: "Contextualisation: Your event has neither tags nor galaxy clusters attached - generally adding context to an event allows for quicker decision making and more accurate filtering, it is highly recommended that you label your events to the best of your ability." Below the warning, there are sections for Info, Published status (No), #Attributes (8), First recorded change, Last change, Modification map, and Sightings. The bottom of the interface shows a "Galaxies" section with a search bar and navigation buttons.

Σχεδόν όλα τα εργαλεία εντοπίζουν το trojan που υπάρχει στο αρχείο και κάποια από αυτά αναφέρουν εξειδικευμένες πληροφορίες για αυτό, όπως είναι ο τύπος του, το μέγεθος και το SHA.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Process tree

- Mocked parent (0)
- Mocked parent (288)
- Mocked parent (336)
- Mocked parent (1416)
 - explorer.exe (1000)
 - cmd.exe (540)
 - regsvr32.exe (1852)

Metadata

SHA256	03a0985601b7b6e75036b48b9f835bf8b3d664a894f74e80b761627f4cd69749
Magic bytes	Composite Document File V2 Document, Little Endian, Os: Windows, Version 6.2, Code page: 1252, Author: Administrator, Template: Normal.dotm, Last Saved By: Administrator, Revision Number: 5, Name of Creating Application: Microsoft Office Word, Total Editing Time: 03:00, Create Time/Date: Thu May 12 06:23:00 2016, Last Saved Time/Date: Fri May 13 06:41:00 2016, Number of Pages: 1, Number of Words: 0, Number of Characters: 0, Security: 0
Start command	cmd.exe /C "start winword.exe /L C:\Users\drakvuf\Desktop/sample.doc"
Started at	2025-03-13 09:45:10
Finished at	2025-03-13 09:56:15

Behavioral graph

Analysis logs

apimon
cpuidmon
delaymon
drakrun
exmon
fileextractor
filetracer
inject
librarymon
memdump
parse_errors
procmon
regmon
rpcmon
syscall
sysret
windowmon

[Download dumps](#)

[Download network traffic](#)

Στην αρχική οθόνη παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για το αρχείο, καθώς επίσης και ένα γράφημα συμπεριφοράς κατά την ανάλυση του. Οι πληροφορίες περιέχουν τον τύπο του αρχείου, το SHA και τα timestamps εκκίνησης και ολοκλήρωσης της ανάλυσης. Επειδή το DRAKVUF έχει υψηλές δυνατότητες ανάλυσης, οι εξειδικευμένες πληροφορίες παρουσιάζονται στο κάτω μέρος της αρχικής οθόνης με την μορφή αναδυόμενων μενού αποτελεσμάτων.

Καταγραφή και Διαχείριση Συμβάντων (Incident Management). Η πλατφόρμα MISP δέχεται αρχεία καταγραφής, τα διαβάζει και αν πληρούν τα κριτήρια που έχουν θέσει οι διαχειριστές, δημιουργεί συμβάντα. Η πλατφόρμα αλληλοεπιδρά με όλα τα εργαλεία του έργου είτε απευθείας, είτε μέσω του Karton orchestrator. Στην αρχική οθόνη της πλατφόρμας παρουσιάζονται όλα τα συμβάντα σε μορφή

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής λίστας. Η λίστα είναι κατανομημένη με βάση τον αριθμό ID, όπου ID ένας μοναδικός αριθμός που χαρακτηρίζει το κάθε συμβάν. Οι δυνατότητες ευελιξίας του MISP είναι μεγάλες, αφήνοντας πολύ ελεύθερο χώρο στους διαχειριστές να το προσαρμόσουν στις ανάγκες τους σχεδιαστικά αλλά και δημιουργώντας πολλαπλά σύνολα διαφορετικών κανόνων.

Published	Creator org	Owner org	ID	Clusters	Tags	#Attr	#Corr	Creator user	Date	Last modified at	Info	Distribution	Actions
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	61			8	20	admin@admin.test	2025-08-01	2025-08-01 14:55:22	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	60			1	16	admin@admin.test	2025-08-01	2025-08-01 14:43:22	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	59			8	20	admin@admin.test	2025-07-21	2025-07-21 10:06:01	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	58			8	20	admin@admin.test	2025-07-21	2025-07-21 09:22:19	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	57			8	20	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 22:40:02	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	56			8	20	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 22:38:07	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	55			1	16	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 22:23:46	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	54			1	16	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 22:20:48	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	53			8	20	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 16:23:38	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	52			8	20	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 16:21:52	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	51			1	16	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 14:53:52	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	50			1	16	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 14:26:09	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	49			1	16	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 13:05:11	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	48			8	20	admin@admin.test	2025-04-02	2025-04-02 13:02:22	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	47			8	20	admin@admin.test	2025-03-14	2025-03-14 09:20:03	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	46			1	16	admin@admin.test	2025-03-14	2025-03-14 09:18:57	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	45			8	20	admin@admin.test	2025-03-14	2025-03-14 08:05:57	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	44			1	16	admin@admin.test	2025-03-14	2025-03-14 08:01:07	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	43			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:48:52	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	42			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:48:02	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	41			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:44:36	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	40			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:42:51	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	39			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:42:25	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	38			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:41:30	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	37			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:40:16	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	36			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:39:45	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	35			8	20	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 19:33:06	Automated malware analysis for bj.exe	Organisation	
<input checked="" type="checkbox"/>	ORGNAME	ORGNAME	34			1	16	admin@admin.test	2025-03-13	2025-03-13 18:49:41	Suricata analysis of traffic.pcap	Organisation	

Ο τρόπος εμφάνισης των συμβάντων έχει απεικονιστεί σε προηγούμενες παραγράφους, όπου παρουσιάζονται αποτελέσματα αναλύσεων από εργαλεία του έργου.

2.18 Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ

2.18.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Η υλοποίηση βασίζεται σε δύο βασικούς πυλώνες: την αρχιτεκτονική VoxelPose και την παραλλαγή της για πραγματικό χρόνο, τη FasterVoxelPose. Μαζί επιτρέπουν μια πλήρη εκτίμηση της τρισδιάστατης (3D) στάσης του σώματος, χωρίς επιπλέον επεξεργασία εκτός σύνδεσης.

Στον πυρήνα της VoxelPose βρίσκεται ένας τρισδιάστατος όγκος χαρακτηριστικών (3D feature volume), ο οποίος κατασκευάζεται μέσω επαναπροβολής (back-projection) των δισδιάστατων χαρτών χαρακτηριστικών (2D feature maps) από κάθε κάμερα σε ένα κοινό voxel πλέγμα (voxel grid). Συγκεκριμένα, ένα 2D backbone δίκτυο (όπως ResNet-50) εξάγει χάρτες χαρακτηριστικών από κάθε εικόνα RGB. Αυτοί προβάλλονται μέσω του projection matrix κάθε κάμερας και συνδυάζονται σε έναν πυκνό τρισδιάστατο ταυστή διαστάσεων $X \times Y \times Z$ (π.χ. $80 \times 80 \times 20$ voxels), κωδικοποιώντας πληροφορία από όλες τις γωνίες λήψης σε έναν ενιαίο όγκο.

Αυτός ο όγκος τροφοδοτείται αρχικά στο Cuboid Proposal Network (CPN), το οποίο, με χρήση 3D συνελκτικών στρωμάτων και μη γραμμικών συναρτήσεων ενεργοποίησης, παράγει τρισδιάστατα περιβάλλοντα πλαίσια (cuboids) γύρω από κάθε άτομο, εντοπίζοντας ταυτόχρονα πολλαπλά άτομα σε μία μόνο διέλευση. Για κάθε cuboid, ένας μικρότερος, περικομμένος όγκος εισάγεται στο Pose Regression Network (PRN), ένα συμπαγές 3D CNN με residual blocks και στρώσεις up-sampling, το οποίο βελτιστοποιεί τα χαρακτηριστικά των voxels και παλινδρομεί με ακρίβεια τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των αρθρώσεων. Η πλήρης λειτουργία σε 3D επιτρέπει στη VoxelPose να αποφεύγει σφάλματα από διασταυρούμενη αντιστοίχιση 2D σκελετών και να παρουσιάζει αυξημένη ανθεκτικότητα σε πολύπλοκα περιβάλλοντα με αλληλεπικαλυπτόμενες λήψεις.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Για επιδόσεις σε πραγματικό χρόνο, η FasterVoxelPose αντικαθιστά τα βαριά 3D CNNs μέσω ορθογραφικής προβολής (orthographic projection). Ο συνολικός 3D όγκος χαρακτηριστικών προβάλλεται στα τρία βασικά επίπεδα (XY, XZ, YZ), παράγοντας τρεις δισδιάστατους χάρτες χαρακτηριστικών. Ένα ελαφρύ 2D CNN επεξεργάζεται κάθε προβολή ξεχωριστά: στο επίπεδο XY προβλέπει 2D cuboids για κάθε άτομο, στην προβολή κατά μήκος του άξονα Z εκτιμά το βάθος κάθε ατόμου, ενώ και στις τρεις προβολές δημιουργούνται heatmaps ανά άρθρωση. Οι εκτιμήσεις συνδυάζονται αλγεβρικά — με συγχώνευση των συντεταγμένων XY με το βάθος — ώστε να ανασυντεθούν οι πλήρεις τρισδιάστατες συντεταγμένες των αρθρώσεων. Με αυτόν τον τρόπο, η FasterVoxelPose επιταχύνει την εκτέλεση έως και 10x σε σχέση με την αρχική VoxelPose, διατηρώντας ανταγωνιστική ακρίβεια και καθιστώντας εφικτή την ανάπτυξη σε edge συσκευές σε πραγματικό χρόνο.

Συνολικά, οι δύο αρχιτεκτονικές υλοποιούν μια pipeline που: (α) εντοπίζει άτομα στο χώρο μέσω Mask R CNN, (β) παράγει 2D heatmaps σημείων-κλειδιών μέσω HRNet, (γ) ανυψώνει και συγχωνεύει χαρακτηριστικά από πολλαπλές λήψεις σε μία voxel αναπαράσταση, και στη συνέχεια εφαρμόζει είτε το πλήρες 3D CNN pipeline της VoxelPose για μέγιστη ακρίβεια είτε τα προβολικά μοντέλα της FasterVoxelPose για αυξημένη ταχύτητα.

Η στρατηγική μας βασίζεται στο VoxelPose για την εκτίμηση της 3D στάσης σε πραγματικό χρόνο από live video streams πολλαπλών λήψεων, χωρίς καμία εκ των προτέρων επεξεργασία. Αρχικά, κάθε εικόνα εισόδου επεξεργάζεται από ένα YOLOv5 δίκτυο, το οποίο εντοπίζει τις φιγούρες σε κάθε σκηνή (single forward pass). Το μοντέλο επιλέγεται λόγω της χαμηλής καθυστέρησης και του χαμηλού υπολογιστικού κόστους του (περίπου 48,9 GFLOPs), σε σύγκριση με δίκτυα δύο σταδίων όπως το Mask R-CNN. Εν συνεχεία, μέσα σε κάθε περιβάλλον πλαίσιο, το HRNet παράγει υψηλής ανάλυσης δισδιάστατους heatmaps που κωδικοποιούν τις πιθανότητες εμφάνισης των επιμέρους άκρων του σώματος. Από αυτούς τους heatmaps, κατασκευάζονται δισδιάστατοι σκελετοί ανά κάμερα, συνδέοντας τις πιο πιθανές θέσεις των άκρων. Τέλος, οι 2D σκελετοί από όλες τις όψεις προβάλλονται σε ένα κοινό πλέγμα και συγχωνεύονται μέσω του διαφορίσιμου όγκου συγχώνευσης (differentiable volumetric aggregation) και της 3D παλινδρόμησης του VoxelPose για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των αρθρώσεων στον τρισδιάστατο χώρο. Αυτή η σταδιακή προσέγγιση — ανίχνευση, παραγωγή heatmaps, κατασκευή 2D σκελετών και 3D παλινδρόμηση βάσει voxels— επιτρέπει επεξεργασία καρέ προς καρέ, κατάλληλη για χρήση σε edge συσκευές.

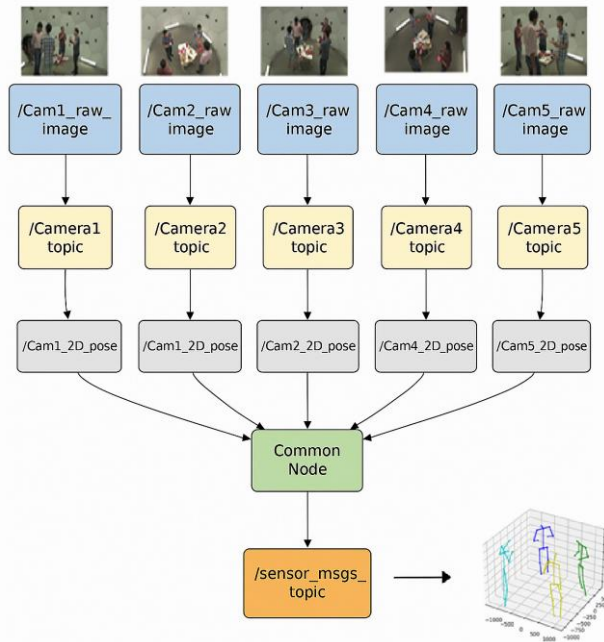
2.18.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η υλοποίηση υιοθετεί μια πλήρως αρθρωτή αρχιτεκτονική ROS, με διακριτούς κόμβους (nodes) υπεύθυνους για κάθε βασικό στάδιο της ροής: απόκτηση εισόδου, εκτίμηση στάσης και απεικόνιση δεδομένων. Σε ένα τυπικό setup με πέντε κάμερες, κάθε αισθητήρας RGB διαχειρίζεται τον δικό του ROS κόμβο (Camera 1 έως Camera 5), ο οποίος επικοινωνεί απευθείας με το hardware και δημοσιεύει stream εικόνων σε ξεχωριστά topics (π.χ. /camera1/image_raw έως /camera5/image_raw). Αυτοί οι κόμβοι καμερών μπορούν επίσης να δημοσιεύουν προ-επεξεργασμένες ανιχνεύσεις 2D keypoints — με custom message types — σε topics όπως /camera1/keypoints_2d. Όλες οι παράμετροι, intrinsics και distortion, φορτώνονται κατά την έναρξη από αρχεία **YAML** και ανακοινώνονται στο /cameraX/camera_info, εξασφαλίζοντας ακριβή downstream επεξεργασία.

Στον πυρήνα του συστήματος βρίσκεται ένας κοινός κόμβος, ο οποίος κάνει subscribe στις εξόδους όλων των πέντε κόμβων των καμερών. Ευθυγραμμίζει χρονικά τα multi-view streams με τη χρήση του message_filters::ApproximateTimeSynchronizer του ROS, διασφαλίζοντας ότι τα 2D keypoints (ή τα raw frames) από διαφορετικές κάμερες είναι συγχρονισμένα. Εκμεταλλευόμενος τα extrinsic calibration δεδομένα, στη συνέχεια εγγράφει χωρικά κάθε ανίχνευση σε κοινό σύστημα συντεταγμένων. Ο κόμβος συγχωνεύει αυτά τα inputs σε συνεκτικούς 3D σκελετούς, δημοσιεύοντάς τους ως standard ROS μηνύματα — geometry_msgs/PoseArray ή sensor_msgs/PointCloud — για ομαλή ενσωμάτωση σε downstream εφαρμογές.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, ένας κόμβος απεικόνισης κάνει subscribe στο fused pose topic και αποδίδει τους σκελετούς στο RViz μέσω visualization_msgs/MarkerArray. Οι χρήστες μπορούν να ρυθμίσουν το χρωματισμό των αρθρώσεων με βάση το επίπεδο εμπιστοσύνης και να επιλέξουν στυλ “οστών” — γραμμές (lines) ή κυλίνδρους (cylinders) — ενώ είναι δυνατή και η εμφάνιση των camera frustums για επαλήθευση της ακρίβειας του calibration. Όλα τα topics μπορούν να καταγράφονται σε ROS bag αρχεία με ενεργοποιημένο το use_sim_time για offline ανάλυση ή playback. Επιπλέον, η on-demand υπηρεσία /get_latest_skeletons επιτρέπει σε εξωτερικούς clients να αιτούνται τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις στάσης. Αυτό το βασισμένο σε ROS framework προσφέρει μια καταναεμημένη, πραγματικού χρόνου λύση για multi-camera human pose tracking, με αποδεδειγμένη απόδοση και επεκτασιμότητα σε ποικίλες εφαρμογές.



Εικόνα. ROS υλοποίηση για εκτίμηση τρισδιάστατης ανθρώπινης πόζας σε πραγματικό χρόνο μέσω συνδυασμού όψεων από πολλαπλές λήψεις.

2.18.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Πριν εμβαθύνουμε στην ROS υλοποίηση, αξίζει να κατανοήσουμε τα υποκείμενα 2D detection δίκτυα και τα feature-extraction backbones που τροφοδοτούν την υλοποίηση μας: το Mask R-CNN για instance segmentation και αρχικοποίηση keypoints, το HRNet για παραγωγή υψηλής πιστότητας heatmaps, και το YOLO για γρήγορο εντοπισμό ανθρώπων. Αυτά τα δίκτυα συνδυάζουν συμπληρωματικά πλεονεκτήματα σε ακρίβεια, ανάλυση και ταχύτητα, και αποτελούν το θεμέλιο πάνω στο οποίο λειτουργούν τα multi-view lifting modules.

Το Mask R-CNN είναι ένα διπλού-σταδίων, region-based convolutional δίκτυο που επεκτείνει το Faster R-CNN με την προσθήκη ενός παράλληλου κλάδου για pixel-perfect instance masks. Στο πρώτο στάδιο, το Region Proposal Network (RPN) παράγει υποψήφια bounding boxes· στο δεύτερο στάδιο, τα proposals βελτιώνονται περαιτέρω με ταυτόχρονη εκτέλεση classification, bounding-box regression και mask prediction μέσω ενός μικρού Fully Convolutional Network που εφαρμόζεται σε κάθε Region of Interest (RoI). Το Mask R-CNN τυπικά τρέχει γύρω στα 5 frames per second σε σύγχρονη GPU, προσθέτοντας μόνο μικρό overhead σε σχέση με το Faster R-CNN, ενώ προσφέρει state-of-the-art απόδοση στα COCO instance segmentation, object detection και keypoint estimation benchmarks.

