

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:

Π2.1

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

Οκτώβριος 2024

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Ιστορικό αναθεωρήσεων του κειμένου

Κωδ.	Ημ/νία	Περιγραφή
0.1	01/08	Initial template
0.2	01/09	Partner Input Collection
1.0	30/10	First Final Version
1.1	31/10	Updated Introduction & Conclusions

Περίληψη - Ελληνικά

Το παραδοτέο Π2.1 αφορά τις ενδιάμεσες εκδόσεις των λύσεων που αναπτύσσονται στο πλαίσιο του έργου "Greece 4.0". Στο έγγραφο αυτό παρουσιάζεται η τρέχουσα κατάσταση κάθε λύσης, η πρόοδος στην ανάπτυξή τους, καθώς και οι βελτιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από την αρχική φάση του σχεδιασμού. Κάθε λύση εξετάζεται με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τις λειτουργικές δυνατότητες και τις προκλήσεις που έχουν αντιμετωπιστεί κατά την υλοποίηση. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι εφαρμογές όπως αυτόνομα ρομποτικά συστήματα, ψηφιακά δίδυμα για βιομηχανικά ρομπότ, λογισμικά βελτιστοποίησης προσθετικής κατασκευής και συστήματα λήψης αποφάσεων με τεχνητή νοημοσύνη. Οι ενδιάμεσες εκδόσεις παρέχουν ήδη βελτιωμένες λειτουργίες και αρχικές δοκιμές σε εργαστηριακά περιβάλλοντα, ενώ αξιολογούνται με βάση την απόδοσή τους σε σενάρια εφαρμογής. Το παραδοτέο Π2.1 επικεντρώνεται επίσης στη συνεχιζόμενη αξιολόγηση του βιομηχανικού αντίκτυπου των λύσεων, καθώς και στην προσαρμογή τους στις απαιτήσεις των χρηστών και των βιομηχανικών διαδικασιών. Μέσα από τις δοκιμές και την ανατροφοδότηση από τις ενδιάμεσες εκδόσεις, δίνεται η δυνατότητα να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις και βελτιώσεις πριν την τελική τους ολοκλήρωση. Συνολικά, το παραδοτέο Π2.1 επιβεβαιώνει τη δυναμική των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0 που αξιοποιούνται στο έργο, όπως ανάλυση μεγάλων δεδομένων, αυτόνομα ρομπότ, ψηφιακά δίδυμα και τεχνητή νοημοσύνη, προς την κατεύθυνση του ψηφιακού μετασχηματισμού της ελληνικής βιομηχανίας. Οι λύσεις αυτές στοχεύουν στη βελτίωση της παραγωγικότητας, της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας, υποστηρίζοντας παράλληλα τη συνεχή καινοτομία και τη διεθνή ανταγωνιστικότητα της ελληνικής βιομηχανίας.

Περίληψη - Αγγλικά

The deliverable D2.1 concerns the intermediate versions of the solutions developed within the framework of the "Greece 4.0" project. This document presents the current state of each solution, the progress in their development, as well as the improvements made since the initial design phase. Each solution is examined based on its technical characteristics, functional capabilities, and the challenges encountered during implementation. Specifically, applications such as autonomous robotic systems, digital twins for industrial robots, software for optimizing additive manufacturing, and decision-making systems powered by artificial intelligence are analyzed. The intermediate versions already provide enhanced functionalities and undergo initial testing in laboratory environments, while their performance is evaluated in application scenarios. Deliverable D2.1 also focuses on the ongoing assessment of the industrial impact of these solutions, as well as their adaptation to user and industrial process requirements. Through testing and feedback from the intermediate versions, necessary corrections and improvements can be made before their final completion. Overall, deliverable D2.1 confirms the potential of Industry 4.0 technologies utilized in the project—such as big data analytics, autonomous robots, digital twins, and artificial intelligence—toward the digital transformation of Greek industry. These solutions aim to enhance productivity, efficiency, and sustainability while supporting continuous innovation and the international competitiveness of Greek industry.

Περιεχόμενα

Περίληψη - Ελληνικά.....	3
Περίληψη - Αγγλικά.....	3
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος Εικόνων	7
Κατάλογος Πινάκων	11
1 Εισαγωγή.....	12
1.1 Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου	12
1.2 Υλοποίηση Ενδιάμεσης Έκδοσης	12
2 Ενδιάμεσες Εκδόσεις των Εφαρμογών του έργου Greece4.0	14
2.1 Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής.....	14
2.1.1 Στάδια υλοποίησης λύσης	14
2.1.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	14
2.1.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	15
2.1.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	19
2.2 Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης.....	20
2.2.1 Στάδια υλοποίησης λύσης	20
2.2.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	21
2.2.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	21
2.2.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	25
2.3 Λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση υβριδικών μεθόδων.....	26
2.3.1 Στάδια υλοποίησης λύσης	26
2.3.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	26
2.3.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	27
2.3.4 Παρουσίαση υλικού ενδιάμεσης έκδοσης και ενδιάμεσων αποτελεσμάτων	30
2.4 Λογισμικό για την δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης 32.....	32
2.4.1 Στάδια υλοποίησης λύσης	32
2.4.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	33
2.4.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	35
2.4.4 Ενδιάμεσα αποτελέσματα και έκδοση λύσης.....	36
2.5.α Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Εξοπλισμού στην Βιομηχανία 4.0	39
2.5.α.1 Στάδια υλοποίησης λύσης	39
2.5.α.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	40
2.5.α.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	42
2.5.α.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	44
2.5.β Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Διαδικασιών στην Βιομηχανία 4.0	48
2.5.β.1 Στάδια υλοποίησης λύσης	48
2.5.β.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	48
2.5.β.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	51
2.5.β.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	55
2.6 Πλατφόρμα Ανάλυσης και Διαχείρισης Δεδομένων από το Βιομηχανικό Δίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things).....	58
2.6.1 Στάδια υλοποίησης λύσης	58
2.6.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	58
2.6.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	59

2.6.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	60
2.7	Ολογράμματα βασισμένα σε Ψηφιακά Δίδυμα για μεταφορά γνώσης και εκπαίδευση εργαζομένων-χειριστών στο περιβάλλον της Βιομηχανίας 4.0	62
2.7.1	Στάδια υλοποίησης λύσης	62
2.7.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	63
2.7.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	64
2.7.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	65
2.8	Εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής και διαχείρισης προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής.....	67
2.8.1	Στάδια υλοποίησης λύσης	67
2.8.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	68
2.8.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	68
2.8.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	70
2.9	Κυκλικές αλυσίδες αξίας μέσω διαχείρισης και παρακολούθησης δευτερογενών υλικών με χρήση ψηφιακών διδύμων και διαβατηρίων προϊόντων	75
2.9.1	Στάδια υλοποίησης λύσης	75
2.9.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	76
2.9.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	77
2.9.4	Παραδείγματα χρήσης και παρουσίαση υλικού ενδιάμεσης έκδοσης	81
2.10.a	Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων.....	83
2.10.a.1	Στάδια υλοποίησης λύσης.....	83
2.10.a.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	84
2.10.a.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων.....	85
2.10.a.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα	86
2.10.b	Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικού ελέγχου.....	89
2.10.b.1	Στάδια υλοποίησης.....	89
2.10.b.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	89
2.10.b.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων.....	90
2.10.b.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα	91
2.11	Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής.....	93
2.11.1	Στάδια υλοποίησης λύσης	93
2.11.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	94
2.11.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	95
2.11.4	Ενδιάμεση έκδοση λύσης και αποτελέσματα	95
2.12	Βιομηχανικό μετασύνταξη με την χρήση επεξηγηματικής τεχνητής νοημοσύνης για εφαρμογές επιχειρηματικής νοημοσύνης.....	100
2.12.1	Στάδια υλοποίησης.....	100
2.12.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	100
2.12.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	101
2.12.4	Παραδείγματα χρήσης - ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	105
2.13	Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες	108
2.13.1	Στάδια υλοποίησης.....	108
2.13.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	109
2.13.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	110
2.13.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	112
2.14	Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής.....	114
2.14.1	Στάδια υλοποίησης.....	114
2.14.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	115
2.14.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	117
2.14.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα.....	119

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

2.15	Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα	120
2.15.1	Στάδια υλοποίησης.....	120
2.15.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	121
2.15.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	122
2.15.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα	124
2.16	Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ.....	127
2.16.1	Στάδια υλοποίησης.....	127
2.16.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	128
2.16.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	128
2.16.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα	130
2.17	Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία	133
2.17.1	Στάδια υλοποίησης.....	134
2.17.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	135
2.17.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	137
2.17.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα	139
2.18	Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων.....	141
2.18.1	Στάδια υλοποίησης.....	141
2.18.2	Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης	142
2.18.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων	143
2.18.4	Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα	144
3	Συμπεράσματα	148
4	Αναφορές	149