Το HRNet (High-Resolution Network) αποφεύγει το κλασικό high-to-low-to-high resolution παράδειγμα διατηρώντας παράλληλα multi-resolution streams σε όλο το δίκτυο και ανταλλάσσοντας επανειλημμένα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

πληροφορία μεταξύ τους. Ξεκινώντας από ένα high-resolution subnet, το HRNet προσθέτει παράλληλους κλάδους χαμηλότερης ανάλυσης που μοιράζονται αναπαραστάσεις μέσω πλευρικών συνδέσεων, επιτρέποντας σε κάθε χωρική κλίμακα να αντιπροσωπεύεται χωρίς διαδοχικό downsampling και upsampling. Αυτός ο σχεδιασμός παράγει heatmaps με μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για λεπτομερή εντοπισμό keypoints, και έχει αποδείξει ανωτερότητα σε σχέση με προηγούμενες αρχιτεκτονικές στα COCO keypoint και MAPII benchmarks.

Το YOLO επαναπροσδιορίζει την ανίχνευση αντικειμένων ως ένα ενιαίο πρόβλημα παλινδρόμησης, επεξεργαζόμενο ολόκληρη την εικόνα σε μία μόνο διέλευση. Στην έκδοση YOLOv5, το δίκτυο δομείται σε τρία βασικά μέρη:

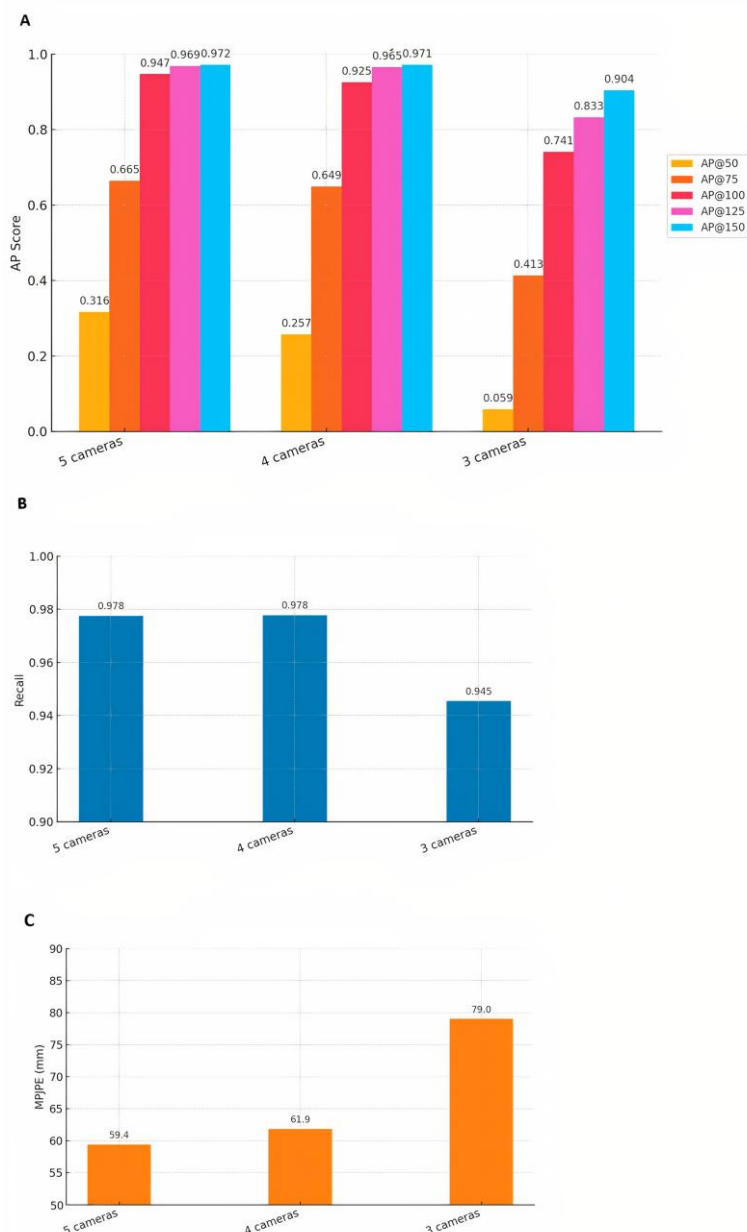
1. Πυρήνας CSPDarknet53 για βελτιωμένη ροή των gradients και μείωση του υπολογιστικού φόρτου,
2. Τμήμα σύντηξης χαρακτηριστικών που συνδυάζει Spatial Pyramid Pooling και Path Aggregation Network,
3. Μονάδα ανίχνευσης προερχόμενη από το YOLOv4, η οποία προβλέπει πιθανή παρουσία αντικειμένου.

Αυτός ο ενοποιημένος σχεδιασμός επιτρέπει στο YOLOv5-medium να προσφέρει πραγματικό-χρόνου ανίχνευση με ανταγωνιστική ακρίβεια, καθιστώντας το ιδανικό για το πρώτο στάδιο της ροής εκτίμησης στάσης. Κάθε στάδιο της επεξεργασίας λειτουργεί ως ξεχωριστός κόμβος ROS, διευκολύνοντας την κατανεμημένη ανάπτυξη σε διαφορετικούς υπολογιστικούς πόρους. Ο κόμβος YOLOv5-medium επιτυγχάνει μέσο χρόνο επεξεργασίας 0,23 s ανά εικόνα—3,3x ταχύτερα από το Mask R-CNN (0,76 s στον ίδιο εξοπλισμό)—ιδανικό για συσκευές με περιορισμένους πόρους. Ο κόμβος HRNet παράγει heatmaps διαστάσεων 64 × 64 ανά άρθρωση. Οι κόμβοι μπορούν να κατανέμονται σε Jetson ή GPUs, αξιοποιώντας τις δυνατότητες namespace remapping των ROS για δυναμική προσαρμογή στους διαθέσιμους πόρους. Ο χρονικός συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω use_sim_time, διασφαλίζοντας ακριβή συνδυασμό πλαισίων, ενώ η υπηρεσία /get_latest_skeletons επιτρέπει την ανάκτηση των πιο πρόσφατων τρισδιάστατων στάσεων για περαιτέρω επεξεργασία ή αρχειοθέτηση.

2.18.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Το πλήρως ενσωματωμένο ROS σύστημα εκτίμησης στάσης εφαρμόστηκε τόσο σε δημόσια benchmarks όσο και σε πιλοτικές εφαρμογές σε πραγματικά σενάρια, δείχνοντας υψηλή ακρίβεια και απόδοση σε πραγματικό χρόνο σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών εφαρμογών. Στο σύνολο δεδομένων Panoptic με πέντε καλιμπραρισμένες RGB κάμερες, η υλοποίηση VoxelPose επιτυγχάνει AP@50 = 0,947 και Mean Per Joint Position Error (MPJPE) = 59,4 mm—όταν ο αριθμός των όψεων μειώνεται σε τρεις, η AP@50 μειώνεται ομαλά σε 0,904 και η MPJPE αυξάνεται σε 78,0 mm, αποτυπώνοντας την αναμενόμενη πτώση στην απόδοση υπό περιορισμένες όψεις.

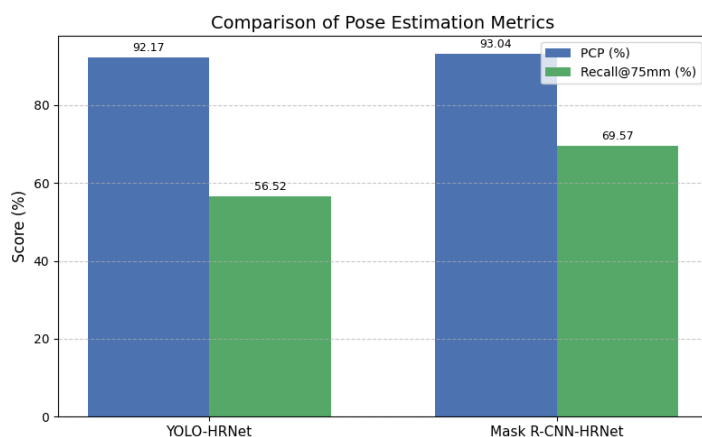
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 134 Μετρικές αξιολόγησης του VoxtelPose στο σύνολο δεδομένων Raportis με διαφορετικές ρυθμίσεις καμερών. (Α) Οι μετρικές AP (AP@50, AP@75, AP@100, AP@125, AP@150) δείχνουν μείωση της απόδοσης καθώς μειώνεται ο αριθμός των καμερών. (Β) Μελέτη μείωσης αριθμού

Σε συγκριτική μελέτη των preprocessing pipelines — YOLO-HRNet vs. Mask R-CNN-HRNet — σε 1000 καρτέ από το actorsGT.mat, οι τιμές Part Correct Percentage (PCP) είναι 92,17% και 93,04% αντίστοιχα, με Recall@75 mm 0,5652 για YOLO-HRNet και 0,6957 για Mask R-CNN-HRNet. Παρόλο το χάσμα στην χωρική ακρίβεια, οι εργονομικές αξιολογήσεις RULA παρέμειναν ίδιες και για τις δύο ροές, αναδεικνύοντας την ανθεκτικότητα της αξιολόγησης κινδύνου σε επίπεδο αρθρώσεων.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

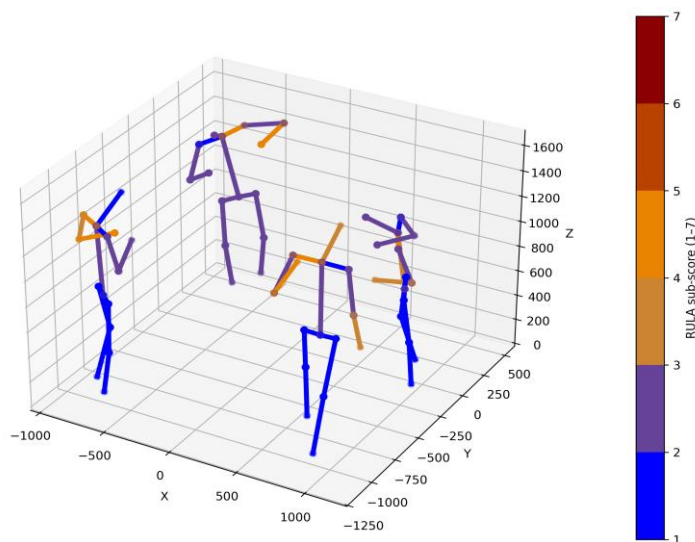


Εικόνα 135 Σύγκριση της απόδοσης εκτίμησης πόζας μεταξύ των μοντέλων YOLO-HRNet και Mask R-CNN-HRNet, χρησιμοποιώντας δύο μετρικές αξιολόγησης: PCP και Recall στα 75 mm (Recall@75mm).

Σε πρακτικές αναπτύξεις σε συσκευές edge NVIDIA Jetson TX2, η ροή YOLO-HRNet τρέχει σε περίπου 0,23 s ανά εικόνα — 3,3× ταχύτερα από το Mask R-CNN (0,76 s) — επιτρέποντας end-to-end real-time λειτουργία χωρίς ενδιάμεσα στάδια. Η συγχωνευμένη τρισδιάστατη ροή σκελετών δημοσιεύεται συνεχώς σε ROS topics, όπου ειδικός κόμβος απεικόνισης αποδίδει χρωματισμένους σκελετούς στο RViz για επικύρωση των αποτελεσμάτων. Όλα τα δεδομένα μπορούν να καταγράφονται σε συγχρονισμένα ROS bag αρχεία (use_sim_time) και να ανακτώνται on-demand μέσω της υπηρεσίας /get_latest_skeletons.

Πέρα από τα ποσοτικά αποτελέσματα, αναδείξαμε τέσσερις κύριους τομείς εφαρμογής με βάση τα real-time 3D output του συστήματος:

- Εργονομία & RULA Assessment σε εργοτάξια, παρέχοντας συνεχείς δείκτες κινδύνου άνω άκρων για την πρόληψη μυοσκελετικών παθήσεων.
- Πρόβλεψη & Παρακολούθηση Πτώσεων σε νευρολογικούς ασθενείς (π.χ. Parkinson's, άνοια), όπου αποκλίσεις στη στάση και τη σταθερότητα βάδισης ενεργοποιούν έγκαιρες ειδοποιήσεις.
- Παρακολούθηση Φυσικοθεραπείας, ποσοτικοποιώντας το εύρος κίνησης και την ευθυγράμμιση αρθρώσεων κατά τις συνεδρίες, για εξατομικευμένα πλάνα αποκατάστασης.
- Sports Coaching & Biomechanics Analysis, όπως αξιολόγηση χτυπήματος στο τένις και βελτιστοποίηση βηματισμού, προσφέροντας feedback σε αθλητές και προπονητές σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 136 Η μέθοδος Rapid Upper Limb Assessment (RULA) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργονομικό εργαλείο για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου μυοσκελετικών διαταραχών μέσω της βαθμολόγησης των στάσεων των άνω βραχιόνων, των κάτω βραχιόνων, των καρπών, του αυχέ

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Συνολικά, αυτή η υλοποίηση γεφυρώνει την απόσταση μεταξύ state-of-the-art έρευνας σε multi-view 3D pose και λειτουργικής ανάπτυξης σε edge, προσφέροντας μία ROS εφαρμογή που διακρίνεται τόσο στην ακρίβεια όσο και στην ταχύτητα, και παρουσιάζει υψηλή προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά περιβάλλοντα (domain adaptation) και ανθεκτικότητα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

2.19 Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία

Στόχος της λύσης είναι να αναπτύξει μια ευέλικτη και φιλική προς την βιομηχανία πλατφόρμα με εύκολα προσβάσιμα νευρωνικά δίκτυα τα οποία να μπορούν να τροφοδοτηθούν με εικόνες από απλές χαμηλού κόστους κάμερες εμπορίου και να προσφέρουν κατανόηση των εικονιζόμενων σκηνών. Καθώς ο άνθρωπος είναι το κέντρο των δραστηριοτήτων των επιχειρήσεων και η ασφαλής συνύπαρξη ανθρώπων-μηχανών βασίζεται στον ακριβή εντοπισμό και αντίληψη της ανθρώπινης παρουσίας και δραστηριότητας, η λύση εστιάζει ιδιαίτερα στην ανθρώπινη παρατήρηση ενώ παράλληλα προσφέρει έναν συνδυασμό λειτουργιών που καλύπτει όλο το φάσμα της σκηνής. Η λύση έχει τέσσερις ενότητες κάθε μια από τις οποίες προσφέρει μια μοναδική λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα με την χρήση του νευρωνικού δικτύου MocapNET[1][2][3][4][5] η εφαρμογή μπορεί να εξάγει τρισδιάστατη αντίστροφη κινηματική ενός εικονιζόμενου ανθρώπου, με την χρήση του δικτύου YMAP-Net[6] μπορεί να εξάγει βάθος, κάθετα διανύσματα, δισδιάστατη πληροφορία για τον άνθρωπο, κατάτμηση της σκηνής σε περιοχές και περιγραφή της σκηνής με λέξεις κλειδιά, ενώ με την χρήση του θεμελιώδους μοντέλου εικόνας/κειμένου DeepSeek VL-2[7] προσφέρεται δυνατότητα λεκτικής περιγραφής και απάντησης σε ερωτήματα σχετικά με μια σκηνή. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ερωταπαντήσεις μπορούν να γίνονται στην Ελληνική γλώσσα χάρη στην προσθήκη ενός νευρωνικού δικτύου μεταφραστή. Τέλος προσφέρεται δυνατότητα για τις εταιρίες για προσθήκη δεδομένων εκπαίδευσης στην πλατφόρμα για την βελτίωση της και σύγκλιση των αποτελεσμάτων σε σκηνές οι όπου τα δεδομένα εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων δεν είναι αρκετά για να εξασφαλίσουν καλά αποτελέσματα.

2.19.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Για την ανάπτυξη της λύσης το πλάνο εργασίας περιέλαβε τα παρακάτω στάδια:

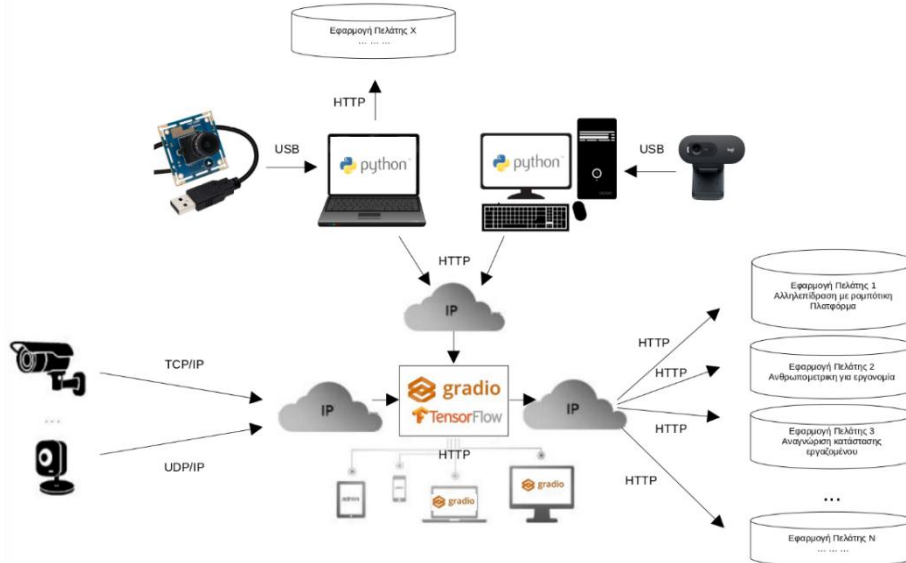
- **Διερεύνηση βιβλιογραφίας κατάλληλων νέων τεχνικών TN:** Η ενέργεια αυτά περιλαμβάνει την αναζήτηση και διαλογή τεχνικών που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να πετύχουμε τους στόχους της λύσης μας.
- **Προσδιορισμός δομών δεδομένων/αρχιτεκτονικής υλοποίησης:** Έχοντας επιλέξει κατάλληλες τεχνικές μπορούμε να κάνουμε την αρχική αρχιτεκτονική σχεδίαση υλοποίησης.
- **Ενσωμάτωση νευρωνικών δικτύων σε ένα κοινό πακέτο λογισμικού:** Τα επιμέρους επιλεγμένα δίκτυα τεχνητής νοημοσύνης θα πρέπει να ενσωματωθούν και ενοποιηθούν.
- **Εκπαίδευση/Βελτίωση νευρωνικών δικτύων:** Καθ' όλη την ανάπτυξη της λύσης απαιτείται εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων καθώς είναι πολύ χρονοβόρα διαδικασία.
- **Σχεδιασμός/Υλοποίηση εφαρμογής Server:** Η λύση απαιτεί την ανάπτυξη μιας διαδικτυακής (HTTP) εφαρμογή server που να είναι προσβάσιμη τόσο από browser (κινητό, φορητό υπολογιστή) όσο και από προγράμματα που τρέχουν σε άλλους διακομιστές.
- **Σχεδιασμός/Υλοποίηση εφαρμογής Client:** Επίσης χρειάζεται η ανάπτυξη σε μια προσιτή γλώσσα προγραμματισμού (Python) για πρόσβαση στην πλατφόρμα μέσω API/κώδικα.
- **Εκτέλεση εργαστηριακών πειραμάτων / καταγραφή KPI:** Τέλος η λύση απαιτεί εργαστηριακά πειράματα για την βελτιστοποίηση της και την αποσφαλμάτωση της.