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική ρομποτικού συστήματος για αυτόνομη πλοήγηση και χειρισμό αντικειμένων	15
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική συστημάτων όρασης.....	16
Εικόνα 3: Επισημασμένη εικόνα για την εκπαίδευση μοντέλου τμηματοποίησης	17
Εικόνα 4: Ψηφιακή σκηνή που περιέχει συνθετικά δεδομένα στο BlenderProc.....	18
Εικόνα 5: Απόκριση μοντέλου σημείων προσάρτησης	19
Εικόνα 6: Δείγμα εικόνας για εκπαίδευση μοντέλου τμηματοποίησης και απόκριση μοντέλου.....	20
Εικόνα 7: Προβλέψεις μοντέλου σε πραγματικά αντικείμενα με την μέθοδο object detection - bounding box (αριστερά) και semantic segmentation (δεξιά)	20
Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου και εργαλείου προσομοίωσης.....	21
Εικόνα 9: Σημεία κλειδιά στο ανθρώπινο σκελετό και δημιουργία εμποδίων προς αποφυγή.....	22
Εικόνα 10: Αποφυγή ανθρώπου με την χρήση σημείων κλειδιών και δημιουργία δυναμικών εμποδίων.....	23
Εικόνα 11: Περιβάλλον προσομοίωσης σε Unity.....	24
Εικόνα 12: Αποφυγή ανθρώπου	25
Εικόνα 13: Ολόγραμμα τροχιάς ρομποτικού βραχίονα στο ψηφιακό δίδυμο.....	25
Εικόνα 14: Πάνελ παρουσίασης αποτελεσμάτων όρασης στο ψηφιακό δίδυμο	26
Εικόνα 15: Αρχιτεκτονική πραγματικού συστήματος.....	27
Εικόνα 16: Οπτικοποίηση satellite defect.....	28
Εικόνα 17: Οπτικοποίηση φαινομένου stubbing	28
Εικόνα 18: Πειραματικές γεωμετρίες.....	28
Εικόνα 19: Αλγόριθμος εξαγωγής χαρακτηριστικών.....	29
Εικόνα 20: Πίνακας σύγχυσης και διάγραμμα περιοχών μοντέλου	30
Εικόνα 21: Πειράματα επικύρωσης μοντέλου και συμπεριφορά ισχύς laser.....	31
Εικόνα 22: Οπτικοποίηση κατά την διεργασία.	31
Εικόνα 23: Παραστατική αρχιτεκτονική εφαρμογής συνθετικής παραγωγής δεδομένων.....	33
Εικόνα 24: Αρχιτεκτονική εφαρμογής παραγωγής συνθετικών δεδομένων	34
Εικόνα 25: Αρχιτεκτονική εφαρμογής εκπαίδευσης μοντέλων TN	34
Εικόνα 26: Μοντελοποίηση σκηνής στο γραφικό περιβάλλον Blender3D	35
Εικόνα 27: Παραγωγή συνθετικών δεδομένων και επισήμανση δεδομένων (labelling)	37
Εικόνα 28: Αναγνώριση πάνω σε συνθετικά δεδομένα (αριστερά) και Αναπαράσταση πραγματικού σεναρίου	38
Εικόνα 29: Αναπαράσταση εισαγωγής αντικειμένων, επιλογής φόντου και εισαγωγής παραμέτρων παραγωγής συνθετικών δεδομένων μέσα από το κεντρικό περιβάλλον χρήστη	39
Εικόνα 30: Αρχιτεκτονική λύσης	41
Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής πληροφορίας.....	42
Εικόνα 32: Επισκόπηση Eclipse Ditto Thing	42
Εικόνα 33: Οικοσύστημα τεχνολογιών Angular	43
Εικόνα 34: Επισκόπηση Dashboard 1	44
Εικόνα 35: Επισκόπηση Dashboard 2	44
Εικόνα 36: 3D Viewer	45
Εικόνα 37: Μενού επιλογής αισθητήρων	45
Εικόνα 38: Διαχείριση ψηφιακών διδύμων	46
Εικόνα 39: TruPunch 500	47
Εικόνα 40: Τοποθέτηση αισθητήρα	47
Εικόνα 41: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης λύσης	49
Εικόνα 42: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης λύσης – Επίπεδο παρεχόμενων υπηρεσιών.....	51
Εικόνα 43: Το αποτέλεσμα της χρήσης του URDF Importer	52
Εικόνα 44: Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής και Ψηφιακού διδύμου	55
Εικόνα 45: Σενάριο εκτέλεσης Ψηφιακού Διδύμου	56

Εικόνα 46: Μοντελοποίηση γραμμής παραγωγής με AutomationML	56
Εικόνα 47: Ορισμός Σεναρίου	57
Εικόνα 48: Παρακολούθηση εκτέλεσης σεναρίου μέσω Simulation Scenario Editor	57
Εικόνα 49: Παρακολούθηση λειτουργίας της πραγματικής γραμμής παραγωγής μέσω του Ψηφιακού Διδύμου	57
Εικόνα 50 – Αρχιτεκτονική Λύσης IIoT.....	59
Εικόνα 51 – Περιβάλλον Χρήστη Πλατφόρμας IIoT (Dashboard).....	60
Εικόνα 52 – Εργαλείο Αποστολής Δεδομένων με MQTT στο PLC	60
Εικόνα 53 – Δεδομένα στο Dashboard IIoT Πλατφόρμας.....	61
Εικόνα 54: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης λύσης	63
Εικόνα 55: XR Creator Nodes	64
Εικόνα 56: Εφαρμογή XR-Viewer	65
Εικόνα 57: Αναπαράσταση του σεναρίου στην εφαρμογή XR-Creator.....	66
Εικόνα 58: Το σενάριο χρήσης στην εφαρμογή XR-Viewer	66
Εικόνα 59: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης για την εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής	68
Εικόνα 60: Βασικά στάδια υλοποίησης εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής.....	69
Εικόνα 61: Σχηματική αναπαράσταση γραμμής παραγωγής για το σενάριο προσομοίωσης.....	70
Εικόνα 62: Διακύμανση α) του μέσου ενδοεπιχειρησιακού αποθέματος (WIP), β) του μέσου αποθέματος (backlog BL) και γ) του μέσου κόστους ενέργειας (CE) για δύο προσεγγίσεις ελέγχου και σταθερό ρυθμό ζήτησης $d=1,2$	71
Εικόνα 63: Διακύμανση α) του μέσου ενδοεπιχειρησιακού αποθέματος (WIP) και β) του μέσου αποθέματος (backlog BL) για διαφορετικούς ρυθμούς ζήτησης d	72
Εικόνα 64: Σχεδίαση αρχιτεκτονικής δικτύου παραγωγής σε περιβάλλον Simulink/Matlab	73
Εικόνα 65: Γραφικό περιβάλλον χρήστη λογισμικού προγραμματισμού ανθεκτικής κι ευέλικτης παραγωγής	74
Εικόνα 66: Στιγμιότυπα λογισμικού προγραμματισμού παραγωγής για την διαδικασία της δημιουργίας “εργασίας”	74
Εικόνα 67: Στιγμιότυπα λογισμικού προγραμματισμού παραγωγής για την διαδικασία της επεξεργασίας παραμέτρων	75
Εικόνα 68: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης για τις κυκλικές αλυσίδες αξίας.....	76
Εικόνα 69: Έναρξη του Εργαλείου PSM (αριστερά) και Διαδικασία ανάπτυξης μοντέλου βιομηχανικής αλυσίδας (δεξιά)	77
Εικόνα 70: Δημιουργία μοντέλου στο PSM, καθορισμός παραμέτρων και υπολογισμός	78
Εικόνα 71: SBSC Tool & KPI Inventory Tab	81
Εικόνα 72: SBSC Tool & Process Per Selected KPI Tab.....	82
Εικόνα 73: SBSC Tool & Results Tab.....	82
Εικόνα 74: Οπτικοποιήσεις αποτελεσμάτων (αρχικές) για περιβαλλοντικούς δείκτες (αριστερά) και κοινωνικούς (δεξιά) στο Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντων.....	83
Εικόνα 75:: Οπτικοποιήσεις αποτελεσμάτων (αρχικές) για οικονομικούς δείκτες (αριστερά) και συγκριτικό (δεξιά).....	83
Εικόνα 76: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων.....	84
Εικόνα 77: Τεχνική αρχιτεκτονική και λεπτομέρειες υλοποίησης ενδιάμεσης έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων	85
Εικόνα 78: Προεπισκόπηση της διεπαφής χρήστη του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων	87
Εικόνα 79: Αξιολόγηση απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep.....	88
Εικόνα 80: Αξιολόγηση απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep με εξομάλυνση	88
Εικόνα 81: Αρχιτεκτονική του συστήματος.....	90
Εικόνα 82: Συμπεριφορά σχεδιασμένου ρυθμιστή MPC σε γλώσσα Python-CasADi σε περίπτωση όπου η επιθυμητή τιμή στόχος για τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή είναι ίση με 50 nm.....	92
Εικόνα 83: Στιγμιότυπο από τον Modbus Server με την εκτέλεση του MPC.....	93

Εικόνα 84: Αρχιτεκτονική Ενδιάμεσης Έκδοσης της Λύσης	95
Εικόνα 85: Εισαγωγή Δεδομένων στην πλατφόρμα (α); Επιλογή Χρονικού Εύρους Δεδομένων (β)	96
Εικόνα 86: Διαθέσιμα Φίλτρα της πλατφόρμας	96
Εικόνα 87: Ημερήσια Παραγωγικότητα Εργαζομένων (Pick & Pack Data)	96
Εικόνα 88: Εισαγωγή Δεδομένων και Καθορισμός Παραμέτρων Μοντέλου	97
Εικόνα 89: Λειτουργία Μοντέλου και Αποτύπωση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης	97
Εικόνα 90: Ημερήσια Δεδομένα Συλλογής (Daily Picking Data)	98
Εικόνα 91: Δεδομένα Συλλογής & Συσκευασίας (Pick & Pack Data)	99
Εικόνα 92: Επισκόπηση Μοντέλου Προσομοίωσης Αποθηκευτικής Διάταξης	99
Εικόνα 93: Αρχιτεκτονική του Συστήματος για την Εκπαίδευση του Προσωπικού σε Βιομηχανικό Μετά-Σύμπαν	100
Εικόνα 94: Μορφή ερωτηματολογίου πρόθεσης χρήσης φορητών συσκευών εικονικής πραγματικότητας	102
Εικόνα 95: Εγκατάσταση όπου βασίστηκε η διαμόρφωση του εικονικού σεναρίου	102
Εικόνα 96: Αρχιτεκτονική του υπό-συστήματος μετατροπής ομιλίας σε ψηφιακό κείμενο και ανάλυσης συναισθήματος	103
Εικόνα 97: Αναπαράσταση γράφου ενεργειών του χρήστη που δημιουργείται στον πυρήνα	105
Εικόνα 98: Πρότυπο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας	107
Εικόνα 99: Εξοπλισμός και Point of View του χρήστη	107
Εικόνα 100: Γενική αρχιτεκτονική λύσης	109
Εικόνα 101: Ενδεικτικές εικόνες από το σύνολο εκπαίδευσης του αλγορίθμου εντοπισμού δεδομένων	111
Εικόνα 102: Ενδεικτικές εικόνες από το σύνολο εκπαίδευσης του αλγορίθμου στον προσομοιωτή	112
Εικόνα 103: Ενδεικτικά αποτελέσματα ακριβείας και εμπιστοσύνης του μοντέλου YOLO για τον εντοπισμό αντικειμένων	113
Εικόνα 104: Πίνακας σύγχυσης του μοντέλου για την κατηγοριοποίηση των αντικειμένων	113
Εικόνα 105: Ενδεικτικές εικόνες για την περαιτέρω εκπαίδευση του μοντέλου αναγνώρισης αντικειμένων	114
Εικόνα 106: Ενδεικτικά αποτελέσματα αναγνώρισης αντικειμένων από το περιβάλλον προσομοίωσης	114
Εικόνα 107 Αρχιτεκτονική Μηχανισμών Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής	116
Εικόνα 108 Ανταλλαγή Μηνυμάτων στο PQ-EDHOC	118
Εικόνα 109 Σύνολα Κρυπτογραφικών Αλγορίθμων PQC	119
Εικόνα 110 Μονάδα PQ-EDHOC	120
Εικόνα 111: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης συστήματος	121
Εικόνα 112: Παράδειγμα ανάλυσης δικτυακής κίνησης και αναγνώρισης ανωμαλιών (εργαλείο suricata)	125
Εικόνα 113: Παράδειγμα γραφικής παρουσίασης αρχείων καταγραφής και συμβάντων	125
Εικόνα 114: Παράδειγμα στατικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού (εργαλείο malwareview)	126
Εικόνα 115: Παράδειγμα δυναμικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού (εργαλείο drakvuf)	127
Εικόνα 116: Παράδειγμα καταγραφής και διαχείρισης συμβάντων (εργαλείο MISP)	127
Εικόνα 117: Αρχιτεκτονική λύσης ασφαλούς αλληλεπίδρασης ανθρώπου ρομπότ	128
Εικόνα 118: Ανίχνευση χειριστών	129
Εικόνα 119: Εντοπισμός αρθρώσεων	129
Εικόνα 120: Ενδεικτικά δεδομένα Campus	131
Εικόνα 121: Ενδεικτικά δεδομένα Shelf	131
Εικόνα 122: Υπολογισμός 3D σκελετού ταυτόχρονα πολλών χειριστών, χρησιμοποιώντας 3 κάμερες που καταγράφουν την ίδια σκηνή. Πέρα από την συνολική 3D πόζα, παρουσιάζονται και τα ενδιάμεσα βήματα υπολογισμού της πόζας στα επίπεδα xy, xz και yz, μαζί με τον αντίστοιχο 2D σκελετό σε κάθε μία εικόνα	132
Εικόνα 123: Εξέλιξη της μετρικής RULA στον χρόνο για έναν χειριστή	133
Εικόνα 124: Εξέλιξη της μετρικής RULA για όλους τους χειριστές, επιτρέποντας την ομαδοποίηση τους με βάση την μέση καταπόνηση	133
Εικόνα 125: Επίπεδα αρχιτεκτονικής λύσης	136
Εικόνα 126: Αρχιτεκτονική Νευρωνικού Δικτύου MocapNET	136
Εικόνα 127: Παραγωγή συνθετικών δεδομένων με το Stable Diffusion model	137
Εικόνα 128: Εφαρμογή αναπαραγωγής και κατακερματισμού βίντεο	138

Εικόνα 129: Μεγέθυνση συνόλου δεδομένων με εισαγωγή θορύβου και άλλων παραμέτρων.....	139
Εικόνα 130: Στιγμιότυπα της εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου που αναπτύσσουμε σε δημόσια διαθέσιμα video από εργοστάσια στο Youtube.....	140
Εικόνα 131: Γραφική διεπαφή εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου που λαμβάνει εικόνες RGB και εξάγει δισδιάστατη πόζα στον server.	140
Εικόνα 132: Γραφική διεπαφή εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου MocapNET στον server.....	141
Εικόνα 133: Απεικόνιση της ροής της προτεινόμενης λύσης.	143
Εικόνα 134: Παράδειγμα χρήσης και δυνατοτήτων της διεπαφής αξιοποίησης του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων,	146
Εικόνα 135: Παράδειγμα χρήσης και δυνατοτήτων της διεπαφής επισήμανσης δεδομένων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ενδιάμεση λύσης. Χρωματικές επισημάνσεις επιδεικνύουν τα σχετικά εργαλεία κάθε ενέργειας	147

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι παραγωγής συνθετικών εικόνων	36
Πίνακας 2: Παράμετροι εκπαίδευσης Συνελκτικού Νευρωνικού Δικτύου	37
Πίνακας 3: Παράμετροι κόστους για κάθε σενάριο ενεργειακής κατανάλωσης στην υπό ανάλυση προσομοίωση	71
Πίνακας 4: Διακύμανση μέσου κόστους ενεργειακής κατανάλωσης στην υπό ανάλυση προσομοίωση για διαφορετικές τιμές της ζήτησης και διαφορετικό μοντέλου ελέγχου παραγωγής (ασαφούς λογικής (distributed fuzzy control - DFC) και κλασικής προσέγγισης παραγωγής (produce at capacity - PC))	72
Πίνακας 5: Λίστα δεικτών Key Performance Indicators στο Circular SBSC	79
Πίνακας 6: Ανάλυση των KPI ανά διεργασία, καθορισμός μεταβλητών και συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών .	81
Πίνακας 7: Υπόμνημα αντικειμένων στο τρισδιάστατο περιβάλλον του σεναρίου συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα.....	104
Πίνακας 8: Παραδείγματα από μετάφρασης από το ελληνικό στο αγγλικό κείμενο και εφαρμογής των τριών αλγορίθμων ανάλυσης συναισθήματος	105
Πίνακας 9: Πλήθος εικόνων ανά κλάση του συνόλου εκπαίδευσης, αξιολόγησης και δοκιμής	110
Πίνακας 10: Υπερ-παράμετροι εκπαίδευσης του μοντέλου εντοπισμού και αναγνώρισης αντικειμένων	111
Πίνακας 11: Αρθρώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του RULA (Δ: Δεξιά, Α: Αριστερά)	130
Πίνακας 12: Απόδοση, πλήθος παραμέτρων, μέγεθος σετ δεδομένων εκπαίδευσης/αξιολόγησης και διαστασιότητα ακολουθιών εισόδου για τις 2 εκδόσεις του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα.	145

1 Εισαγωγή

Η παρούσα αναφορά παραθέτει την ενδιάμεση έκδοση των υπό ανάπτυξη λύσεων του έργου Greece4.0 στα πλαίσια της Ενότητας Εργασίας 2, σύμφωνα με την αρχιτεκτονική και τις απαιτήσεις χρήσεις που ορίστηκαν στα αντίστοιχα Παραδοτέα 1.1 και 1.2 της Ενότητας Εργασίας 1.