2.19.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της λύσης 17 που απεικονίζεται στην Εικόνα 137, χρησιμοποιεί τις ελάχιστες δυνατές παραδοχές για να είναι εφαρμόσιμη σε βιομηχανίες με διαφορετικού είδους υπολογιστικού πόρους. Στον πυρήνα της βασίζεται σε ένα intranet εταιρικό δίκτυο όπου οι διάφορες συσκευές του δικτύου μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και να ανταλλάσσουν μηνύματα μέσω του HTTP πρωτοκόλλου. Στην καρδιά της αρχιτεκτονικής βρίσκεται ένας αριθμός από διακομιστές “server”, μηχανήματα τα οποία

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

διαθέτουν επιταχυντές γραφικών (GPGPU). Η βάση των νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιούμε είναι το Keras 3.6.0 με το Tensorflow 2.19.0 υποσύστημα ενεργοποιημένο το οποίο είναι η νεότερη διαθέσιμη έκδοση την στιγμή που γράφεται το παραδοτέο. Ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους των διακομιστών οι υποενότητες (νευρωνικά δίκτυα) που προσφέρονται μπορούν να τρέχουν όλα σε ένα μηχάνημα ή να είναι κατακερματισμένες σε περισσότερα μηχανήματα. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ένα μηχάνημα με μια GPU NVIDIA-RTX 5080 16GB VRAM μπορούν όλα τα τμήματα της λύσης να εκτελούνται παράλληλα σε ένα μηχάνημα. Σε περίπτωση όμως που μια εταιρία έχει διαθέσιμα παλαιότερης τεχνολογίας μηχανήματα με πχ με NVIDIA GTX 1070 8GB VRAM κάρτα γραφικών θα μπορούσε αυτό το μηχάνημα να τρέχει μόνο τα δίκτυα MocarNET και YMAP-Net αφήνοντας το VLM σε κάποιο άλλο αντίστοιχα χαμηλών επιδόσεων μηχάνημα. Αντίστοιχα σε περίπτωση που κάποιο από τα προσφερόμενα modules δεν είναι χρήσιμο για τους σκοπούς μιας επιχείρησης μπορεί να μην εκτελείται, προσαρμόζοντας και πάλι τους διαθέσιμους πόρους για βέλτιστη χρήση από την εφαρμογή μας.



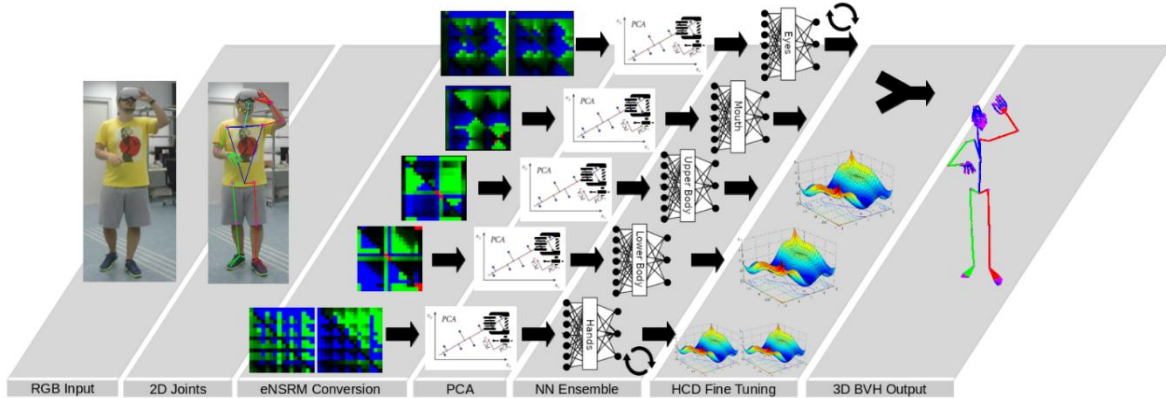
Εικόνα 137 Η αρχιτεκτονική της λύσης είναι δικτυακή και βασίζεται σε κάμερες οι οποίες είναι είτε συνδεδεμένες απευθείας σε κόμβους του δικτύου (USB) είτε μέσω IP. Ο server της εφαρμογής μπορεί να λαμβάνει ερωτήματα κατανόησης σκηνής και να απαντάει είτε απευθείας

Η εκτέλεση των διαθέσιμων νευρωνικών δικτύων από τους εργαζόμενους της επιχείρησης μπορεί να γίνει με πολλαπλούς τρόπους. Ο απλούστατος και πιο άμεσος είναι με απευθείας χρήση λογισμικού browser (Chrome, Firefox, Safari, Edge κτλ.) από οποιαδήποτε συσκευή είναι συνδεδεμένη στο intranet της επιχείρησης μέσω της διαδικτυακής (HTTP) επαφής των εφαρμογών μας. Με αυτό τον τρόπο η λύση είναι απευθείας προσβάσιμη στο μέγιστο δυνατό αριθμό συσκευών (Κινητά, Tablet, Smart TVs, Laptops, σταθεροί υπολογιστές) χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης οποιουδήποτε λογισμικού. Σαν δεύτερο επίπεδο αυτοματισμού η διαδικτυακή επαφή επίσης περιέχει API με το οποίο το IT department της εκάστοτε επιχείρησης μπορεί εύκολα και γρήγορα να δημιουργήσει αυτοματοποιημένες ροές (scripted) από εικόνες που προέρχονται από κάμερες της επιχείρησης και να κατανοήσει την σκηνή που απεικονίζουν τόσο ως προς ερωτήσεις για την σκηνή (Εφαρμογή VLM), όσο ως προς το βάθος και κατάτμηση της σκηνής (Εφαρμογή YMAP-Net) όσο και ως προς την δισδιάστη θέση των ανθρώπων στην σκηνή (Εφαρμογή YMAP-NET) και εξαγωγή αντίστροφης κινηματικής ενός συγκεκριμένου ανθρώπου (Εφαρμογή MocarNET).

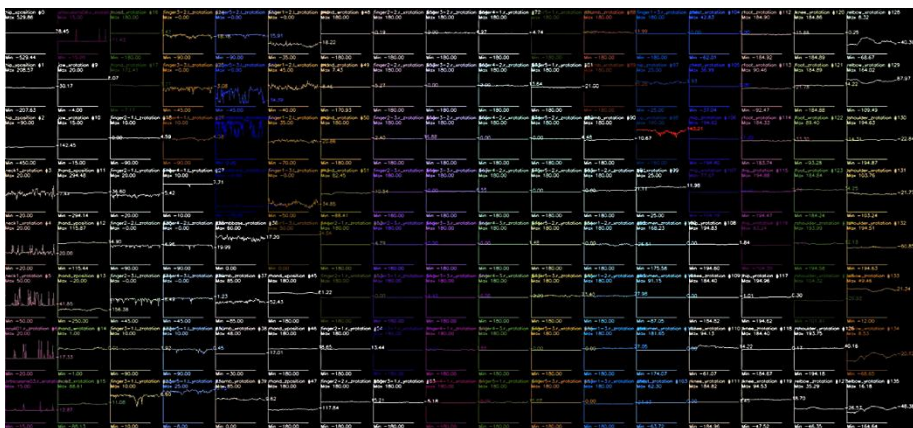
2.19.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Η υλοποίηση της λύσης κατανόησης σκηνής από οπτική πληροφορία βασίζεται σε 4 πυλώνες. Ο πρώτος είναι το νευρωνικό δίκτυο MocarNET (Εικόνα 138) που εξαγεί αντίστροφη κινηματική του ανθρώπου, ο δεύτερος το δίκτυο YMAP-Net[6] που επιστρέφει αποτελέσματα για όλη την υπόλοιπη σκηνή, ο τρίτος το δίκτυο DeepSeek-VL2[7] με τον οποίο μπορεί κάποιος να κάνει ερωταπαντήσεις για την σκηνή. Τέταρτον μια υπηρεσία ανατροφοδότησης με την οποία όταν κάποιο από τα τμήματα της λύσης δεν λειτουργεί

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής
 ικανοποιητικά η εικόνα εισόδου να δοθεί στην ομάδα ανάπτυξης της λύσης έτσι ώστε μελλοντικές
 εκδόσεις των νευρωνικών δικτύων να την συμπεριλάβουν στα δεδομένα εκπαίδευσης.
 Πιο λεπτομερώς, το νευρωνικό δίκτυο MocapNET [1][2][3][4][5] αναπτύχθηκε από το εργαστήριο
 ανθρωποκεντρικής υπολογιστικής όρασης του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) μέσω των
 Ευρωπαϊκών έργων H2020 Mingei (Grant No 822336), Co4Robots (Grant No 731869) και BonsApps (EU
 H2020 Grant no. 101015848) AI Talent grant (Winner No. Bons 10C 20) . Επίσης τμήμα της ανάπτυξης της
 εφαρμογής πραγματοποιήθηκε με πόρους του ΕΛΙΔΕΚ μέσω του project I. C. Humans (Νούμερο 91). Η
 εφαρμογή MocapNET είναι μια από τις λίγες παγκοσμίως που μπορεί να διαχειριστεί ολόκληρο το
 ανθρώπινο σώμα (άνω άκρα/κάτω άκρα/δάκτυλα χεριών/πρόσωπο) σε πραγματικό χρόνο εκτελούμενη
 αποκλειστικά σε CPU (χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία GPU). Η είσοδος της μεθόδου είναι
 δισδιάστατες συντεταγμένες σημείων και η έξοδος σκελετοί (Εικόνα ΧΧ3) της μορφής Bio Vision Hierarchy
 (BVH) από την οποία επίσης μπορούν να εξαχθεί τρισδιάστατη απόλυτη θέση του σκελετού. Αξίζει να
 σημειωθεί ότι αντίστοιχες λύσεις που βρίσκονται διαθέσιμες στην βιβλιογραφία χρησιμοποιούν
 συνήθως την αναπαράσταση SMPL-X η οποία υπόκειται σε περιορισμούς πνευματικών δικαιωμάτων από
 την εταιρία Meshcarade, σε αντίθεση με την αναπαράσταση BVH που είναι ανοικτού κώδικα και
 διαθέσιμη δωρεάν. Για την ενσωμάτωση του MocapNET στην πλατφόρμα της λύσης δημιουργήθηκε
 λογισμικό Server το οποίο να λαμβάνει εικόνες από κάμερες και απευθείας να πραγματοποιεί όλα τα
 βήματα δίνοντας πίσω την τρισδιάστατη κινηματική αναπαράσταση. Αντίστοιχα χρησιμοποιώντας το API
 και την γλώσσα Python είναι δυνατή η επεξεργασία ροών εικόνων από κάμερες σε πραγματικό χρόνο
 ψηφιοποιώντας τις κινήσεις των επιμέρους βαθμών ελευθερίας του ανθρώπινου σώματος.



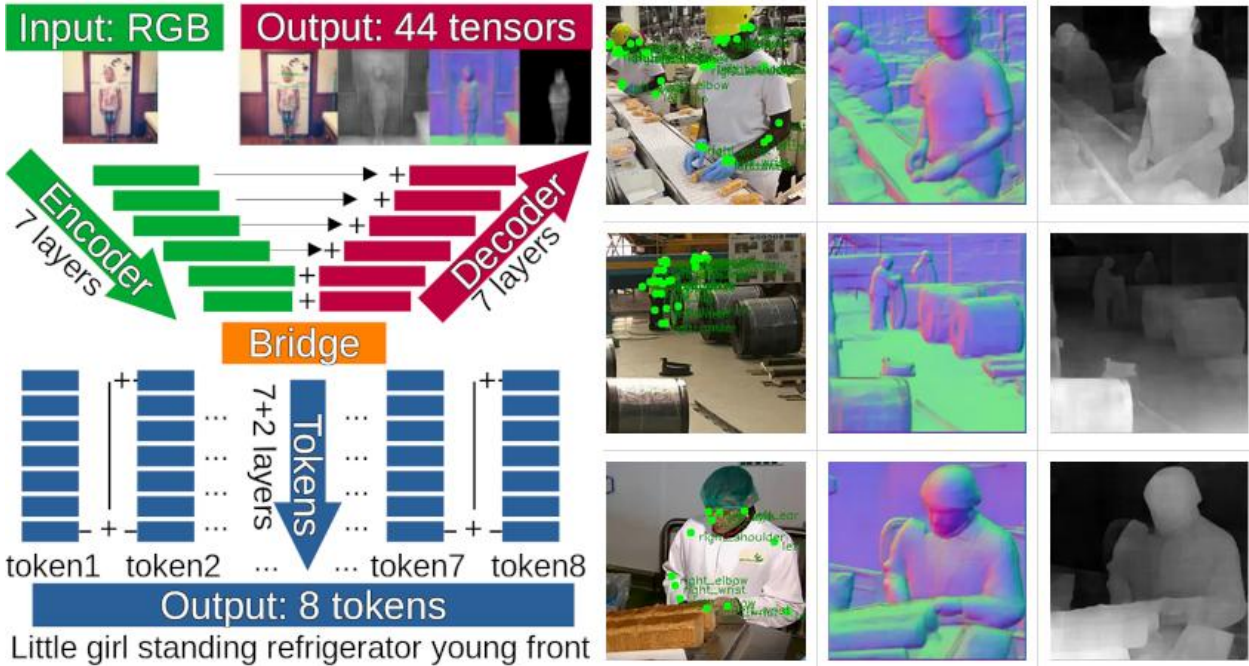
Εικόνα 138 Το νευρωνικό δίκτυο MocapNET μετατρέπει εικόνες που απεικονίζουν ανθρώπους σε τρισδιάστατα σημεία περιλαμβάνοντας επίλυση της αντίστροφης κινηματικής. Πιο συγκεκριμένα παραλαμβάνει δισδιάστατες συντεταγμένες τις οποίες κωδικοποιεί σε πίνακες eNS , πραγματοποιεί ελάττωση της διαστασιμότητας της εισόδου, εξαγει απευθείας την αντίστροφη κινηματική μέσω νευρωνικών δικτύων την οποία στην συνέχεια ανατροφοδοτεί με τον αλγόριθμο ιεραρχικής κατάβασης συντεταγμένων (HCD) έτσι ώστε να δώσει το τελικό αποτέλεσμα. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στις δημοσιεύσεις [1][2][3][4][5]



Εικόνα 139 Το νευρωνικό δίκτυο MocapNET κατανοεί τους εικονιζόμενους ανθρώπους τους οποίους αποσυνθέτει σε τρισδιάστατες γωνίες. Η σχεδίαση των επιμέρους βαθμών ελευθερίας για μια συνεχιζόμενη ροή εικόνων μας δίνει ένα τέτοιο γράφημα δραστηριότητας.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

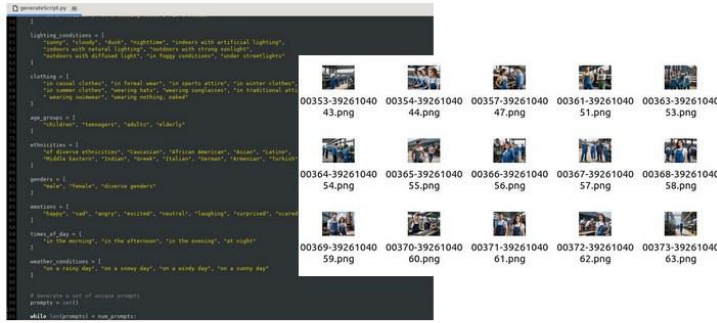
Η κατανόηση της σκηνής περιλαμβάνει την τρισδιάστατη κατανόηση των αντικειμένων και τμημάτων της υπόλοιπης σκηνής (εκτός του ανθρώπου). Για την επίτευξη αυτού του στόχου αποφασίστηκε η χρήση μιας τεχνολογίας που να συμπληρώνει το νευρωνικό δίκτυο MocapNET που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το **νευρωνικό δίκτυο YMAP-Net** [6] αναπτύχθηκε από το εργαστήριο ανθρωποκεντρικής υπολογιστικής όρασης του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) μέσω του Ευρωπαϊκού έργου Magician (EU - HE Magician – Grant Agreement 101120731). Τμήμα της ανάπτυξης της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε με πόρους του ΕΛΙΔΕΚ μέσω του project I.C.Humans (Νούμερο 91). Ενώ το MocapNET χρησιμοποιεί δισδιάστατες συντεταγμένες του σώματος οι που ακολουθούν τις ίδιες κατανομές σε οποιοδήποτε σκηνή, το YMAP-Net από την άλλη παράγει πυκνά αποτελέσματα (Εικόνα XX4) για κάθε εικονοστοιχείο εικόνας εισόδου. Για να το επιτύχει αυτό χρησιμοποιεί 243.736 εικόνες εκπαίδευσης από τα ανοικτά σύνολα δεδομένων COCO [8]. Τα δεδομένα COCO όμως δεν συμπεριλαμβάνουν εικόνες από βιομηχανικά περιβάλλοντα (που είναι ο στόχος εφαρμογής της λύσης).