1.1 Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου

Ο σκοπός της συγκεκριμένης Ενότητας Εργασίας **EE2 “Υλοποίηση εφαρμογών βελτιστοποίησης των διαδικασιών παραγωγής με CPS”** είναι να επικεντρωθεί στις λεπτομέρειες υλοποίησης των λύσεων που αναπτύσσονται στο έργο μέσω συνεργατικών μίνι-έργων μεταξύ των εταιρών της κοινοπραξίας.

Κάθε εταίρος γνωρίζοντας τις τεχνολογικές λύσεις και εφαρμογές της Βιομηχανίας 4.0, καθώς και τις απαιτήσεις των βιομηχανικών χρηστών, συνεισφέρει στην παραγωγή και ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων, υπηρεσιών και εργαλείων μέσα από τη φάση υλοποίησης που πραγματοποιείται στα πλαίσια της Ενότητας Εργασίας 2. Οι βασικοί στόχοι που λαμβάνονται υπόψη και οφείλουν να καλύπτουν οι επιμέρους λύσεις αφορούν στην:

- Συνεργατική ανάπτυξη λύσεων: Κάθε λύση υλοποιείται από έναν ή περισσότερους εταίρους, σε τακτική συνεργασία και επικοινωνία με την υπόλοιπη κοινοπραξία στα πλαίσια προγραμματισμένων τεχνικών συναντήσεων, για την αξιολόγηση της ανάπτυξης και της λειτουργίας της σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι λύσεις ανταποκρίνονται στις ανάγκες των βιομηχανιών και είναι λειτουργικές.
- Ανάπτυξη πρωτοτύπων: Οι λύσεις περνούν από διάφορα στάδια ανάπτυξης, ξεκινώντας από τη δημιουργία ενός πρωτοτύπου, το οποίο υπόκειται σε αρχική αξιολόγηση. Οι λύσεις στη συνέχεια εξελίσσονται στην τελική τους μορφή.
- Αξιολόγηση τεχνολογιών Βιομηχανίας 4.0: Οι λύσεις που αναπτύσσονται αξιοποιούν τεχνολογίες αιχμής, όπως ψηφιακά δίδυμα, τεχνητή νοημοσύνη, αυτόνομα ρομποτικά συστήματα και το Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT). Κατά την ανάπτυξη κάθε λύσης, δοκιμάζονται και βελτιώνονται, λαμβάνοντας υπόψη τις βιομηχανικές απαιτήσεις.
- Συστηματική αξιολόγηση και προσαρμογή: Η κάθε λύση αξιολογείται συνεχώς μέσα από δοκιμές σε ρεαλιστικά σενάρια, τακτικές τεχνικές παρουσιάσεις εντός της κοινοπραξίας, παρέχοντας ανατροφοδότηση στους εταίρους, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες βελτιώσεις πριν την τελική της υλοποίηση.
- Συμβολή στην καινοτομία και ανταγωνιστικότητα: Ο κύριος στόχος είναι η ανάπτυξη λύσεων που θα συμβάλλουν στην καινοτομία και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της ελληνικής βιομηχανίας, με έμφαση στην παραγωγικότητα, την ευελιξία, και τη βιωσιμότητα.

Όλοι οι παραπάνω στόχοι, αποτελούν τη βάση για την υλοποίηση καινοτόμων λύσεων σε διάφορους τομείς, όπως η διαχείριση αποθηκών, η προσθετική κατασκευή, η ασφάλεια δεδομένων και η αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ, πάντα σε συνεργασία με ερευνητικούς και βιομηχανικούς φορείς.

1.2 Υλοποίηση Ενδιάμεσης Έκδοσης

Η ενδιάμεση έκδοση των παραπάνω λύσεων στο πλαίσιο της Ενότητας Εργασίας 2 περιλαμβάνει τα εξής βασικά στοιχεία:

- Πρωτότυπα και λειτουργικά μοντέλα: Κάθε λύση βρίσκεται στη φάση του πρωτοτύπου ή ενός λειτουργικού μοντέλου που έχει ήδη αναπτυχθεί και δοκιμάζεται. Οι λύσεις αυτές δεν είναι πλήρως ολοκληρωμένες, αλλά έχουν βασικές λειτουργίες που επιτρέπουν την αρχική τους αξιολόγηση.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

- Διεπαφή χρηστών: Οι ενδιάμεσες εκδόσεις περιλαμβάνουν διεπαφές για την επικοινωνία του χρήστη δίνοντας έμφαση τόσο στην απόδοση και την διασύνδεση της εκάστοτε εφαρμογής όσο και την φιλική εμπειρία χρήσης.
- Αρχικές δοκιμές - ενδιάμεσα αποτελέσματα: Οι ενδιάμεσες εκδόσεις έχουν δοκιμαστεί σε ρεαλιστικά σενάρια ή σε περιβάλλοντα που προσομοιώνουν πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες. Αυτές οι δοκιμές στοχεύουν στον έλεγχο της απόδοσης, της λειτουργικότητας και της ανθεκτικότητας των λύσεων, παρέχοντας σημαντικά δεδομένα για βελτιώσεις.
- Ανατροφοδότηση και αξιολόγηση: Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές στις ενδιάμεσες εκδόσεις παρέχουν ανατροφοδότηση στους εταίρους για τυχόν τεχνικά προβλήματα ή προκλήσεις που έχουν προκύψει. Αυτή η ανατροφοδότηση είναι κρίσιμη για τη βελτίωση των λύσεων πριν την ολοκλήρωσή τους.
- Βελτιώσεις και προσαρμογές: Με βάση τα ευρήματα από τις δοκιμές, γίνονται βελτιώσεις στις λύσεις. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τεχνικές διορθώσεις, προσθήκη νέων λειτουργιών ή προσαρμογές για την καλύτερη ικανοποίηση των βιομηχανικών αναγκών.
- Συνεχιζόμενη συνεργασία: Οι ενδιάμεσες εκδόσεις αναπτύσσονται σε συνεχή συνεργασία μεταξύ των εταίρων του έργου με τακτικές τεχνικές συναντήσεις. Οι συνεργάτες αξιολογούν από κοινού την πρόοδο και προσαρμόζουν τις λύσεις βάσει των αναγκών και των απαιτήσεων της αγοράς.

Κατά τη διάρκεια αυτής της ενδιάμεσης φάσης, η εξέλιξη των επιμέρους λύσεων οργανώθηκε και παρουσιάστηκε σε δύο κύκλους τρίμηνης διάρκειας. Σε κάθε κύκλο, πραγματοποιήθηκαν παρουσιάσεις εντός της κοινοπραξίας όπου αποτυπώθηκε η πορεία υλοποίησης ανά ομάδα λύσεων, αξιολογήθηκε ο βαθμός επίτευξης των στόχων που είχαν τεθεί στον προηγούμενο κύκλο και αναλύθηκαν τα τεχνικά ή λειτουργικά αποτελέσματα που προέκυψαν. Παράλληλα, συζητήθηκαν οι πιθανές τροποποιήσεις που απαιτούνταν καθώς και οι στόχοι του επόμενου κύκλου, ώστε να διασφαλιστεί η σταθερή πρόοδος και η ευθυγράμμιση με τις ανάγκες των τελικών χρηστών.

Συνολικά, η ενδιάμεση έκδοση λειτουργεί ως σημαντικό στάδιο δοκιμών και αναπροσαρμογών, παρέχοντας μια βάση για τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη και ολοκλήρωση των τεχνολογικών λύσεων του έργου Greece 4.0.

2 Ενδιάμεσες Εκδόσεις των Εφαρμογών του έργου Greece4.0

2.1 Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής

2.1.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

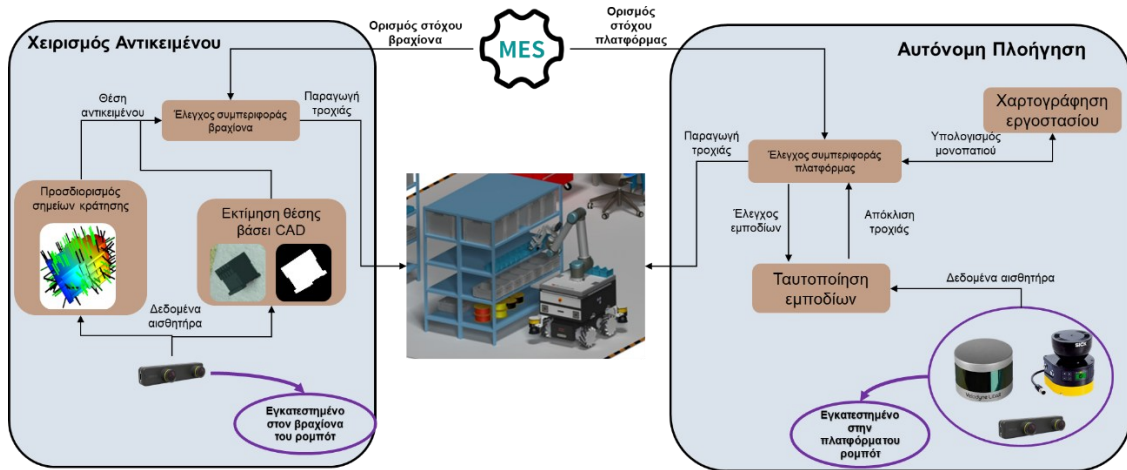
Για τον επιτυχή προγραμματισμό των ρομπότ απαραίτητη είναι η ανάπτυξη συστημάτων ανίχνευσης με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Η ανάπτυξη της λύσης ξεκίνησε αρχικά με το σύστημα επιλογής σημείων προσάρτησης. Έπειτα, ένα δεύτερο σημείο ανίχνευσης αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού των εξαρτημάτων. Συνδυάζοντας αυτά τα σημεία ανίχνευσης, επιτυγχάνεται ο προγραμματισμός του ρομποτικού βραχίονα για την ανάκτηση και το χειρισμό εξαρτημάτων. Παράλληλα, προηγμένα συστήματα αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του ρομποτικού βραχίονα και του αυτοκινούμενου ρομπότ, με τη χρήση των εργαλείων ROS2, MoveIt2. Τα στάδια ανάπτυξης είναι τα εξής:

- Επιλογή σημείων προσάρτησης με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και χρήση CAD αρχείων
- Βαθιά μάθηση για την εκτίμηση θέσης των εξαρτημάτων
- Έλεγχος συμπεριφοράς ρομποτικού βραχίονα βασισμένος σε ROS2 και MoveIt2
- Έλεγχος συμπεριφοράς βάσης ρομπότ βασισμένος σε ROS2 και Navigation2
- Επικοινωνία με σύστημα οργάνωσης
- Συνεχής έλεγχος και προσαρμογή των εφαρμοσμένων τεχνολογιών

2.1.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η προκειμένη λύση στοχεύει στον προγραμματισμό ενός ρομποτικού συστήματος, ικανού να πλοηγείται εντός ορισμένων εγκαταστάσεων παραγωγής και να εντοπίζει, ανακτά και χειρίζεται εξαρτήματα παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, το ρομποτικό σύστημα αποτελείται από ένα αυτοκινούμενο ρομπότ και ένα ρομποτικό βραχίονα. Το αυτοκινούμενο ρομπότ έχει ενσωματωμένους αισθητήρες όπως αισθητήρες laser ή κάμερες βάθους για την επιτυχημένη πλοήγηση και τη διατήρηση του σωστού προσανατολισμού του ρομπότ, σύμφωνα με τη χαρτογράφηση των εγκαταστάσεων. Το αυτοκινούμενο ρομπότ είναι επίσης ικανό να αναγνωρίζει και να αποφεύγει εμπόδια εντός της τροχιάς του δυναμικά, χωρίς την ανάγκη τερματισμού της κίνησης. Το δεύτερο μέρος της λύσης υλοποιείται από ένα ρομποτικό βραχίονα ικανό να συνεργάζεται με το χειριστή της λύσης (συνεργατικό ρομπότ), εξοπλισμένο με μία ευέλικτη ρομποτική αρπάγη και μία κάμερα βάθους. Χρησιμοποιώντας την εικόνα της κάμερας, τα συστήματα ανίχνευσης επιτυγχάνουν τον εντοπισμό της θέσης των εξαρτημάτων και των σημείων προσάρτησης. Η πληροφορία που παράγεται από τα συστήματα ανίχνευσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα και την επιτυχή ανάκτηση των εξαρτημάτων. Το σύστημα οργάνωσης, ενορχηστρώνει τη διαδικασία, στέλνοντας τα απαραίτητα μηνύματα σε όλα τα επιμέρους συστήματα της λύσης.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική ρομποτικού συστήματος για αυτόνημη πλοήγηση και χειρισμό αντικειμένων

2.1.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.1.3.1 Επιλογή Σημείων Προσάρτησης με Χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης και CAD αρχείων

Η διαδικασία επιλογής σημείων προσάρτησης υλοποιήθηκε μέσω της ανάπτυξης ενός μοντέλου τεχνητής νοημοσύνης, ικανού να εντοπίζει τα βέλτιστα σημεία για την αρπαγή των εξαρτημάτων παραγωγής από τον ρομποτικό βραχίονα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου και έχει σχεδιαστεί για ρομποτικούς βραχίονες έξι βαθμών ελευθερίας, οι οποίοι χρησιμοποιούν ρομποτικές αρπάγες κενού. Το αποτέλεσμα της ανίχνευσης είναι μια λίστα σημείων πάνω στις επιφάνειες των εξαρτημάτων, όπου οι πνευματικές βεντούζες της ρομποτικής αρπάγης μπορούν να εφαρμόσουν βέλτιστα, εξασφαλίζοντας την επιτυχημένη ανάκτηση του αντικειμένου.

Ένα βασικό στάδιο στην ανάπτυξη του μοντέλου ήταν η εκπαίδευσή του. Τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτήματα για την εκπαίδευση του μοντέλου ήταν ηλεκτρολογικά εξαρτήματα και ασφάλειες ηλεκτρολογικών πινάκων. Λόγω του υψηλού βαθμού περιπλοκότητας του μοντέλου, επιλέχθηκε η εκπαίδευση με συνθετικά δεδομένα. Αρχικά, συγκεντρώθηκαν τα αρχεία CAD (Computer-Aided Design) των εξαρτημάτων. Στη συνέχεια, για την εξασφάλιση της ομοιομορφίας αυτών των ψηφιακών απεικονίσεων, εφαρμόστηκε μια διαδικασία ομοιόμορφης επαναδειγματοληψίας. Μέσω αυτής της διαδικασίας, τα αρχεία CAD αποτελούνταν από ένα πυκνό και ομοιόμορφο σύνολο διανυσμάτων, γεγονός που τα καθιστούσε κατάλληλα για τη δημιουργία ενός μεγάλου συνόλου συνθετικών δεδομένων.

Το επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή μιας εικονικής σκηνής για τη συλλογή των συνθετικών δεδομένων. Για την κατασκευή αυτής της σκηνής χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Blender, το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για τη δημιουργία και την επεξεργασία τρισδιάστατων ψηφιακών αντικειμένων. Με τη χρήση του Blender, δημιουργήθηκε μια εικονική σκηνή που περιλάμβανε το κουτί αποθήκευσης των εξαρτημάτων και μια εικονική κάμερα, τοποθετημένη στην ίδια απόσταση από το κουτί με την πραγματική κάμερα που θα χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των σημείων προσάρτησης και την ανάκτηση των εξαρτημάτων από το ρομπότ.

Με τη βοήθεια του πακέτου BlenderProc, δημιουργήθηκαν πολλαπλά σενάρια με τα εξαρτήματα τοποθετημένα σε τυχαίες θέσεις εντός του κουτιού αποθήκευσης. Για κάθε εξάρτημα, το BlenderProc παράγαγε τόσο την εικόνα του αντικειμένου σε μορφή RGB, όσο και την εικόνα βάθους (Depth Map) σε σχέση με τη θέση της εικονικής κάμερας.