Εικόνα XX4: Το νευρωνικό δίκτυο YMAP-Net [6] είναι μια μονολιθική μέθοδος η οποία λαμβάνει σαν είσοδο μια εικόνα και σε πραγματικό χρόνο αποδίδει σαν έξοδο πληροφορία βάθους, τρισδιάστατων διανυσμάτων, κατάτμηση της σκηνής σε περιοχές, εξαγωγή δισδιάστατης πζόζας των ανθρώπων και λέξεων κλειδιά που περιγράφουν την εικόνα.

Για την βελτίωση του συνόλου δεδομένων αναπτύχθηκε Data Generator και Data Loader για να συμπεριλάβει τέτοια συνθετικά δεδομένα (Εικόνα XX5) στην εκπαίδευση του δικτύου. Για την επισημείωση των συνθετικών δεδομένων επίσης αναπτύχθηκε γραφική διεπαφή (Εικόνα XX6) με την οποία τα αυτόματα δεδομένα μπορούν να επεξεργαστούν. Τέλος λογισμικό Server/Client αναπτύχθηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η απευθείας χρήση του νευρωνικού δικτύου τόσο μέσω λογισμικού φυλλομετρητή όσο και μέσω κώδικα Python.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα XX5: Χρησιμοποιώντας το νευρωνικό δίκτυο Stable Diffusion v1.5 δημιουργήθηκε γεννήτρια επαυξημένου συνόλου δεδομένων για να βοηθήσει την εκπαίδευση του YMAP-Net [6] με καλύτερα αποτελέσματα σε συνθήκες βιομηχανίας.



Εικόνα XX6: Εικόνα από την γραφική διεπαφή επεξεργασίας των συνθετικών εικόνων εκπαίδευσης.

Παρακολουθώντας τα τεκταινόμενα στον χώρο της τεχνητής νοημοσύνης, κατά την διάρκεια του καλοκαιριού του 2024 περίπου στα μέσα της ανάπτυξης της Λύσης 17 δόθηκε στο κοινό το LLAMA VLM[9]. Με τον όρο VLM ονομάζουμε ένα Δίκτυο Όρασης και Γλώσσας (Vision Lanuage Model) το οποίο επέτρεπε την χρήση λεκτικών ερωτήσεων και απαντήσεων (στην Αγγλική Γλώσσα) για την κατανόηση της εικονιζόμενης σκηνής. Το δίκτυο αυτό εκπαιδεύτηκε από την εταιρία Meta κάνοντας χρήση data center με 16000 GPU και σύνολο δεδομένων πολλών δισεκατομμυρίων εικόνων. Σύντομα μετά από την έκδοση του ανοικτού λογισμικού LLAMA VLM δημιουργήσαμε λογισμικό διακομιστή το οποίο να μπορεί να εκτελεί το δίκτυο τοπικά στα μηχανήματα εταιριών. Δυστυχώς όμως λόγω Ευρωπαϊκής διαμάχης της εταιρίας Meta με την Ευρωπαϊκή Ένωση απαγορεύτηκε η χρήση του εν λόγω δικτύου μέσα στην Ευρώπη. Σύντομα όμως εμφανίστηκαν άλλα αντίστοιχα δίκτυα όπως τα MOLMO VLM[10] και το **νευρωνικό δίκτυο DeepSeek-VL2**[6] τα οποία είχαν όρους χρήσης ανοικτού λογισμικού συμβατούς με τους σκοπούς της λύσης μας. Μετά από διάφορα πειράματα καταλήξαμε στην υιοθεσία του DeepSeek-VL2 στο οποίο επίσης προσαρμόσαμε αυτόματη μετάφραση των ερωτήσεων και απαντήσεων στα Ελληνικά μέσω του ανοικτού λογισμικού Argos Translate. Με αυτό τον τρόπο τόσο χρησιμοποιώντας λογισμικό φυλλομετρητή όσο και προγραμματιστικά μέσω της γλώσσας Python οι βιομηχανικοί εταίροι είναι δυνατόν χρησιμοποιώντας φυσική γλώσσα (είτε Ελληνικά είτε Αγγλικά) να διατυπώσουν ερωτήσεις και για κάθε εικόνα εισόδου να λάβουν μια απάντηση πάλι σε φυσική γλώσσα καλύπτοντας πλήρως τους στόχους της “κατανόησης σκηνής από οπτική πληροφορία”.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Τέλος η **υπηρεσία ανατροφοδότησης** της λύσης δέχεται εικόνες τις οποίες αποθηκεύει σε ένα αρχείο και για κάθε μια από τις οποίες επιστρέφει ένα μοναδικό περιγραφέα UID. Δεν αποθηκεύεται κανένα άλλο στοιχείο για την διαφύλαξη του απορρήτου και της ανωνυμίας των εικονιζόμενων προσώπων. Η εφαρμογή επίσης επιτρέπει αφαίρεση εικόνων δίνοντας περιγραφείς UID.





2.19.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Η κεντρική πύλη της λύσης μας είναι μια ιστοσελίδα (Εικόνα XX7) η οποία εμφανίζεται στην διεύθυνση IP του μηχανήματος που φιλοξενεί τα νευρωνικά δίκτυα και τον κώδικα της λύσης. Το κάθε νευρωνικό δίκτυο εξυπηρετείται από μια διεργασία Gradio που μπορεί να τρέχει είτε στον ίδιο είτε σε άλλο υπολογιστή και που αναλαμβάνει την επίλυση του εκάστοτε υπο-προβλήματος υπολογιστικής όρασης.



Λύση 17 - Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία

Διαθέσιμες εφαρμογές

 Εφαρμογή Εξαγωγής Βάθους/Πλάτος/Κλάσης	 Εφαρμογή Εξαγωγής Ανίχνευσης κινησιολογίας	 Εφαρμογή Vision Language Model	 Εφαρμογή Προσθλασίσεως Δεδομένων Εκπαίδευσης
---	---	---	--

Κατανόηση Σκηνής με Βάση Οπτική Πληροφορία

Ο άνθρωπος είναι το κέντρο των δραστηριοτήτων των επιχειρήσεων. Η βιωσιμότητα του μέλλοντος πρέπει να μπορεί να αντιλαμβάνεται την ανθρώπινη παρουσία με ακρίβεια, ενώ η ασφαλής συνύπαρξη ανθρώπων και μηχανών βασίζεται στον εντοπισμό και την αντίληψη της ανθρώπινης παρουσίας και δραστηριότητας. Λόγω του δημογραφικού προβλήματος που αντιμετωπίζει η χώρα μας, ένα όλο και πιο γερασμένο και μικρότερο σε απόλυτους αριθμούς εργατικό δυναμικό θα έχει σταδιακά αυξημένες απαιτήσεις υποστήριξης από μηχανές για την διατήρηση της ίδιας παραγωγικότητας. Η παρούσα λύση αποσκοπεί στην υλοποίηση ενός συστήματος οπτικής αναγνώρισης χρησιμοποώντας σαν είσοδο εικόνες από κοινές κάμερες εμπορίου με στόχο την κατανόηση της σκηνής, και έξοδο την ψηφιοποίηση της με ιδιαίτερη λεπτομέρεια στην καταγραφή της θέσης και της αρθρωτής κίνησης του ανθρώπου. Η λύση αποσκοπεί στην ανάπτυξη και χρήση ενός νευρωνικού δικτύου το οποίο να είναι γρήγορο από υπολογιστικής άποψης, προσφέροντας ακρίβεια στην έξοδο του αλλά χωρίς υπέρμετρες υπολογιστικές απαιτήσεις. Για την ευκολότερη εγκατάσταση στις υποδομές επιχειρήσεων χωρίς αυξημένο κόστος, η λύση σκοπεύει σε μια plug & play αρχιτεκτονική όπου μπορεί να λειτουργεί τόσο με ένα υπάρχον δίκτυο καμερών IP όσο και με USB συσκευές συνδεδεμένες στους κόμβους του δικτύου αλλά και σε επίπεδο διασπασής front-end για την φιλική προς τον τελικό χρήστη εμπειρία κατά την χρήση του λογισμικού.

Επικοινωνία

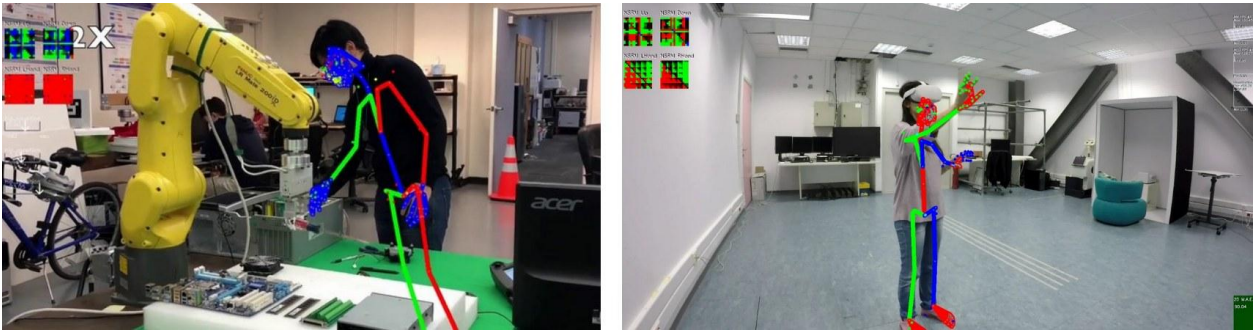
E-mail: epitmerkon@csd.uoi.gr, argyros@csd.uoi.gr
Φορέας: University of Crete, Department of Computer Science
Τηλ: +120 456 7890



Εικόνα XX7: Εικόνα από την διαδικτυακή πλατφόρμα της λύσης 17. Με ένα κλικ ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάποια από τις λειτουργίες της περιγράφηκαν στις παραγράφους της ενότητας 2.17.3.

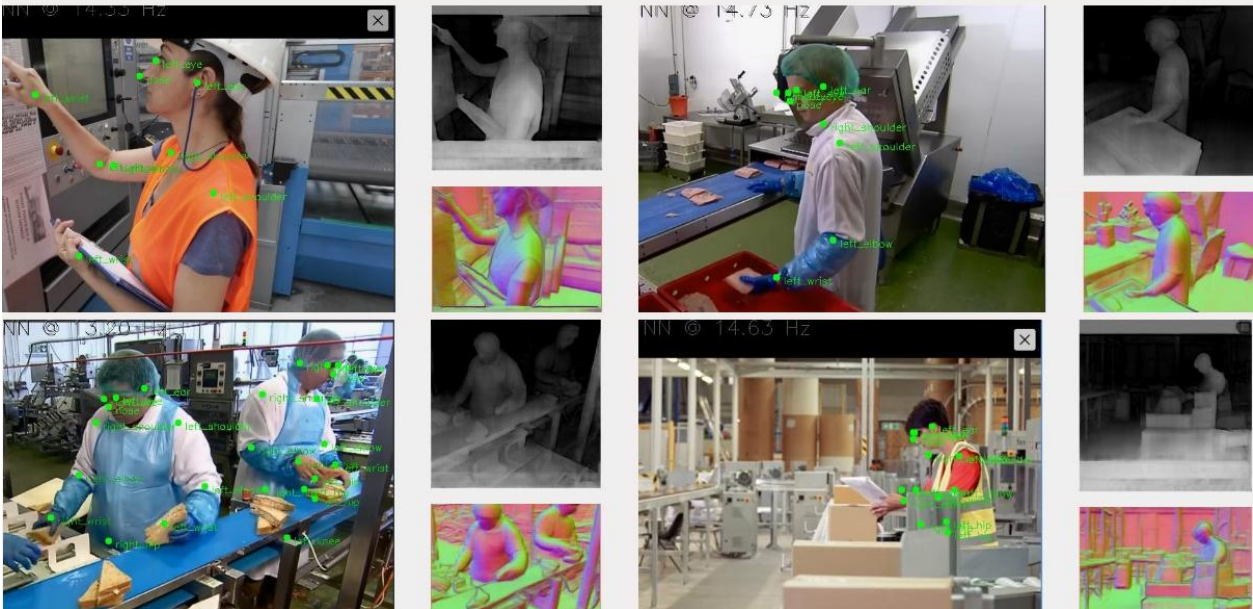
Το **MocapNET** επιτυγχάνει τρισδιάστατη μέση ακρίβεια 99 mm στα σημεία του κορμού του σώματος την οποία μετράμε στο σύνολο δεδομένων Human 3.6M[10]. Η εφαρμογή επιτυγχάνει ρυθμούς ανανέωσης άνω των 10Hz ακόμα και σε πλήρη εκτέλεση της σε CPU (χωρίς επιταχυντή γραφικών). Λειτουργεί καλύτερα όταν ο εικονιζόμενος άνθρωπος βρίσκεται >1m μακριά από την κάμερα και όσο περισσότερο από το ανθρώπινο σώμα είναι ορατό τόσο ακριβέστερη είναι η επίλυση της τρισδιάστατης κινηματικής. Η εκπαίδευση του δικτύου γίνεται στο σύνολο δεδομένων CMU MOCAP, για λόγους ευκρίνειας υποθέτει εικόνες με λόγο μεγέθους 16:9 (Full-HD) παρόλα αυτά εικόνες διαφορετικών διαστάσεων επίσης εσωτερικά μετατρέπονται ανάλογα. Συλλέγοντας δεδομένα από σκηνές στο διαδίκτυο αλλά και σε συνθήκες εργαστηρίου (Εικόνα XX8) παρατηρούμε ότι η ποιότητα επίλυσης σε ροές video ακολουθεί το ανθρώπινο σώμα ενώ δυσκολία στο σύστημα προξενούν κυρίως εικόνες όπου μεγάλα τμήματα του σώματος δεν είναι ορατά λόγω επικαλύψεων (χωρίς ορατότητα τμημάτων του σώματος δεν είναι δυνατή η επίλυση) ή λόγω του ανθρώπου που βρίσκεται πολύ κοντά (κάτω από 1 μέτρο απόσταση στην κάμερα). Τέλος σε παρουσία πολλών ανθρώπων το σύστημα επικεντρώνεται σε αυτόν ο οποίος είναι καλύτερα ορατός.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα XX8: Το νευρωνικό δίκτυο MocapNET παρακολουθώντας την αντίστροφη κινηματική επίλυση ενός ανθρώπου που αριστερά αλληλοεπιδρά με έναν βραχίονα και δεξιά χρησιμοποιεί κράνος εικονικής πραγματικότητας.

Το νευρωνικό δίκτυο **YMAP-Net** εκπαιδεύεται κάνοντας “απόσταση” γνώσης από άλλα μεγαλύτερα νευρωνικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα βασίζεται στο δίκτυο Depth Anything V2 [11] για τις πληροφορίες βάθους, στο δίκτυο Detectron 2 [12] για τις πληροφορίες κατάτμησης, στο VisionGPT2 [13] για τις λέξεις κλειδιά, HRNet [14] για τον δισδιάστατο εντοπισμό των ανθρώπων και DPText [15] για τον εντοπισμό κειμένου. Το δίκτυο συνολικά περιέχει περίπου 300 εκατομμύρια παραμέτρους (41% των δικτύων από τα οποία γίνεται η απόσταση) και εκτελείται με ταχύτητα 18Hz σε μια GPU NVIDIA RTX 4080 SUPER. Δοκιμάζοντας την μέθοδο στο validation set του συνόλου δεδομένων COCO17 η μέθοδος πετυχαίνει 95% ακρίβεια σε σχέση με το HRNET, 94% ακρίβεια σε σχέση με το DPText, 91% ακρίβεια σε σχέση με το Detectron 2 και 27% σε σχέση με το Depth Anything. Η μέθοδος συνδυάζει ένα πολύ μεγάλο εύρος λειτουργικότητας την οποία επιτυγχάνει με ακρίβεια πολύ κοντά στις μεθόδους τελευταίας λέξης της τεχνολογίας. Η πληροφορία βάθους έχει την μεγαλύτερη απόκλιση από το δίκτυο απόστασης [11]. Ο πολύ χαμηλότερος αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης (0.23 εκατομμύρια αντί για 16 εκατομμύρια του [11]), το μικρότερο δίκτυο και η εγγενής αβεβαιότητα της κλίμακας παρατηρήσεων εξηγεί αυτή την απόκλιση. Συγκεντρωτικά στοιχεία για το μέγεθος την ακρίβεια και την ταχύτητα των μοντέλων TN που χρησιμοποιεί η λύση βρίσκονται στον Πίνακα XXX. Σε δοκιμαστικά video (Εικόνα XX9) κατά τον εργαστηριακό έλεγχο παρατηρούμε εύρωστη λειτουργία της μεθόδου τόσο σε εσωτερικούς όσο σε εξωτερικούς χώρους καθώς και σε σκηνές που απεικονίζουν εργασίες στην βιομηχανία ακόμα και όταν οι άνθρωποι φορούν στολές και προστατευτικά που αποκρύπτουν το σώμα τους.