Παράλληλα με την εξασφάλιση της εικονικής πληροφορίας σε μορφή RGB και βάθους, έπρεπε να παραχθεί και η πληροφορία των βέλτιστων σημείων για κάθε εξάρτημα του εικονικού σεναρίου. Αρχικά, η πνευματική βεντούζα της ρομποτικής αρπάγης μοντελοποιήθηκε ως ένας κυκλικός δίσκος, ίδιων διαστάσεων με την επιφάνεια επαφής μεταξύ αυτής και του εξαρτήματος. Αξιοποιώντας αυτή τη μοντελοποίηση, αναπτύχθηκε

ένας αλγόριθμος για τον εντοπισμό όλων των σημείων πάνω σε κάθε εξάρτημα, όπου μπορεί να τοποθετηθεί ο κυκλικός δίσκος χωρίς να υπάρχει ανομοιομορφία στην επιφάνειά του.

Για παράδειγμα, επιφάνειες που περιέχουν κενά, όπως τρύπες ή ιδιαίτερα τραχιά σημεία, αποκλείστηκαν από τα πιθανά βέλτιστα σημεία. Επιπλέον, στη μοντελοποίηση αυτή προστέθηκε ένας κύλινδρος με την ίδια ακτίνα με την επιφάνεια της πνευματικής βεντούζας. Ο κύλινδρος αυτός χρησιμοποιήθηκε για την αποφυγή αλληλεπικαλύψεων μεταξύ της ρομποτικής αρπάγης και των εξαρτημάτων εντός του κουτιού αποθήκευσης. Έτσι, η μοντελοποίηση επιτρέπει τον εντοπισμό των πιθανών βέλτιστων σημείων για κάθε εξάρτημα, αποφεύγοντας τα κενά στις επιφάνειες καθώς και την επικάλυψη με άλλα εξαρτήματα.

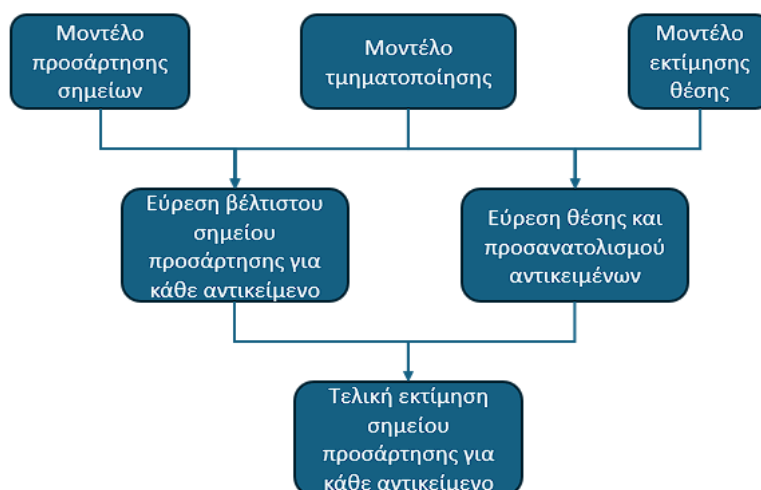
Ως αποτέλεσμα, οι ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες του BlenderProc, δημιούργησαν εικόνες χρωμάτων, βάθους και πιθανών βέλτιστων σημείων για κάθε σενάριο της εικονικής σκηνής. Παράλληλα, το BlenderProc κατέγραψε τη θέση και τον προσανατολισμό κάθε εξαρτήματος. Όλα αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονταν σε ένα αρχείο JSON (JavaScript Object Notation), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την τελική εκπαίδευση του μοντέλου.

Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε με τη χρήση αλγορίθμων βαθιάς μάθησης. Συνολικά, δημιουργήθηκαν 161 εικονικές σκηνές, καθεμία από τις οποίες περιείχε 4 έως 10 εξαρτήματα τοποθετημένα σε τυχαίες θέσεις. Το αποτέλεσμα της εκπαίδευσης είναι ένα μοντέλο ικανό να παράγει έναν θερμικό χάρτη (heatmap), ο οποίος περιλαμβάνει όλα τα βέλτιστα σημεία για κάθε εξάρτημα.

Για την αποφυγή αλληλεπικαλύψεων μεταξύ των εντοπισμένων σημείων, και δεδομένου ότι η πνευματική βεντούζα έχει συγκεκριμένη ακτίνα, ενσωματώθηκε ένας αλγόριθμος υποδειγματοληψίας Voxel (Voxel downsampling). Ο αλγόριθμος αυτός επιλέγει μόνο ένα σημείο για κάθε επιφάνεια της βεντούζας, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη επιλογή σημείων. Τα τελικά παραγόμενα σημεία αποτελούν τα βέλτιστα σημεία για την προσάρτηση των εξαρτημάτων από τον ρομποτικό βραχίονα.

2.1.3.2 Βαθιά Μάθηση για την Εκτίμηση Θέσης των Εξαρτημάτων

Το μοντέλο εκτίμησης των βέλτιστων σημείων προσάρτησης που αναπτύχθηκε είναι ικανό να εντοπίζει τη θέση των σημείων για κάθε εξάρτημα της παραγωγής. Ωστόσο, για τον επιτυχημένο έλεγχο των εξαρτημάτων, είναι απαραίτητος και ο εντοπισμός του προσανατολισμού τους. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα δεύτερο μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης, ικανό να προσδιορίζει την ακριβή θέση του εξαρτήματος ως προς την κάμερα.



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική συστημάτων όρασης

Το μοντέλο εκτίμησης θέσης επιλέχθηκε να εκπαιδευτεί με το εργαλείο MegaPose6D. Πρόκειται για ένα προεκπαιδευμένο μοντέλο σε μια πληθώρα συνθετικών σκηνών που περιλαμβάνουν εκατομμύρια αντικείμενα της καθημερινότητας. Το MegaPose6D επιτρέπει τον εντοπισμό αντικειμένων χωρίς την ανάγκη εκπαίδευσης

του μοντέλου με δεδομένα που σχετίζονται με το εκάστοτε αντικείμενο. Το πρώτο στάδιο για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου είναι η παραγωγή των κατάλληλων δεδομένων εισόδου. Για τον εντοπισμό ενός εξαρτήματος, το MegaPose6D απαιτεί το αντίστοιχο αρχείο CAD και μία εικόνα του εξαρτήματος με ορισμένη την περιοχή στην οποία βρίσκεται, γνωστή και ως μάσκα τμηματοποίησης (segmentation mask).

Για τον δυναμικό εντοπισμό των εξαρτημάτων, κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη ενός εργαλείου ικανό να εντοπίζει τη μάσκα τμηματοποίησης των εξαρτημάτων και να τροφοδοτεί με αυτή το μοντέλο εκτίμησης θέσης. Για την εξαγωγή αυτής της πληροφορίας, χρησιμοποιήθηκε το προεκπαιδευμένο μοντέλο YOLOv11. Η 11η έκδοση αυτού του μοντέλου προσφέρει τη δυνατότητα στιγμιαίας τμηματοποίησης (instance segmentation).

Για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων στην αναγνώριση ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων, το μοντέλο επανεκπαιδεύτηκε σε 1.500 εικόνες, στις οποίες περιλαμβάνονταν ένα κουτί αποθήκευσης με 4 έως 20 εξαρτήματα τοποθετημένα σε τυχαίες θέσεις. Για κάθε εικόνα, ορίστηκαν χειροκίνητα όλες οι περιοχές που περιείχαν εξαρτήματα, δημιουργώντας έτσι τις αντίστοιχες μάσκες τμηματοποίησης. Το σύνολο δεδομένων περιλάμβανε τόσο εξαρτήματα με ευδιάκριτες επιφάνειες όσο και εξαρτήματα που αλληλεπικαλύπτονταν. Με την εκπαίδευση του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα, κατέστη πλέον ικανό να παράγει δυναμικά τις μάσκες τμηματοποίησης.

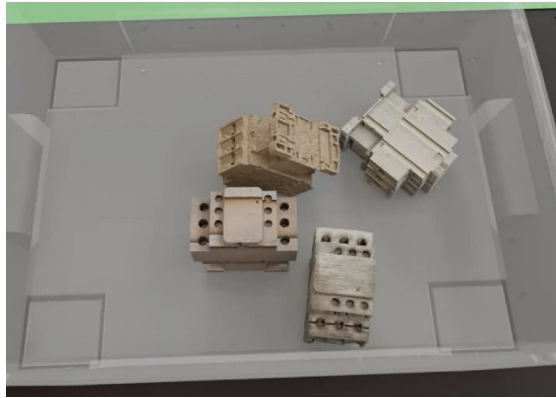


Εικόνα 3: Επισημασμένη εικόνα για την εκπαίδευση μοντέλου τμηματοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο MegaPose6D απαιτεί το CAD αρχείο του εκάστοτε εξαρτήματος. Για την επίτευξη της βέλτιστης ακρίβειας, τα CAD αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων περιείχαν τόσο τη γεωμετρία των εξαρτημάτων όσο και την αντίστοιχη υφή (texture) και το χρώμα τους. Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν μέσω τρισδιάστατης σάρωσης (3D scanning).