Εικόνα XX9: Το νευρωνικό δίκτυο YMAP-Net εξάγει χάρτες βάθους, κάθετων διανυσμάτων, και εντοπισμό ανθρώπων με αρκετά καλή ακρίβεια όπως φαίνεται στην εικόνα.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Το νευρωνικό δίκτυο **Deep Seek VL2** προσφέρεται σε τρία μεγέθη, μικρό μεσαίο και μεγάλο τα οποία καταλαμβάνουν αντίστοιχα 3.3 , 16,1 και 27,5 δισεκατομμύρια παραμέτρους. Καθότι μόνο το μικρό μέγεθος μπορεί να εκτελεστεί σε μηχανήματα που διαθέτουν GPU με λιγότερα από 40GB VRAM είναι η έκδοση που επιλέγουμε. Εκτελώντας το σε ένα μηχάνημα που διαθέτει κάρτα γραφικών RTX 5080 το σύστημα μπορεί να απαντάει σε ερωτήματα με ρυθμό 0.82 Hz όταν αυτά γίνονται στην Αγγλική γλώσσα ενώ όταν τα ερωτήματα γίνονται στα Ελληνικά τα δυο ενδιάμεσα στάδια μετάφρασης Ελληνικά → Αγγλικά → Ελληνικά ρίχνουν τον ρυθμό απάντησης στα 0.68 Hz. Το δίκτυο Deep Seek VL2 είναι εκπαιδευμένο σε πάνω από 800 δισεκατομμύρια παραδείγματα. Δοκιμάζοντας το σε ερωτήσεις από σκηνές από video σε εργοστάσια παρατηρούμε σωστή αντίληψη της σκηνής και των διαφόρων εννοιών για τις οποίες του απευθύνουμε ερωτήσεις. Πιο συγκεκριμένα με το εργαλείο αυτό μπορούμε εύκολα να δημιουργήσουμε scripts με ερωτήσεις όπως εάν τα διάφορα πόστα έχουν κάποιον επιβλέποντα, εάν οι εργαζόμενοι φορούν προστατευτικά γάντια, κράνη κτλ, εάν οι γραμμές παραγωγής είναι γεμάτες ή την λεκτική περιγραφή για κάποια σκηνή.

Πίνακας 21: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγέθους απόδοσης και ακρίβειας των μοντέλων TN που χρησιμοποιεί η λύση. Οι χρόνοι με αστερίσκο είναι κοινοί καθώς το YMAP-Net παράγει όλες τις εξόδους με ένα πέρασμα στον ίδιο χρόνο.

Μοντέλο	Παράμετροι	Συσκευή	Χρόνος	Ακρίβεια
MocapNETv4 [1,2,3,4,5]	13M	CPU	67.01ms	99 mm ως προς [8]
YMAP-Net [6] Joint	329M	GPU >=8GB	55.56ms*	95% ως προς [15]
YMAP-Net [6] Depth	329M	GPU >=8GB	55.56ms*	27% ως προς [12]
YMAP-Net [6] Normals	329M	GPU >=8GB	55.56ms*	53% ως προς [12]
YMAP-Net [6] Segmentation	329M	GPU >=8GB	55.56ms*	91% ως προς [13]
DeepSeekVL-2 Tiny Αγγλικά	3300M	GPU>=16GB	1219.22ms	61% MMMUBenchmark
DeepSeekVL-2 Tiny Ελληνικά	3300M	GPU>=16GB	1470.67ms	61% MMMUBenchmark

2.19.5 Αναφορές

- [1] A. Qammar and A.A. Argyros, "MocapNET: Ensemble of SNN Encoders for 3D Human Pose Estimation in RGB Images", In British Machine Vision Conference (BMVC 2019), BMVA, Cardiff, UK, September 2019.
- [2] A. Qammar and A.A. Argyros, "Occlusion-tolerant and personalized 3D human pose estimation in RGB images", In IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2020), January 2021.
- [3] A. Qammar and A.A. Argyros, "Towards Holistic Real-time Human 3D Pose Estimation using MocapNETs", In British Machine Vision Conference (BMVC 2021), BMVA, Virtual, UK, November 2021.
- [4] A. Qammar and A. Argyros, "Compacting MocapNET-based 3D Human Pose Estimation via Dimensionality Reduction", In International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA 2023), ACM, pp. 306-312, Corfu, Greece, July 2023.
- [5] A. Qammar and A. Argyros, "A Unified Approach for Occlusion Tolerant 3D Facial Pose Capture and Gaze Estimation using MocapNETs", In IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (AMFG 2023 - ICCVW 2023), IEEE, pp. 3178-3188, Paris, France, October 2023.
- [6] A. Qammar, N. Vasilikopoulos, I. Oikonomidis and A.A. Argyros, "Y-MAP-Net: Real-time depth, normals, segmentation, multi-label captioning and 2D human pose in RGB images", CoRR, arXiv, November 2024.
- [7] Wu, Zhiyu, et al. "Deepseek-vl2: Mixture-of-experts vision-language models for advanced multimodal understanding." arXiv preprint arXiv:2412.10302 (2024).
- [8] Lin, Tsung-Yi, et al. "Microsoft coco: Common objects in context." Computer vision—ECCV 2014: 13th European conference, zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, proceedings, part v 13. Springer International Publishing, 2014.
- [9] Grattafiori, A., Dubey, A., Jauhri, A., Pandey, A., Kadian, A., Al-Dahle, A., Letman, A., Mathur, A., Schelten, A., Vaughan, A. and Yang, A., 2024. The llama 3 herd of models. arXiv preprint arXiv:2407.21783.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- [10] Deitke, Matt, Christopher Clark, Sangho Lee, Rohun Tripathi, Yue Yang, Jae Sung Park, Mohammadreza Salehi et al. "Molmo and pixmo: Open weights and open data for state-of-the-art multimodal models." arXiv preprint arXiv:2409.17146 (2024).
- [11] Ionescu, Catalin, et al. "Human3.6m: Large scale datasets and predictive methods for 3d human sensing in natural environments." IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 36.7 (2013): 1325-1339.
- [12] Yang, L., Kang, B., Huang, Z., Zhao, Z., Xu, X., Feng, J., & Zhao, H. (2024). Depth anything v2. Advances in Neural Information Processing Systems, 37, 21875-21911.
- [13] Wu, Yuxin, Alexander Kirillov, Francisco Massa, Wan-Yen Lo, and Ross Girshick. "Detectron2." (2019): 2019.
- [14] Daniel Gaddam. Visiongpt2. <https://github.com/shreydan/VisionGPT2>, 2023.
- [15] Sun, Ke, Bin Xiao, Dong Liu, and Jingdong Wang. "Deep high-resolution representation learning for human pose estimation." In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, pp. 5693-5703. 2019.
- [16] Ye, M., Zhang, J., Zhao, S., Liu, J., Du, B., & Tao, D. (2023, June). Dpext-detr: Towards better scene text detection with dynamic points in transformer. In Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence (Vol. 37, No. 3, pp. 3241-3249).

2.20 Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων

Η παρούσα λύση αποσκοπεί στην υλοποίηση ενός συστήματος οπτικής αναγνώρισης και επιθεώρησης διαδικαστικών δραστηριοτήτων (διαδικασιών).. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από μια σειρά μοντέλων οπτικής αναπαράστασης και αναγνώρισης ανθρώπινων δραστηριοτήτων και των βημάτων τους (δράσεις), τα οποία αξιοποιούν αλγορίθμους Τεχνητής Νοημοσύνης (TN). Ο στόχος της λύσης είναι προσφέρει μοντέλα οπτικής αντίληψης, τα οποία θα επιτρέπουν την αναγνώριση και παρακολούθηση της εκτέλεσης προκαθορισμένων διαδικασιών. Επιπλέον, η λύση αποσκοπεί στην διερεύνηση και ενδεχόμενη ενσωμάτωση στα υπάρχοντα μοντέλα της δυνατότητας αξιολόγησης της συμμόρφωσης με πρωτόκολλα εκτέλεσης για τον έγκαιρο εντοπισμό αποκλίσεων, συμβάλλοντας έτσι στην αποτροπή σφαλμάτων και στη βελτίωση της αποδοτικότητας των διαδικασιών. Το τελικό προσφερόμενο σύστημα θα προσφερθεί μέσω μιας πλατφόρμας γραφικών εργαλείων, παρέχοντας στους χρήστες μια εύχρηστη διεπαφή για την παρακολούθηση και αξιολόγηση των δραστηριοτήτων.

2.20.1 Στάδια υλοποίησης της λύσης

Για την ανάπτυξη της εν λόγω λύσης, έχει συνταχθεί ένα πλαίσιο εργασιών σύμφωνα με το οποίο η λύση αναπτύσσεται γύρω από 7 ομάδες εργασιών με τις ακόλουθες ενέργειες:

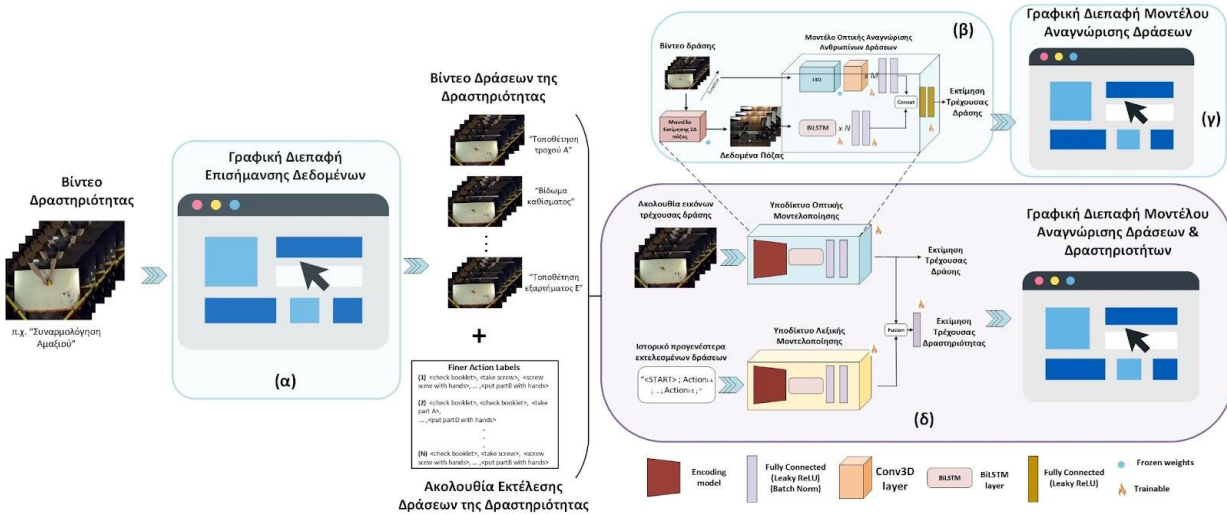
- Βιβλιογραφική αναζήτηση σχεδιαστικών λύσεων και σετ δεδομένων τα οποία αναφέρονται σε σενάρια με παρόμοια θεματολογία με εκείνη των βιομηχανικών κλάδων στους οποίους απευθύνονται οι λύσεις του έργου.
- Προσδιορισμός των προδιαγραφών δόμησης της πληροφορίας για την ορθή αξιοποίηση της από τα μοντέλα της λύσης. Κύριος στόχος είναι ο προσδιορισμός της απαιτούμενης οργάνωσης των δεδομένων που απαιτείται από τους βιομηχανικούς εταίρους που θα υιοθετήσουν την λύση.
- Ανάπτυξη μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρώπινων δράσεων: Το πακέτο εργασιών αφορά την σχεδίαση και υλοποίηση του υποσυστήματος οπτικής αναγνώρισης ατομικών βημάτων εκτέλεσης, δίχως αξιοποίηση πληροφορίας για το σκοπό εκτέλεσης της δράσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο σχεδιάζεται ως αυτόνομο, του οποίου οι σχεδιαστικές προσεγγίσεις θα ενσωματωθούν στο κυρίως μοντέλο αναγνώρισης δραστηριοτήτων. Το συγκεκριμένο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για την διερεύνηση δυνατότητας εκτέλεσης σε πραγματικό χρόνο.
- Ανάπτυξη μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρώπινων δράσεων και δραστηριοτήτων: Στο πακέτο εργασιών περιλαμβάνονται όλες οι εργασίες σχεδίασης, υλοποίησης και αποσφαλμάτωσης του κυρίως μοντέλου της λύσης το οποίο επιτρέπει την ταυτόχρονη οπτική αναγνώριση τόσο της τρέχουσας δράσης που επιτελείται καθώς και την παροχή εκτίμησης για την δραστηριότητα της οποίας η τρέχουσα δράση αποτελεί μέρος.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Σχεδίαση πλατφόρμας και γραφικών εργαλείων: Η ομάδα εργασιών περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την υλοποίηση γραφικών εργαλείων τα οποία επιτρέπουν την προετοιμασία εξατομικευμένων δεδομένων με στόχο την επανεκπαίδευση των προσφερόμενων μοντέλων, καθώς και γραφικά εργαλεία για αξιοποίηση και οπτικοποίηση των εκτιμήσεων των μοντέλων.
- Βελτιστοποίηση απόδοση μοντέλων: Περιλαμβάνει το σύνολο των ενεργειών για την ενίσχυση της απόδοσης των μοντέλων, και τυχόν τροποποιήσεις στις αρχιτεκτονικές των μοντέλων.
- Εκτέλεση εργαστηριακού σεναρίου και καταγραφή KPIs: Αφορά ενέργειες για την τελική καταγραφή και τον έλεγχο επίτευξης των στόχων απόδοσης. Επίσης, περιλαμβάνονται ενέργειες πιλοτικών δοκιμών σε επιλεγμένα σενάρια σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Εκτός από τις 7 ομάδες εργασίας για την ανάπτυξη της λύσης έχει προβλεφθεί και μία 8η η οποία αφορά την ανάπτυξη εκπαιδευτικού υλικού με στόχο ενδιαφερόμενοι να αποκτήσουν το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη της λύσης.

Στην Εικόνα 140 δίνεται μια επισκόπηση της λύσης και των φάσεων ανάπτυξης της. Η 1η φάση (Εικόνα 140.α-γ) καλύπτει τα προαναφερθέντα βήματα 1-3 καθώς και την ανάπτυξη των σχετικών γραφικών εργαλείων για τα συγκεκριμένα μοντέλα (βήμα 5), ενώ η 2η φάση (Εικόνα 140.δ) τα βήματα 4-7.



Εικόνα 140 Παρουσίαση του πλαισίου υλοποίησης λογισμικού της λύσης 18, και των τμημάτων του.

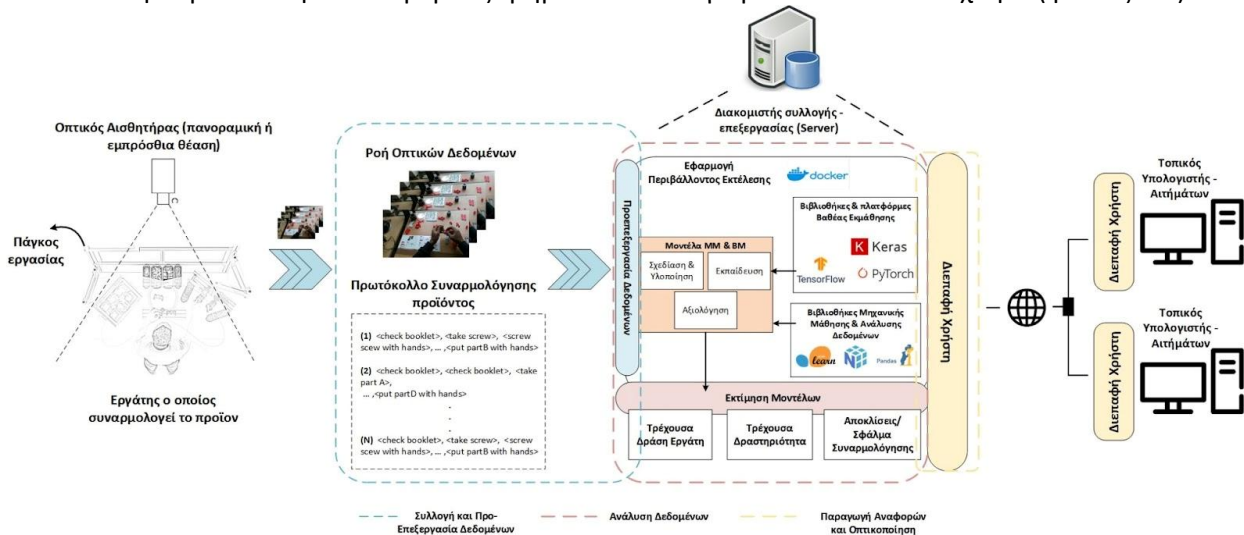
Κατά το πρώτο ήμισυ της ΕΕ2, τα στάδια ανάπτυξης επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης εκτελούμενων δράσεων, με υποστήριξη πολλαπλών ατόμων καθώς και στην ανάπτυξη γραφικών διεπαφών για την αξιοποίηση του μοντέλου, καθώς και της παροχής δυνατότητας προετοιμασίας νέων δεδομένων για την προσαρμογή των μοντέλων σε νέα σενάρια διαδικασιών. Τα συγκεκριμένα στάδια παρουσιάστηκαν στο παραδοτέο Π2.1. Στο παρόν παραδοτέο προσφέρεται μια σύντομη ανασκόπηση των διαδικασιών της 1ης φάσης και παρουσίαση των διαδικασιών της 2ης.

2.20.2 Αρχιτεκτονική τελικής έκδοσης

Στην Εικόνα 141 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση του ολοκληρωμένου πλαισίου αξιοποίησης της λύσης. Συγκεκριμένα, οι προδιαγραφές της λύσης απαιτούν αρχικά την τοποθέτηση ενός οπτικού αισθητήρα (κάμερας) σε πανοραμική ή εμπρόσθια θέση από τον πάγκο εργασίας ενός εργαζομένου, επιτρέποντας την οπτική θέαση τόσο των αντικειμένων χρήσης όσο και του ατόμου. Ο οπτικός αισθητήρας αποστέλλει την ροή οπτικών δεδομένων (βίντεο) σε έναν διακομιστή συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, στον οποίο βρίσκονται εγκατεστημένα τα προσφερόμενα μοντέλα της λύσης ((α) μοντέλο οπτικής αναγνώρισης δράσης, (β) οπτικής αναγνώρισης δράσης-δραστηριότητας) και το λογισμικό εκτέλεσης των γραφικών διεπαφών πρόσβασης στα μοντέλα αυτά, όπως και η γραφική διεπαφή επισήμανσης δεδομένων. Ο διακομιστής είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία των ροών, την διατήρηση των αποτελεσμάτων καθώς και την διάθεση τους μέσω δικτύου σε οποιοδήποτε υπολογιστή στείλει αίτημα επεξεργασίας ενός βίντεο. Η διαθεσιμότητα των εφαρμογών - διεπαφών είναι σε επίπεδο δικτύου (μη τοπική εκτέλεση στους υπολογιστές-αιτημάτων).

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Η τελική έκδοση περιλαμβάνει την υλοποίηση των λειτουργιών που εκτελούνται στον διακομιστή. Ακολουθεί η παρουσίαση των επιμέρους τμημάτων του λογισμικού που αναπτύχθηκε (φάσεις 1-2).



Εικόνα 141 Πλαίσιο αξιοποίησης της Λύσης 18 σε σενάριο παρακολούθησης μιας γραμμής παραγωγής. Εμπρόσθια του πάγκου εργασίας ενός εργαζομένου τοποθετείται ο οπτικός αισθητήρας καταγραφής, η ροή δεδομένων αποστέλλεται μέσω δικτύου στον διακομιστή επεξεργασίας ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα με τα μοντέλα της λύσης. Ο διακομιστής διαθέτει λογισμικό διάθεσης των δεδομένων και αποτελεσμάτων σε υπολογιστές μέσω διαδικτυακά διαθέσιμων γραφικών διεπαφών.

2.20.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.20.3.1 Μοντέλο Οπτικής Αναγνώρισης Ανθρώπινων Δράσεων και Διεπαφή Αξιοποίησης

Το μοντέλο οπτικής αναγνώρισης δράσεων αναπτύχθηκε με σκοπό την ταυτόχρονη αξιοποίηση τόσο των διακριτών όσο και των συνδυαστικών χωροχρονικών συσχετίσεων μεταξύ οπτικών δεδομένων και διαστάσεων σκελετικών πληροφοριών ενός ατόμου σε ακολουθίες εικόνων και δεδομένων πύζας (μέσω Mediapipe[1]), για την παραγωγή αξιόπιστης εκτίμησης της εκτελούμενης δράσης. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στη γλώσσα Python, με χρήση των βιβλιοθηκών TensorFlow και Keras, οι οποίες παρέχουν προηγμένα εργαλεία για την ανάπτυξη και εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου στηρίζεται στη χρήση του γνωστού συνελκτικού νευρωνικού δικτύου I3D[1] για τη χωροχρονική επεξεργασία των δεδομένων βίντεο, μετασχηματίζοντας τον αρχικό ταχυστή εισόδου (Πλήθος εικόνων \times Ύψος \times Πλάτος) σε έναν 2D ταχυστή ($K \times L$), ο οποίος στη συνέχεια επεξεργάζεται από συνελκτικά και πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα με έξοδο ένα 1D διάνυσμα ($1 \times M$). Παράλληλα, τα σκελετικά δεδομένα επεξεργάζονται μέσω Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) νευρώνων για τη μοντελοποίηση των χρονικών συσχετίσεων, παράγοντας 1D διάνυσμα ($1 \times M$). Τα δύο παραγόμενα διανύσματα συνενώνονται και επεξεργάζονται περαιτέρω από πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα, οδηγώντας στην τελική ταξινόμηση της δράσης. Περισσότερες λεπτομέρειες για την αρχιτεκτονική του μοντέλου, την διαδικασία εκπαίδευσης και την αξιολογούμενη απόδοση παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π2.1.

Στην φάση 1 η ανάπτυξη της διεπαφής έγινε με χρήση των βιβλιοθηκών wxPython και Tkinter και με ενσωμάτωση βιβλιοθηκών εκτέλεσης μοντέλων νευρωνικών δικτύων. Στη γραφική διεπαφή, η υποστήριξη αναγνώρισης πολλαπλών ατόμων απαιτεί την χρήση μοντέλων ανίχνευσης και παρακολούθησης, ώστε να καθορίζονται οι περιοχές δράσης κάθε ατόμου με σκοπό την είσοδο τους στο αναγνωριστικό μοντέλο, καθώς στο μοντέλο εξαγωγής σκελετικών δεδομένων. Για την ανίχνευση των περιοχών ύπαρξης ατόμων αξιοποιείται το μοντέλο YOLOv8 (2023)[3], λόγω της κορυφαίας απόδοσης στην ανίχνευση αντικειμένων και των real-time δυνατοτήτων. Για την παρακολούθηση της κίνησης ενός ατόμου καθ' όλη τη διάρκεια του βίντεο, χρησιμοποιείται ο CSRT Tracker[4], ο οποίος συνδυάζει υψηλή ακρίβεια και real-time προδιαγραφές. Λεπτομέρειες για τις προδιαγραφές της διεπαφής στην έκδοση της φάσης 1, είναι διαθέσιμες στο παραδοτέο Π2.1.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Για την εξάλειψη του τοπικού χαρακτήρα εκτέλεσης της διεπαφής όπως είχε διαμορφωθεί κατά την φάση 1 υλοποίησης, κατά την 2η φάση υλοποίησης, η διεπαφή αναβαθμίστηκε σε μια δικτυακά προσβάσιμη εκδοχή μέσω της αξιοποίησης της βιβλιοθήκης Gradio. Η διαδικασία αυτή περιλάμβανε την προσαρμογή των εισόδων/εξόδων σε κατάλληλη μορφή, την ενσωμάτωση backend συναρτήσεων εκτέλεσης των μοντέλων στην διεπαφή Gradio, και τη διαμόρφωση του συστήματος ώστε να επιτρέπει απομακρυσμένη πρόσβαση. Η μετάβαση διευκόλυνε τη χρήση της εφαρμογής από απομακρυσμένους χρήστες, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από τοπικές εγκαταστάσεις και υποδομές.

2.20.3.2 Γραφική Διεπαφή Επισήμανσης Δεδομένων

Κατά την 2η φάση υλοποίησης, η διεπαφή αναβαθμίστηκε σε μια δικτυακά προσβάσιμη εκδοχή μέσω της αξιοποίησης της βιβλιοθήκης Gradio. Η συγκεκριμένη έκδοση διαθέτει παρόμοιες λειτουργίες με την τοπική έκδοση, όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί στο παραδοτέο Π2.1, και τις οποίες συνοπτικά μπορείτε να δείτε με σχετική επισήμανση στην Εικόνα Χ.8 αυτού του παραδοτέου.

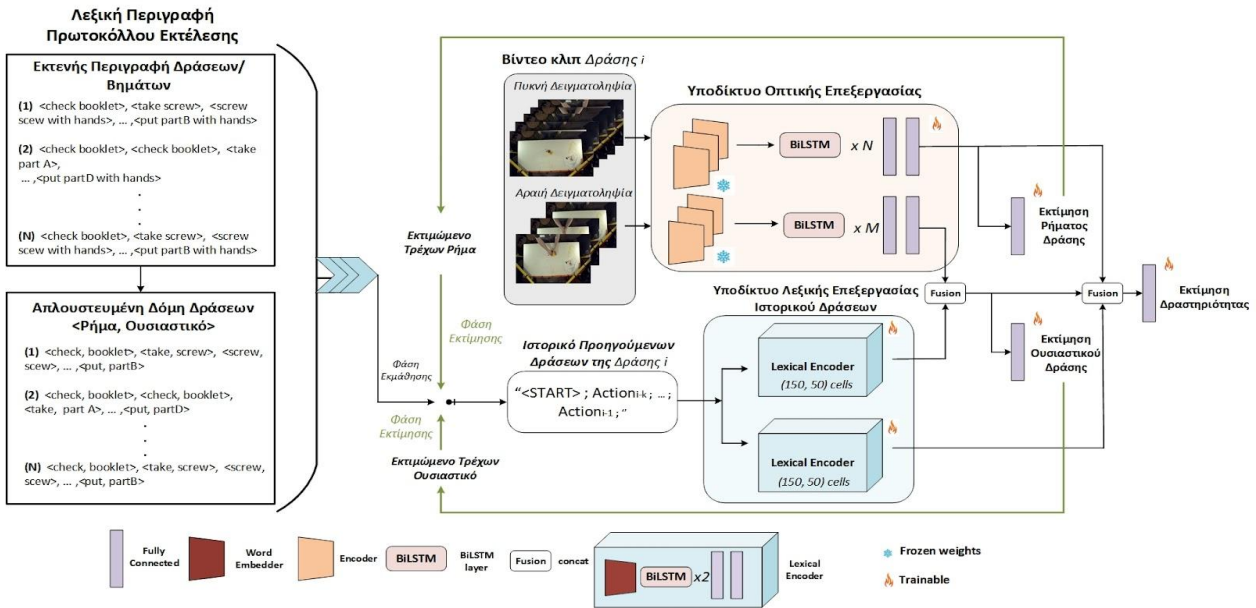
2.20.3.3 Μοντέλο Οπτικής Αναγνώρισης Ανθρώπινων Δράσεων & Δραστηριοτήτων, Διαδικασία Αναγνώρισης Αποκλίσεων και Γραφική Διεπαφή

Ο κύριος κορμός της 2η φάσης υλοποίησης της λύσεως αφορούσε την ανάπτυξη του μοντέλου TN το οποίο επιτρέπει την οπτική αναγνώριση της τρέχουσας δράσης που επιτελεί ένας χρήστης καθώς και την αναγνώριση της διαδικασίας (δραστηριότητας) στην οποία ανήκει η συγκεκριμένη δράση. Επιπρόσθετα, δοσμένων αυτών των εκτιμήσεων και ενός πρωτοκόλλου εκτέλεσης, αναπτύχθηκαν ρουτίνες εξεύρεσης αποκλίσεων/ λαθών από το συγκεκριμένο πρωτόκολλο εκτέλεσης. Τέλος, στο τελευταίο στάδιο αναπτύχθηκε η γραφική διεπαφή αξιοποίησης των δύο λειτουργιών.

Το μοντέλο οπτικής αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων επεξεργάζεται τις συνδυαστικές χωροχρονικές συσχετίσεις των οπτικών δεδομένων από το βίντεο εισόδου καθώς και μια λεξική περιγραφή του ιστορικού των εκτελεσμένων δράσεων. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στη γλώσσα Python, με χρήση των βιβλιοθηκών ανάπτυξης και εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων, TensorFlow και Keras.

Η δομή του μοντέλου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 142, περιλαμβάνει δύο υποδίκτυα καθένα από τα οποία επεξεργάζεται την κάθε πηγή πληροφορίας, το αποτέλεσμα των οποίων συνδυάζεται και επεξεργάζεται περαιτέρω για την εκτίμηση των δυο στόχων. Συγκεκριμένα, η αρχιτεκτονική του υποδικτύου για την εκμάθηση της οπτικής αναπαράστασης αξιοποιεί το γνωστό συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο ResNet50[5] για την χωρική μοντελοποίηση των εικόνων βίντεο, εξαγοντας μια υψηλού επιπέδου αναπαράσταση της πληροφορίας της σκηνής σε κάθε εικόνα, μετατρέποντας τον αρχικό τανυστή εισόδου (Πλήθος εικόνων \times Ύψος \times Πλάτος εικόνας) σε έναν 2D τανυστή (Πλήθος Εικόνων \times L). Αυτός ο τανυστής στη συνέχεια επεξεργάζεται από νευρώνες μοντελοποίησης ακολουθιών χρονικής φύσεως τύπου BiLSTM. Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση του συγκεκριμένου υποδικτύου στην εκμάθηση μιας αναπαράστασης, το υποδίκτυο διαχωρίστηκε σε δύο υποδίκτυα παρόμοιας αρχιτεκτονικής τα οποία επεξεργάζονται την οπτική είσοδο με διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας. Το πρώτο λαμβάνει την ακολουθία που προκύπτει με πυκνή δειγματοληψία της ακολουθίας εισόδου, ενώ το δεύτερο με αραιή. Ο στόχος είναι το πρώτο οπτικό υποδίκτυο να μάθει τα μοτίβα κινήσεως και που υπάρχουν σε κάθε δράση, ενώ το δεύτερο να επικεντρωθεί στην εκμάθηση αναπαραστάσεων για τις σημαντικές αλλαγές των καταστάσεων των στοιχείων της σκηνής τα οποία επηρεάζονται από την εκάστοτε δράση. Ο συνδυασμός (τανυστής ($1 \times M$)) αυτών των δύο αναπαραστάσεων δίνει την πλήρη οπτική περιγραφή της δράσης.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

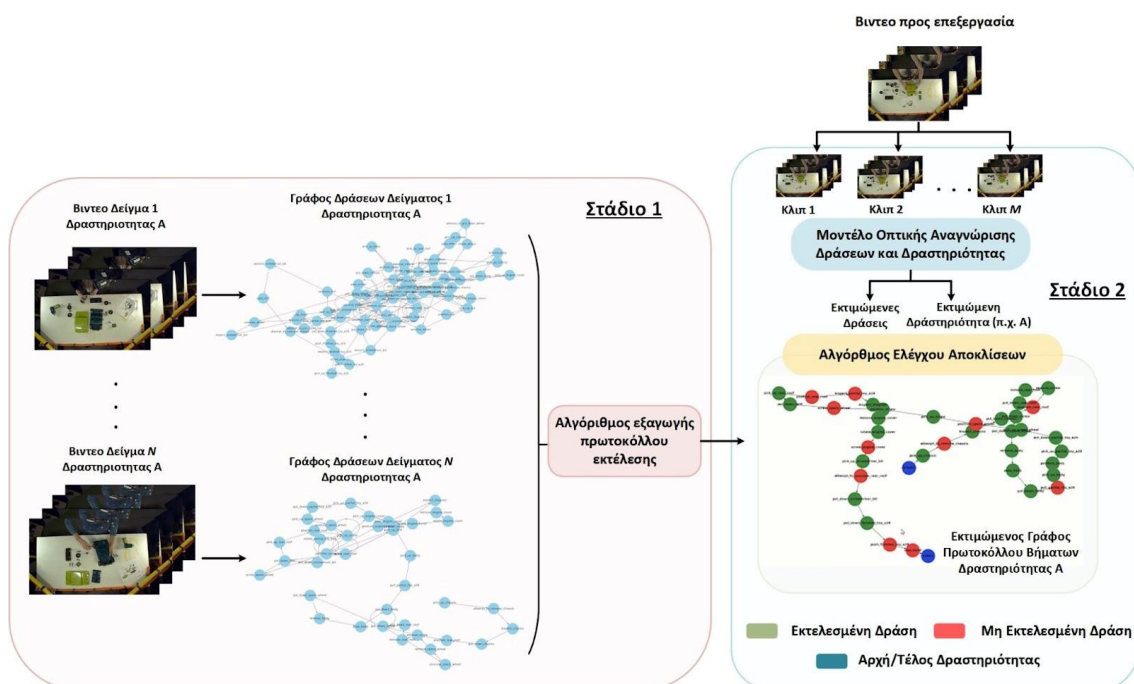


Εικόνα 142 Η αρχιτεκτονική του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων σε διαδικασίες. Κατά την φάση εξαγωγής προβλέψεων (inference phase) το ιστορικό των παρελθοντικών δράσεων τροφοδοτείται με τις προγενέστερες εκτιμήσεις του μοντέλου (πράσινες γραμμές δρομολόγησης πληροφορίας).

Το δεύτερο υποδίκτυο υλοποιείται από ένα πλήθος από νευρώνες τύπου BiLSTM για την μοντελοποίηση της ακολουθίας λέξεων της λεξικής περιγραφής του ιστορικού των παρελθοντικών δράσεων. Κάθε δράση εκφράζεται με δυο λέξεις (α) το ρήμα εκτέλεσης, το οποίο υποδηλώνει το μοτίβο κίνησης, π.χ. πιάνω, αφήνω, και (β) ένα ουσιαστικό, που υποδηλώνει το κυρίαρχο αντικείμενο εμπλοκής στην δράση, π.χ. βίδα, κατσαβίδι. Ο στόχος είναι η αξιοποίηση της πληροφορίας των μεταβάσεων μεταξύ των δράσεων για το προσδιορισμό αφενός της δραστηριότητας στην οποία ανήκει η τρέχουσα δράση, αλλά και ως πληροφορία στην διαδικασία εκτίμησης της τρέχουσας δράσης, η οποία θα συνδυαστεί με την οπτική αναπαράσταση για την ενίσχυση της απόδοσης στην εκτίμηση. Η έξοδος του υποδικτύου είναι ένας ταυστής (1 x M).

Τέλος, οι δυο αναπαραστάσεις συνδυάζονται μέσω συνένωσης (concatenation) και υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία από ένα πλήθος πλήρως συνδεδεμένων επιπέδων, οδηγώντας στην τελική εκτίμηση τόσο της δράσης όσο και της δραστηριότητας. Ως προς το πρόβλημα της εκτίμησης της δράσης, αντί να σχεδιάσουμε ένα μοντέλο το οποίο προσπαθεί να αναγνωρίσει την πλήρη ετικέτα της δράσης, αναπτύξαμε ένα μοντέλο το οποίο εκτιμά ξεχωριστά (α) το ρήμα και (β) το ουσιαστικό που συνθέτουν την ετικέτα, με την τελική αναπαράσταση της δράσης να προκύπτει από τον συνδυασμό των δύο. Αυτή η προσέγγιση επιλέχθηκε για την αποσύνθεση του προβλήματος σε δύο σαφέστερα υπο-προβλήματα, μειώνοντας την πολυπλοκότητα της τελικής πρόβλεψης, ενισχύοντας τη γενίκευση του μοντέλου σε νέους συνδυασμούς ρημάτων και ουσιαστικών, και επιτρέποντας λεπτομερέστερη ανάλυση σφαλμάτων (π.χ. αν το σφάλμα οφείλεται στο ρήμα ή στο ουσιαστικό).