Με τη χρήση κάμερας υψηλής ανάλυσης, όλες οι επιφάνειες των πραγματικών εξαρτημάτων σαρώθηκαν, δημιουργώντας ένα νέφος σημείων (point cloud) και έναν χάρτη χρωμάτων (color map). Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν με το εργαλείο Blender για τη διόρθωση τυχόν αστοχιών ή ανομοιομορφιών. Έτσι, τα απαραίτητα αρχεία συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την ακριβή ανίχνευση της θέσης των εξαρτημάτων.

Παρόλο που το μοντέλο MegaPose6D είναι ικανό να εντοπίζει τις θέσεις εξαρτημάτων χωρίς να έχει εκπαιδευτεί ειδικά σε αυτά, για τη βελτίωση της ακρίβειας του, επανεκπαιδεύτηκε με τα συγκεκριμένα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα. Με τη βοήθεια του BlenderProc, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα με βάση τα CAD αρχεία. Συνολικά, 25.000 ψηφιακά αντικείμενα χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου. Για κάθε ένα από αυτά τα εξαρτήματα, η ακριβής θέση και ο προσανατολισμός τους αποθηκεύονταν σε ένα αρχείο JSON. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, το μοντέλο MegaPose6D επανεκπαιδεύτηκε, επιδεικνύοντας σαφή βελτίωση στην ακρίβεια εκτίμησης της θέσης των εξαρτημάτων.



Εικόνα 4: Ψηφιακή σκηνή που περιέχει συνθετικά δεδομένα στο BlenderProc

2.1.3.3 Έλεγχος συμπεριφοράς ρομποτικού βραχίονα βασισμένος σε ROS2 και MoveIt2

Για τον επιτυχή έλεγχο και χειρισμό των εξαρτημάτων από τον ρομποτικό βραχίονα, αναπτύχθηκε ένα ρομποτικό σύστημα βασισμένο στο πλαίσιο ROS2. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει μια πληθώρα εργαλείων και βιβλιοθηκών για τον προγραμματισμό ρομποτικών βραχιόνων και την επικοινωνία μεταξύ λογισμικού και συσκευών.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του ρομποτικού συστήματος:

- Ενσωμάτωση του οδηγού του ρομπότ (robot driver). Το πρόγραμμα αυτό επιτρέπει την επικοινωνία με το υλικό του ρομποτικού βραχίονα, καθιστώντας δυνατό τον έλεγχο των επιμέρους εξαρτημάτων μέσω ηλεκτρικών σημάτων.
- Ανάπτυξη των απαραίτητων διεπαφών επικοινωνίας του ROS2 (ROS2 interfaces) για την υλοποίηση συγκεκριμένων ενεργειών, όπως η κίνηση των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα και ο έλεγχος της ρομποτικής αρπάγης μέσω των σημάτων εισόδου και εξόδου (I/Os).
- Κατασκευή του ψηφιακού μοντέλου του ρομπότ σε μορφή αρχείου URDF (Universal Robotic Description Format). Στο μοντέλο αυτό ενσωματώθηκε και η εξατομικευμένη ρομποτική αρπάγη.
- Ανάπτυξη των απαραίτητων πακέτων ROS2 και ενσωμάτωση υπαρχόντων πακέτων για την επικοινωνία με άλλες συσκευές, όπως η στερεοσκοπική κάμερα που είναι τοποθετημένη πάνω στον ρομποτικό βραχίονα.

Με τη χρήση αυτού του ρομποτικού συστήματος κατέστη δυνατός ο προγραμματισμός του ρομποτικού βραχίονα για τον έλεγχο και τον χειρισμό των εξαρτημάτων. Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό προγραμματισμό ρομποτικών βραχιόνων, ο οποίος βασίζεται σε προκαθορισμένες θέσεις, η προτεινόμενη λύση στοχεύει στην αύξηση της ευελιξίας του συστήματος.

Όπως προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις εντός ενός κουτιού αποθήκευσης. Ως εκ τούτου, για την επιτυχή προσάρτηση του ρομποτικού βραχίονα στα εξαρτήματα αυτά, είναι απαραίτητη η επικοινωνία του ρομποτικού συστήματος με τα εργαλεία ανίχνευσης που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες υποενότητες.

Οι διεπαφές ROS2 που αναπτύχθηκαν επιτρέπουν την κίνηση ενός ρομπότ προς μια προκαθορισμένη τελική πόζα. Ο όρος πόζα περιλαμβάνει τη θέση και τον προσανατολισμό ενός σημείου στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Επομένως, είναι απαραίτητος ο ορισμός των τριών τιμών θέσης (x , y , z) και των τριών τιμών προσανατολισμού (rx , ry , rz).

Οι τιμές αυτές παράγονται από τα συστήματα ανίχνευσης ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

- Το μοντέλο εκτίμησης των σημείων προσάρτησης εντοπίζει τα βέλτιστα σημεία για την προσάρτηση της πνευματικής βεντούζας στην επιφάνεια κάθε εξαρτήματος.

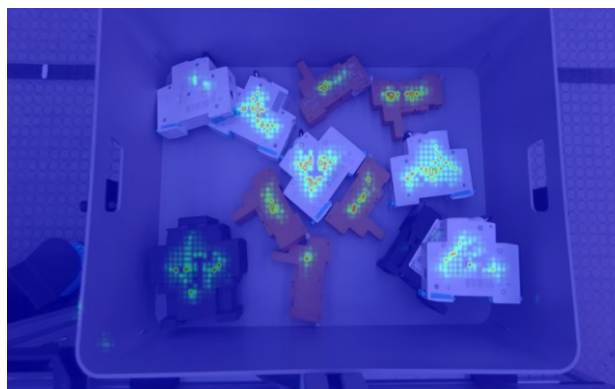
- Το μοντέλο στιγμιαίας τμηματοποίησης ανιχνεύει τις μάσκες τμηματοποίησης και τους αντίστοιχους τύπους εξαρτημάτων.
- Εντοπίζεται το σημείο προσάρτησης με το υψηλότερο επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level) εντός κάθε μάσκας τμηματοποίησης.
- Το σύστημα οργάνωσης επιλέγει ένα από τα εξαρτήματα σύμφωνα με μια σειρά από κριτήρια, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στην επόμενη υποενότητα.
- Το σημείο προσάρτησης του επιλεγμένου εξαρτήματος παρέχει τις τιμές της θέσης για την κίνηση του ρομπότ, καθώς και τις δύο από τις τρεις τιμές του προσανατολισμού (roll και pitch). Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα προσδιορίζει πού πρέπει να μετακινηθεί το ρομπότ για να πιάσει το αντικείμενο και πώς πρέπει να στραφεί ώστε να ευθυγραμμιστεί με την επιφάνεια του εξαρτήματος στο σημείο προσάρτησης.
- Η τρίτη τιμή του προσανατολισμού (yaw) προκύπτει από το μοντέλο εκτίμησης θέσης. Το μοντέλο αυτό παρέχει τον ακριβή προσανατολισμό του εξαρτήματος, καθορίζοντας τη στροφή που πρέπει να εκτελέσει ο ρομποτικός βραχίονας ώστε να πιάσει και να χειριστεί το κομμάτι σωστά.
- Οι τελικές τιμές (θέσης και προσανατολισμού) αποστέλλονται μέσω του πλαισίου ROS2 στον οδηγό του ρομπότ για την εκτέλεση της κίνησης.

Με αυτή τη διαδικασία, ο ρομποτικός βραχίονας αναγνωρίζει και πιάνει τα εξαρτήματα που βρίσκονται εντός του κουτιού αποθήκευσης και τα χειρίζεται κατάλληλα για τη συναρμολόγηση.