Για την περαιτέρω αξιοποίηση του μοντέλου αναγνώρισης δραστηριοτήτων σε σενάρια διεργασιών μιας παραγωγικής διαδικασίας, σχεδιάστηκαν αλγοριθμικές ρουτίνες ανίχνευσης αποκλίσεων. Οι ρουτίνες επιτρέπουν την αυτόματη σύγκριση της παρατηρούμενης ακολουθίας δράσεων με το προκαθορισμένο πρωτόκολλο εκτέλεσης της δραστηριότητας. Η δυνατότητα ανίχνευσης αποκλίσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπου η τήρηση συγκεκριμένων διαδικασιών και πρωτοκόλλων είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση ποιότητας, ασφάλειας και αποδοτικότητας. Ακόμη και μικρές αποκλίσεις, όπως παραλείψεις βημάτων ή αλλαγές στη σειρά εκτέλεση, μπορεί να οδηγήσουν σε ελαττωματικά προϊόντα ή κινδύνους για την ασφάλεια των εργαζομένων.



Εικόνα 143 Η διαδικασία εξαγωγής και αξιοποίησης πρωτοκόλλων εκτέλεσης δραστηριοτήτων. Στο στάδιο 1, από δείγματα βίντεο κατασκευάζονται τα γραφήματα εκτέλεσης δράσεων, συνενώνονται σε ένα ενιαίο γράφημα και τέλος φιλτράρονται για την κατασκευή του γράφου πρωτοκόλλου εκτέλεσης της δραστηριότητας. Στο στάδιο 2, δοθέντων των εκτιμήσεων του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων & δραστηριοτήτων για ένα βίντεο και των γράφων πρωτοκόλλου, γίνεται η εκτίμηση των παραλειπόμενων δράσεων.

Για την εξεύρεση αποκλίσεων από το πρωτόκολλο εκτέλεσης μιας δραστηριότητας, ακολουθήθηκε μια μεθοδολογική διαδικασία δύο σταδίων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 143. Στο πρώτο στάδιο, δημιουργήθηκε το πρωτόκολλο εκτέλεσης της δραστηριότητας, το οποίο ορίζει τη σειρά εκτέλεσης επιμέρους δράσεων που απαιτούνται για την ολοκλήρωσή της. Το πρωτόκολλο αυτό λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση μελλοντικών εκτελέσεων. Στο δεύτερο στάδιο, ορίστηκαν συγκεκριμένες ρουτίνες για την ανίχνευση αποκλίσεων, όπως αυτές παρατηρούνται σε βίντεο εισόδου. Στα βίντεο αυτά εκτελείται το μοντέλο που περιεγράφηκε προηγουμένως, το οποίο παρέχει εκτιμήσεις για κάθε επιμέρους δράση. Στη συνέχεια, οι παρατηρούμενες δράσεις συγκρίνονται με το προβλεπόμενο πρωτόκολλο, και μέσω των ρουτινών ελέγχου εντοπίζονται περιπτώσεις απόκλισης.

Στάδιο 1 - Ορισμός του πρωτοκόλλου εκτέλεσης: Για την κατασκευή του πρωτοκόλλου εκτέλεσης μιας δραστηριότητας, αξιοποιήθηκαν δοσμένα παραδείγματα εκτέλεσης σε μορφή ακολουθιών δράσεων (λεξική περιγραφή βημάτων). Από τα παραδείγματα αυτά κατασκευάστηκε ένα γράφημα, στο οποίο οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν επιμέρους δράσεις, ενώ οι ακμές προκύπτουν από τις παρατηρούμενες μεταβάσεις/συνδέσεις μεταξύ των δράσεων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε κάθε παράδειγμα εκτέλεσης ενδέχεται να εμφανίζονται επιπλέον βήματα, ή επαναλήψεις βημάτων λόγω αβεβαιότητας ή διορθωτικών κινήσεων εκ μέρους του εκτελεστή, κρίθηκε αναγκαίο το φιλτράρισμα του γράφου ώστε να εξαχθεί το κυρίαρχο πρωτόκολλο εκτέλεσης, δηλαδή η βέλτιστη και αντιπροσωπευτική ακολουθία βασικών βημάτων. Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενέργειες:

- α) Αφαίρεση αυτο-αναφορών (self-loops), ώστε να εξαλειφθούν επαναλήψεις που εντοπίζονται τοπικά στο γράφημα οι οποίες δεν συνεισφέρουν στην γενική δομή της ακολουθίας.
- β) Εξαγωγή του μονοπατιού μέγιστου μήκους, το οποίο περιλαμβάνει μόνο εκείνες τις δράσεις που είναι κοινές σε όλα τα παραδείγματα εκτέλεσης. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι το πρωτόκολλο αναπαριστά τον βασικό κορμό της δραστηριότητας, ανεξάρτητα από μικρές παραλλαγές ή αποκλίσεις που παρατηρούνται σε μεμονωμένες εκτελέσεις.

Η παραγόμενη ακολουθία δράσεων χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς για ανίχνευση αποκλίσεων σε νέες εκτελέσεις, επιτρέποντας την αξιόπιστη αξιολόγηση των παρατηρούμενων συμπεριφορών.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Στάδιο 2 - Διαδικασία Ανίχνευσης Αποκλίσεων: Για τη σύγκριση μεταξύ παρατηρούμενης ακολουθίας δράσεων και του πρωτοκόλλου εκτέλεσης μιας δραστηριότητας, αξιοποιείται το μοντέλο αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων σε συνδυασμό με αλγοριθμικές ρουτίνες ελέγχου. Δοθέντος ενός βίντεο εισόδου, το οποίο υποβάλλεται σε τμηματική επεξεργασία, το σύστημα αξιολογεί κάθε εκτιμώμενη δράση. Συγκεκριμένα, σε κάθε χρονικό σημείο εξετάζεται αν η τρέχουσα εκτίμηση του μοντέλου συνάδει με την αναμενόμενη δράση, όπως αυτή προσδιορίζεται από το γράφημα-πρωτόκολλο εκτέλεσης που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη δραστηριότητα, λαμβάνοντας υπόψη το ιστορικό (δηλαδή τις παρελθοντικές δράσεις που έχουν ήδη εκτιμηθεί). Η διαδικασία ελέγχου υλοποιείται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του βίντεο, επιτρέποντας online ανίχνευση αποκλίσεων και παραγωγή σηματοδότησης σε επίπεδο του εκάστοτε τμήματος του βίντεο προς επεξεργασία: κάθε τμήμα βίντεο επισημαίνεται ως σωστό (correct) ή λανθασμένο (mistake), ανάλογα με το αν η παρατηρούμενη δράση ακολουθεί το αναμενόμενο μονοπάτι στο γράφημα ή αν αποκλίνει από αυτό.

Για την αξιοποίηση του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων- δραστηριοτήτων και της διαδικασίας εξαγωγής των αντίστοιχων γραφικών αναπαραστάσεων (γραφήματα εκτέλεσης) και ελέγχου για αποκλίσεις, αναπτύχθηκε μια γραφική διεπαφή μέσω Gradío η οποία επιτρέπει την εφαρμογή τους σε ένα οποιοδήποτε βίντεο το οποίο αναπαριστά την πορεία εκτέλεσης μιας από τις υποστηριζόμενες δραστηριότητες. Η επιλογή του Gradío ως πλατφόρμα διεπαφής προσφέρει εύκολη και άμεση ενσωμάτωση των διαδικασιών/μοντέλων ένα διαδραστικό περιβάλλον, το οποίο είναι προσβάσιμο ακόμη και από μη εξειδικευμένους χρήστες μέσω web. Έτσι, εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα της διαδικασίας, η ευχρηστία και η επεκτασιμότητα του συστήματος.

2.20.4 Τελική έκδοση και αποτελέσματα

Η τελική έκδοση της λύσης περιλαμβάνει όπως αναφέρθηκε τα ακόλουθα μοντέλα και διεπαφές:

- Μοντέλο Οπτικής Αναγνώρισης Δράσεων: το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα γενικευμένο μοντέλο αναγνώρισης δράσεων μη διαδικαστικής φύσεως.
- Μοντέλο Οπτικής Αναγνώρισης Δράσεων και Δραστηριοτήτων Διαδικαστικής Φύσεως: το οποίο επιτρέπει την αναγνώριση των εκτελούμενων βημάτων/δράσεων μιας σύνθετης δραστηριότητας καθώς και την αναγνώριση της δραστηριότητας αυτής καθαυτής.
- Γραφική Διεπαφή Επισήμανσης Δεδομένων: επιτρέπει την προετοιμασία δεδομένων για την επανεκπαίδευση των δυο προαναφερθέντων μοντέλων σε νέα επιθυμητά σενάρια.

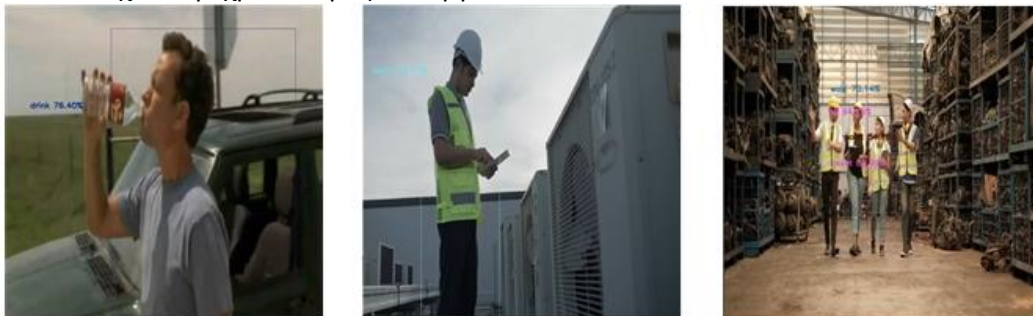
Ακολουθεί η παρουσίαση αποτελεσμάτων και προδιαγραφών των τελικών εκδόσεων.

Μοντέλο Οπτικής Αναγνώρισης Δράσεων

Η τελική έκδοση του μοντέλου, έχει ένα πλήθος από 13.4 εκατομμύρια εκπαιδευόμενες παραμέτρους. Το μοντέλο λαμβάνει ως είσοδο μια ακολουθία 16 RGB εικόνων ανάλυσης 224 x 224, σε συνδυασμό από μια αντίστοιχη ακολουθία 16 διανυσμάτων αναπαράστασης σκελετικών δεδομένων διαστάσεων [1 x 66] τα οποία εξάγονται με την χρήση του μοντέλου MediaPipe[1]. Το εκάστοτε διάνυσμα σκελετικών δεδομένων, περιλαμβάνει 33 συνιστώσες οι οποίες εκφράζουν τις αποστάσεις μεταξύ δύο σκελετικών σημείων, και 33 συνιστώσες οι οποίες εκφράζουν τις γωνίες όπως αυτές ορίζονται μεταξύ δύο σκελετικών σημείων. Ως σταθερό σημείο αναφοράς επιλέχθηκε για τις αποστάσεις ο κορμός του ατόμου, ενώ για τις γωνίες το σκελετικό σημείο της μύτης.

Το μοντέλο αναπτύχθηκε σε δύο εκδοχές, με την 1η να υποστηρίζει την αναγνώριση 8 δράσεων (talk, stand, wave, sit, turn, drink, pour, walk), και την δεύτερη την αναγνώριση 13 δράσεων (raise hand, catch, stand, hit, sit, turn, throw, fall, smoke, pour, push, point & pick, walk). Η έκδοση των 13 δράσεων δέχεται ως είσοδο 32 εικόνες και το μέγεθος του μοντέλου είναι 21.8 εκατομμύρια παραμέτρους. Τα δεδομένα εκπαίδευσης προήλθαν από το σετ εκπαίδευσης του σετ δεδομένων HMDB51[6], από το οποίο αξιοποιήθηκαν τα αντίστοιχα υποσύνολα δράσεων. Το πλήθος των δεδομένων εκπαίδευσης για το υποσύνολο των 8 δράσεων είναι 1146 βίντεο, ενώ για το υποσύνολο των 13 είναι 1484 βίντεο. Η απόδοση του μοντέλου, αξιολογήθηκε με την χρήση του σετ ελέγχου του HMDB51 για τις υποστηριζόμενες δράσεις. Η απόδοση του μοντέλου σε ένα σύνολο από 432 βίντεο για την περίπτωση των 8 δράσεων, κυμάνθηκε στο 53.31% Top 1 και 92.69% Top 5 μέση ακρίβεια, ενώ για την περίπτωση των 13 δράσεων σε ένα σύνολο 611 βίντεο κυμάνθηκε στο 46.35% Top 1 και 80.64% Top 5. Ενδεικτικά ποιοτικά

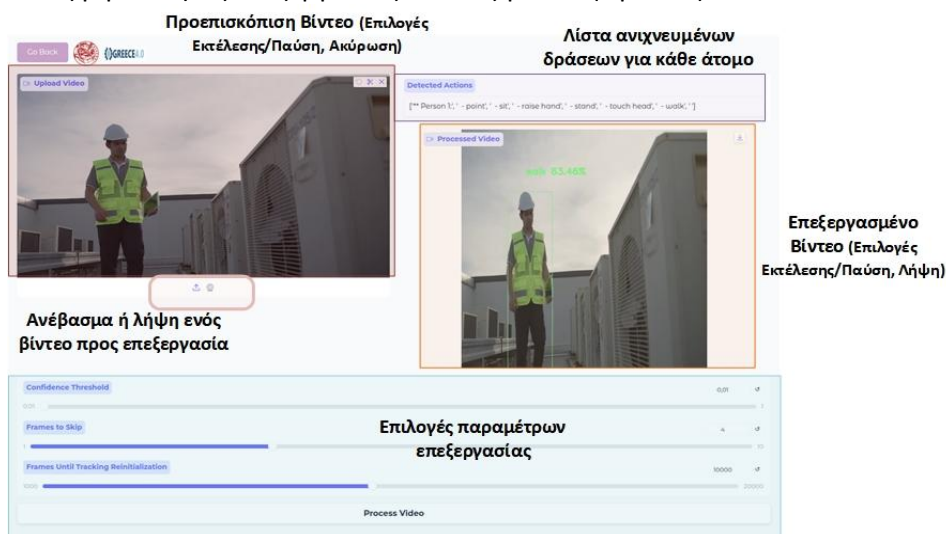
Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής αποτελέσματα σε δείγματα βίντεο ελέγχου παρουσιάζονται στην Εικόνα 144. Η βελτιστοποίηση των μοντέλων θα συνεχιστεί μέχρι το πέρας του έργου.



Εικόνα 144 Στιγμιότυπα αποτελεσμάτων του μοντέλου αναγνώρισης δράσεων με δεδομένα εικόνας και σκελετικές αναπαραστάσεις, (α) παράδειγμα εκτίμησης σε βίντεο μη βιομηχανικής διαδικασίας, (β) παράδειγμα εκτίμησης σε βίντεο βιομηχανικής φύσεως ενός ατόμου, (γ) παράδειγμα εκτίμησης σε βίντεο βιομηχανικής φύσεως πολλαπλών ατόμων - δράσεις. Σε κάθε περίπτωση έχει αναγνωριστεί η θέση στην σκηνή του ατόμου που εκτελεί την δράση και έχει δοθεί εκτίμηση για την τρέχουσα δράση-μαζί με το ποσοστό βεβαιότητας του μοντέλου για την εκτίμηση.

Όπως αναφέρθηκε εκτός από την τοπικού τύπου γραφική διεπαφή του μοντέλου, η οποία παρουσιάστηκε στο παραδοτέο Π2.1, κατά την 2η φάση υλοποίησης αναπτύχθηκε και η διαδικτυακή γραφική διεπαφή, στιγμιότυπα της οποίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 145. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ανεβάσει οποιοδήποτε βίντεο έχει διαθέσιμο ή να βιντεοσκοπήσει επιτόπου νέο, να αλληλεπιδράσει με βασικές παραμέτρους της επεξεργασίας του από το μοντέλο καθώς και να δει οπτικά τα αποτελέσματα της αναγνώρισης (άτομο-δράση) και τέλος να κάνει λήψη του επεξεργασμένου βίντεο στο οποίο έχει γίνει επισήμανση των αποτελεσμάτων. Ως προς τις παραμέτρους επεξεργασίας, αυτές είναι οι ακόλουθες: (1) μέγεθος παραθύρου επεξεργασίας, (2) κατώφλι εμφάνισης αποτελεσμάτων, πάνω από το οποίο θεωρείται ως αποδεκτή η εκτίμηση του μοντέλου, και (3) χρονικό παράθυρο διατήρησης ανίχνευσης ατόμων, μετά το πέρας του οποίου εκτελείται εκ νέου η ρουτίνα ανίχνευσης των ατόμων σε μια σκηνή.

Η τελική έκδοση του μοντέλου, έχει ένα πλήθος από 268 εκατομμύρια εκπαιδευόμενες παραμέτρους. Το μοντέλο λαμβάνει ως είσοδο (α) μια ακολουθία 32 RGB εικόνων ανάλυσης 224 x 224, και (β) ένα διάνυσμα *M* ακεραίων, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις λέξεις του κείμενο της λεξικής περιγραφής των προγενέστερων δράσεων. Το μέγεθος αυτού του διανύσματος είναι ίσο με το μέγεθος της μέγιστης ακολουθίας δράσεων που συναντάτε στην εκτέλεση. Το μοντέλο, έχει αναπτυχθεί στην γλώσσα Python, αξιοποιώντας την πλατφόρμα ανάπτυξης νευρωνικών δικτύων TensorFlow, και Keras, και βασικές βιβλιοθήκες επεξεργασίας εικόνας-βίντεο (OpenCV).



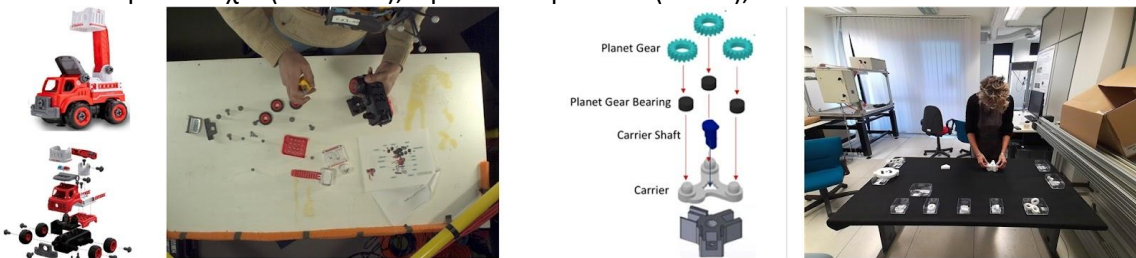
Εικόνα 145 Στιγμιότυπο από την χρήση της διαδικτυακής γραφικής διεπαφής του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων με δεδομένα εικόνας και σκελετικές αναπαραστάσεις, με χρωματική επισήμανση των λειτουργιών/δυνατοτήτων που διαθέτει

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Το μοντέλο έχει ελεγχθεί σε δυο σετ δεδομένων τα οποία έχουν σχεδιαστεί για την ανάπτυξη μεθόδων αναγνώρισης δράσεων-δραστηριοτήτων σε συνθήκες προσομοίωσης βιομηχανικών σεναρίων, με διαφορετικές προδιαγραφές και πολυπλοκότητες. Παραδείγματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 146.

Το πρώτο σετ δεδομένων είναι το Assembly101[7], το οποίο έχει ως θεματολογία την ανάλυση διαδικασιών συναρμολόγησης παιχνιδιών, σε περιπτώσεις στις οποίες οι χρήστες/συναρμολογητές δεν έχουν γνώση για την διαδικασία συναρμολόγησης. Το συγκεκριμένο σετ δεδομένων είναι ίσως η πιο δύσκολη έκφραση του προβλήματος, η οποία αν και σπανίως θα συναντηθεί σε περιπτώσεις υιοθέτησης των μοντέλων στην βαριά βιομηχανία, λόγω της ύπαρξης αυστηρών πρωτοκόλλων συναρμολόγησης αλλά και της εκπαίδευσης των εργαζομένων, ωστόσο είναι συχνή η εμφάνιση της σε βιομηχανίες μικρού όγκου και εξειδίκευσης. Η απόδοση του συστήματος μας σε μια τέτοια περίπτωση κρίνεται σημαντική για την ανάδειξη της ευελιξίας και της ανθεκτικότητας της λύσης ακόμα και σε αντίξοες συνθήκες. Από το συγκεκριμένο σετ δεδομένων επιλέξαμε 5 περιπτώσεις παιχνιδιών (δραστηριότητες), οι οποίες οδηγούν σε ένα πλήθος από 257 δράσεις προς αναγνώριση, οι οποίες διαχωρίζονται σε 21 ρήματα και 42 ουσιαστικά. Το μήκος του διανύσματος εισόδου για την λεξική περιγραφή του ιστορικού των δράσεων είναι 227 λέξεις. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε 3539 βίντεο μικρής διάρκειας τα οποία είναι κατατμημένα κλιπ από βίντεο τα οποία περιέχουν όλη την διαδικασία συναρμολόγησης, και αξιολογήθηκε σε 191 βίντεο αντίστοιχης διαμόρφωσης. Κάθε κλιπ συνοδεύεται από μια λεξική περιγραφή του ιστορικού των προγενέστερων δράσεων. Η απόδοση του μοντέλου ήταν 63.04% Top 1 και 100.0% Top 5 μέση ακρίβεια (mean Accuracy) στην αναγνώριση της εκάστοτε δραστηριότητας (συναρμολόγηση παιχνιδιού), 33.07% Top 1 και 81.52% Top 5 στην εκτίμηση του ρήματος, και 45.65% Top 1 και 74.46% Top 5 στην εκτίμηση του ουσιαστικού. Η απόδοση του μοντέλου είναι ικανοποιητική δεδομένου του πλήθους των δράσεων, της πολυπλοκότητας της διαδικασίας (Εικόνα 146) και της απουσίας εμπειρίας συναρμολόγησης των συμμετεχόντων.

Το δεύτερο σετ δεδομένων (Εικόνα 146), το οποίο αντικατοπτρίζει περισσότερο της ρεαλιστικές συνθήκες σε μια βιομηχανική μονάδα μιας επιχείρησης είναι το HA4M [8], το οποίο έχει ως θεματολογία της διαδικασία συναρμολόγησης ενός πλανητικού συστήματος οδοντωτών τροχών. Η συγκεκριμένη διαδικασία διαχωρίζεται σε 3 δραστηριότητες, οι οποίες ορίζονται με ένα σύνολο 13 διακριτών δράσεων, οι οποίες με την σειρά τους διαμορφώνονται με τον συνδυασμό ενός από 4 ρήματα και ενός από 13 ουσιαστικά. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι πλήρως ορισμένη με ένα αυστηρό πρωτόκολλο συναρμολόγησης και οι συναρμολογητές έχουν εμπειρία στην συγκεκριμένη διαδικασία. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε 3463 δεδομένα βίντεο τα οποία είναι σε κατατμημένα κλιπ από βίντεο τα οποία περιέχουν όλη την διαδικασία συναρμολόγησης, και αξιολογήθηκε σε 1095 βίντεο αντίστοιχης διαμόρφωσης. Κάθε βίντεο-κλιπ συνοδεύεται από μια λεξική περιγραφή του ιστορικού των προγενέστερων δράσεων. Η απόδοση του στο συγκεκριμένο σετ δεδομένων, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στον πίνακα Π1, αξιολογήθηκε ως προς την ακρίβεια (Accuracy) της απόδοσης του αλλά και την ευστοχία (Precision), την ευαισθησία του (Recall), και το F1-score.



Εικόνα 146 Στιγμιότυπα από μια από τις υποστηριζόμενες δραστηριότητες για τα σετ δεδομένων (α) Assembly101 (παιχνίδι α16), (β) HA4M (κατασκευή του εσωτερικού μηχανισμού του πλανητικού συστήματος)

	Top 1/ Top 5 Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Αναγνώριση Δραστηριότητας	93.73% / 100.0%	98.99%	87.55%	91.99%
Αναγνώριση Ρήματος Δράσης	91.15% / 100.0%	92.21%	90.49%	91.21%
Αναγνώριση Ουσιαστικού Δράσης	80.61% / 99.81%	82.86%	77.28%	79.54%

Πίνακας Π1: Αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου στο HA4M σετ δεδομένων.

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Τα αποτελέσματα της απόδοσης του μοντέλου και στα δυο σετ δεδομένων διαφορετικής πολυπλοκότητας, σεναρίων και όγκου πληροφορίας αποδεικνύουν την καλή ικανότητα γενίκευσης του μοντέλου. Η υψηλή απόδοση στο HA4M το οποίο αντικατοπτρίζει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες μιας βιομηχανικής διεργασίας, αναδεικνύουν τις προοπτικές του συγκεκριμένου μοντέλου για την χρήση του στην παραγωγική διαδικασία ως ένα μέσο παρακολούθησης της πορείας εξέλιξης της.

Για την εύκολη αξιοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου αναπτύχθηκε κατάλληλη γραφική διεπαφή χρήστη. Στιγμιότυπο χρήσης της διεπαφής κατά την εφαρμογή της σε παράδειγμα ενός βίντεο ελέγχου στο HA4M σετ δεδομένων παρουσιάζεται στην Εικόνα 147, με επισήμανση των διαθέσιμων λειτουργιών. Η Εικόνα 148 παρουσιάζει την τελική έκδοση της διαδικτυακής γραφικής διεπαφής επισήμανσης δεδομένων για την εφαρμογή των μοντέλων σε νέα σεναρία. Η έκδοση επιτρέπει για ένα οποιοδήποτε βίντεο τύπου mp4/avi ο χρήστης να οριοθετήσει το εκάστοτε τμήμα με μια συγκεκριμένη δράση. Μέσω του εργαλείου μπορεί να προχωρήσει σε κατάτμηση, λήψη του και να αποθηκεύσει τις επισημάνσεις για τις κατατμήσεις σε ένα αρχείο τύπου .csv για να χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευση των μοντέλων.

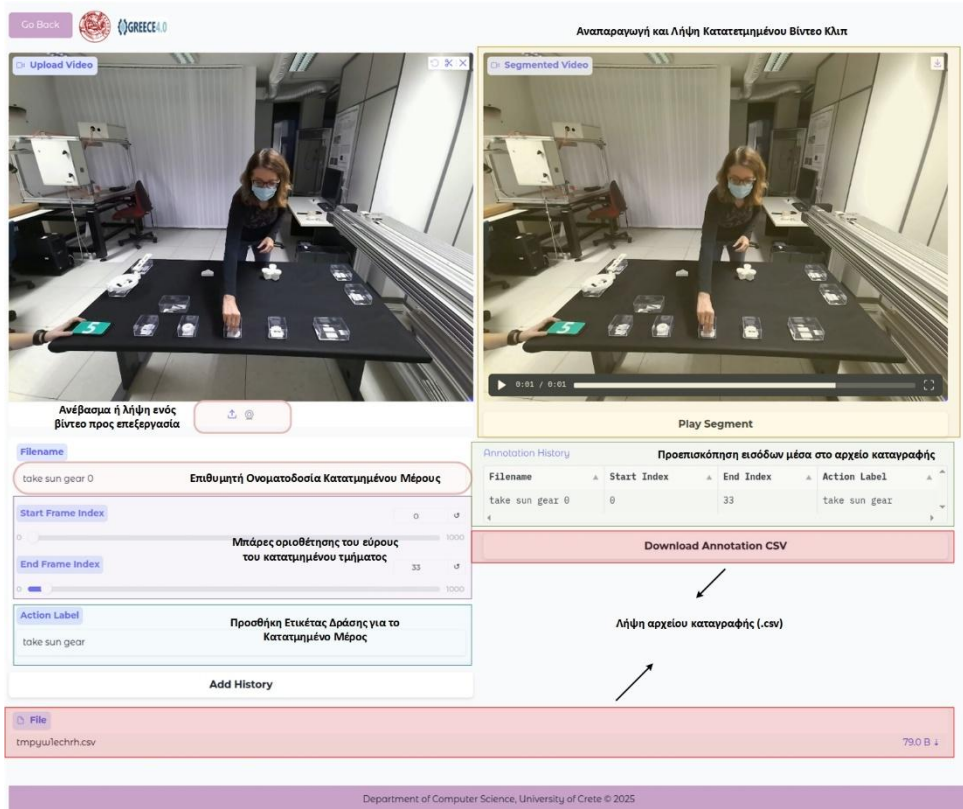
The screenshot displays a web interface for video processing. At the top, there is a 'Go Back' button and the logo for 'GREECE 2.0'. The main section is titled 'Προεπισκόπηση Βίντεο (Επιλογές Εκτέλεσης/Παύση Ακύρωση)'. It features a video player on the left with an 'Upload Video' button and a 'Process Video' button below it. To the right of the video player is a table titled 'Activity Execution Progress Results'.

Start Time	End Time	Action	A_Pz	Activity	Ac_Pz	Mistake
0.00sec	1.07sec	place_sun_shaft	0.82	Block2	0.27	correct
0.50sec	1.57sec	place_sun_gear	0.97	Block2	1.00	correct
1.00sec	5.57sec	place_carrier	0.48	Block2	1.00	correct
5.00sec	6.07sec	pick_up_sun_gear_bearing	1.00	Block2	1.00	correct
5.50sec	8.07sec	place_ring_bear	0.98	Block2	1.00	correct
7.50sec	9.57sec	pick_up_sun_gear_bearing	0.39	Block2	1.00	correct
9.00sec	14.57sec	place_ring_bear	0.96	Block2	1.00	correct

Below the table are several buttons: 'Αντίστροφο ή λήψη ενός βίντεο προς επεξεργασία', 'Process Video', 'Επεξεργασία Βίντεο', 'Show Estimated Activity Graph', and 'Show Expected Activity Graph'. A 'Video Processing Status' section indicates that the video has been processed and provides instructions on how to view the activity graphs.

At the bottom, two activity graphs are shown. The left graph is titled 'Expected Task Graph of Activity Block2' and shows a sequence of nodes connected by lines. The right graph is titled 'Estimated Task Graph of Activity Block2' and shows a similar sequence of nodes. Both graphs include legends for 'Εκτελεσμένη Δράση' (green), 'Μη Εκτελεσμένη Δράση' (red), and 'Κόμβοι Εκκίνησης/Τέλους' (blue).

Εικόνα 147 Στιγμιότυπο από την χρήση της διαδικτυακής γραφικής διεπαφής του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων, με χρωματική επισήμανση των υποστηριζόμενων λειτουργιών.



Εικόνα 148 Στιγμιότυπο από την χρήση της διαδικτυακής γραφικής διεπαφής επισήμανσης δεδομένων.

2.20.5 Αναφορές

- [1] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., ... & Grundmann, M. (2019). Mediapipe: A framework for building perception pipelines. arXiv preprint arXiv:1906.08172.
- [2] Carreira, J., & Zisserman, A. (2017). Quo vadis, action recognition? a new model and the kinetics dataset. In proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 6299-6308).
- [3] Sohan, M., Sai Ram, T., Reddy, R., & Venkata, C. (2024). A review on yolov8 and its advancements. In International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics (pp. 529-545). Springer, Singapore.
- [4] Lukezic, A., Vojir, T., Čehovin Zajc, L., Matas, J., & Kristan, M. (2017). Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 6309-6318).
- [5] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Deep residual learning for image recognition. 10.48550. arXiv preprint arXiv.1512.03385.
- [6] Kuehne, H., Jhuang, H., Garrote, E., Poggio, T., & Serre, T. (2011, November). HMDB: a large video database for human motion recognition. In 2011 International conference on computer vision (pp. 2556-2563). IEEE.
- [7] Sener, F., Chatterjee, D., Sheleпов, D., He, K., Singhania, D., Wang, R., & Yao, A. (2022). Assembly101: A large-scale multi-view video dataset for understanding procedural activities. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 21096-21106).
- [8] Cicirelli, G., Marani, R., Romeo, L., Domínguez, M. G., Heras, J., Perri, A. G., & D’Orazio, T. (2022). The HA4M dataset: Multi-Modal Monitoring of an assembly task for Human Action recognition in Manufacturing. Scientific Data, 9(1), 745.

3 Συμπεράσματα

Π2.2 - Τελική έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Το παρόν Παραδοτέο Π2.2 παρουσιάζει την τελική έκδοση των τεχνολογικών λύσεων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του έργου Greece4.0 για τη βελτιστοποίηση των κυβερνο-φυσικών συστημάτων παραγωγής. Σε συνέχεια της αρχικής αποτύπωσης της αρχιτεκτονικής τους και της ενδιάμεσης φάσης ανάπτυξης, το παραδοτέο συγκεντρώνει και τεκμηριώνει τις τελικές εκδόσεις των εφαρμογών, παρουσιάζοντας τα στάδια υλοποίησης, την αρχιτεκτονική τους, τις λεπτομέρειες ανάπτυξης των επιμέρους τμημάτων και τα τελικά αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό αποτυπώνεται η εξέλιξη των λύσεων σε ένα ολοκληρωμένο τεχνολογικό σύνολο με σαφή προσανατολισμό προς την αξιοποίηση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Οι εφαρμογές που περιλαμβάνονται στο παραδοτέο καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0, όπως αυτόνομα ρομποτικά συστήματα, ψηφιακά δίδυμα εξοπλισμού και διαδικασιών, πλατφόρμες ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων IIoT, συστήματα λήψης αποφάσεων, τεχνολογίες εκπαίδευσης και μεταφοράς γνώσης με XR, εργαλεία κυβερνοασφάλειας, καθώς και λύσεις οπτικής κατανόησης σκηνής και επιθεώρησης διαδικασιών. Η τελική μορφή τους αναδεικνύει όχι μόνο την τεχνική τους ολοκλήρωση, αλλά και τη δυνατότητα παραμετροποίησης, διαλειτουργικότητας και ενσωμάτωσης σε σύγχρονα παραγωγικά περιβάλλοντα, ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

Συνολικά, το Παραδοτέο Π2.2 καταδεικνύει ότι το έργο Greece4.0 έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός συνεκτικού και πολυδιάστατου συνόλου τεχνολογικών λύσεων, το οποίο αποτελεί τη βάση για τα επόμενα στάδια δοκιμής, ελέγχου, αξιολόγησης και περαιτέρω αξιοποίησης. Η οριστικοποίηση των λύσεων αυτών συμβάλλει ουσιαστικά στην ενίσχυση της ευελιξίας, της αποδοτικότητας, της ασφάλειας και της ευφυΐας των παραγωγικών διεργασιών, υποστηρίζοντας τον ευρύτερο στόχο του έργου για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ελληνικής μεταποιητικής βιομηχανίας.

4 Αναφορές

ⁱ Göran Selander, John Preuß Mattsson, and Francesca Palombini. Ephemeral Diffie-Hellman Over COSE (EDHOC). RFC 9528. Mar. 2024. DOI: 10.17487/RFC9528. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9528>

ⁱⁱ National Institute Standards and Technology (NIST). Post-Quantum Cryptography. 2018. URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography>

ⁱⁱⁱ “uOSCORE / uEDHOC,” URL: <https://github.com/Fraunhofer-AISEC/uoscore-uedhoc>, accessed: 2024-06-02.

^{iv} “liboqs”, URL: <https://openquantumsafe.org/liboqs/>, accessed: 2024-06-02.

^v “mupq”: The minimalist post-quantum cryptography library,” 2023, accessed: 2024-10-29. [Online]. Available: <https://github.com/mupq/mupq>

^{vi} “pqm4”, “PQM4 benchmarks with NIST initial drafts for FIPS 203,204,” <https://github.com/mupq/pqm4/blob/8d44b724396ddbc0db55d5de93bec252cedb9c04/benchmarks.md>, 2024, accessed: 29-10-2024

^{vii} “PQClean”, <https://github.com/PQClean/PQClean>, accessed: 2024-10-29

^{viii} Zephyr Project, “Zephyr project: Scalable real-time operating system (rtos) for embedded devices,” 2024, accessed: 2024-09-30. [Online]. Available: <https://zephyrproject.org/>

^{ix} Carsten Bormann and Zach Shelby. Block-Wise Transfers in the Constrained Application Protocol (CoAP). RFC 7959. Aug. 2016. DOI: 10.17487/RFC7959. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7959>.