2.1.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

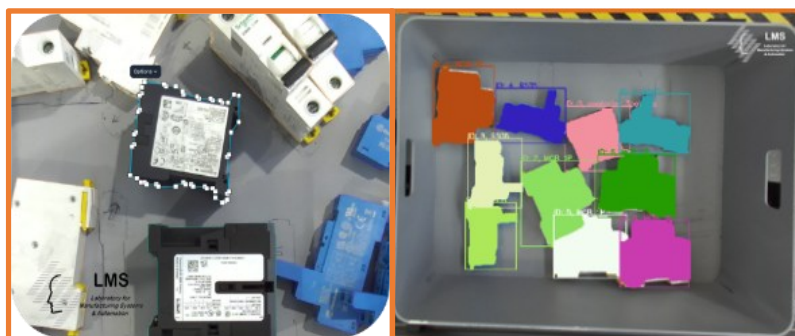
Η λύση που παρουσιάζεται στις προηγούμενες υποενότητες εφαρμόστηκε και ελέγχθηκε σε ένα σενάριο συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα. Η διαδικασία της εκτέλεσης περιγράφεται στην υποενότητα του συστήματος οργάνωσης. Η συναρμολόγηση του ηλεκτρολογικού πίνακα κάνει χρήση όλων των τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν, επαληθεύοντας τα αποτελέσματά τους. Έως την ολοκλήρωση της πρώτης περιόδου του έργου, οι τεχνολογίες δοκιμάστηκαν σε εργαστηριακό επίπεδο, παρουσιάζοντας τα πρώτα ενδιάμεσα αποτελέσματα.

Αρχικά, τα μοντέλα ανίχνευσης δοκιμάστηκαν σε μία πληθώρα σεναρίων που περιλάμβαναν το κουτί αποθήκευσης με ηλεκτρολογικά εξαρτήματα διαφόρων τύπων τοποθετημένα σε τυχαίες θέσεις. Το μοντέλο εκτίμησης των σημείων προσάρτησης παρουσίασε ενθαρρυντικά αποτελέσματα, εντοπίζοντας αρκετά βέλτιστα σημεία σχεδόν σε όλες τις επιφάνειες των εξαρτημάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



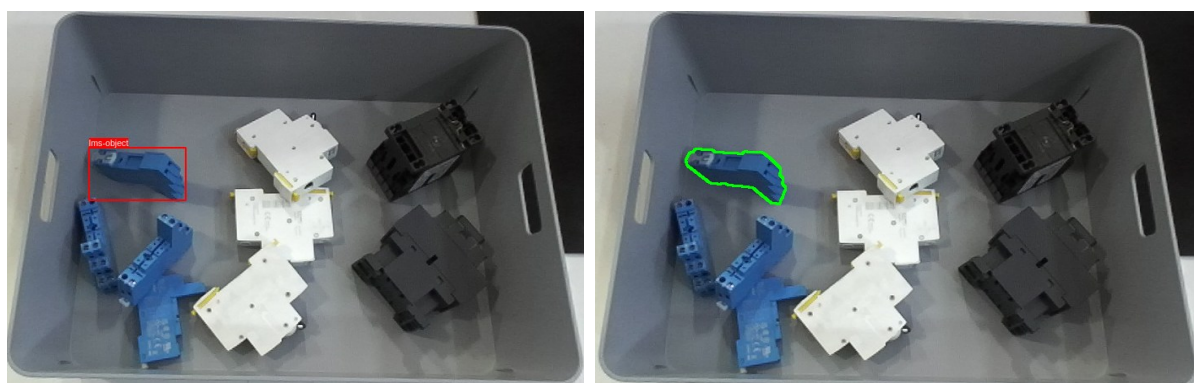
Εικόνα 5: Απόκριση μοντέλου σημείων προσάρτησης

Το μοντέλο στιγμιαίας τμηματοποίησης παρουσίασε επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε μία επανεκπαίδευση του μοντέλου, προσθέτοντας 1.000 εικόνες, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στα εξαρτήματα που εντόπιζε δυσκολότερα. Με τη δεύτερη εκπαίδευση του μοντέλου, η ακρίβεια βελτιώθηκε σημαντικά, αδυνατώντας να εντοπίσει εξαρτήματα μόνο όταν αυτά είναι καλυμμένα κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από άλλα αντικείμενα.



Εικόνα 6: Δείγμα εικόνας για εκπαίδευση μοντέλου τμηματοποίησης και απόκριση μοντέλου

Όσον αφορά το μοντέλο εκτίμησης θέσης, το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε χωρίς κάποια εκπαίδευση στα συγκεκριμένα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα, χρησιμοποιώντας το προεκπαιδευμένο μοντέλο MegaPose6D. Σε αυτό το πείραμα, το μοντέλο ήταν ικανό να εντοπίσει μόνο κάποια από τα εξαρτήματα, αλλά εμφάνισε ιδιαίτερη δυσκολία όταν το εξάρτημα ήταν εν μέρει καλυμμένο από κάποιο άλλο. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η εκπαίδευση του μοντέλου στα συνθετικά δεδομένα. Με την εκπαίδευση αυτή το μοντέλο παρουσίασε ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση, εντοπίζοντας τα εξαρτήματα όλων των τύπων χωρίς πρόβλημα. Παρ' όλα αυτά, από τα πειράματα αυτά έγινε φανερό πως το μοντέλο απαιτεί αρκετό χρόνο (μερικά δευτερόλεπτα) για τον εντοπισμό των εξαρτημάτων, ειδικά όταν τοποθετούνται πολλά (περισσότερα από 10) εξαρτήματα εντός του κουτιού αποθήκευσης.



Εικόνα 7: Προβλέψεις μοντέλου σε πραγματικά αντικείμενα με την μέθοδο object detection - bounding box (αριστερά) και semantic segmentation (δεξιά)

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

2.2.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

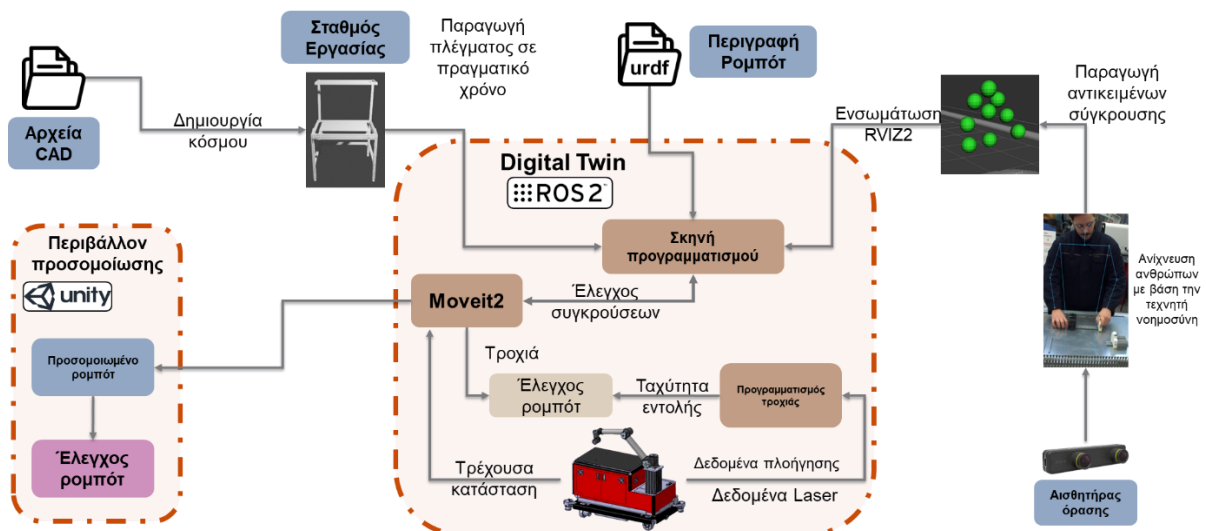
Κατά την χρήση μίας ρομποτικής πλατφόρμας είναι καίρια η ασφάλεια των χειριστών, επομένως αρχικά ξεκίνησε η ανάπτυξη ενός συστήματος εντοπισμού ανθρώπων και αποφυγής σύγκρουσης με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Στην συνέχεια για την λειτουργία του ψηφιακού διδύμου έπρεπε να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό περιβάλλον βασισμένο σε μία πραγματική εργοστασιακή μονάδα με την χρήση εργαλείων προσομοίωσης. Παράλληλα, το περιβάλλον πρέπει να ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο με πληροφορίες που πηγάζουν από την πραγματική μονάδα. Τα στάδια ανάπτυξης είναι τα εξής:

- Εντοπισμός ανθρώπου και αποφυγή σύγκρουσης χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη και αισθητήρες όρασης
- Δημιουργία ψηφιακού περιβάλλοντος και προσομοίωση μέσω αρχείων CAD και αισθητήρων όρασης

- Ανάπτυξη πλατφόρμας απεικόνισης και χειρισμού
- Ενημέρωση περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο με δυναμικά εμπόδια
- Επικοινωνία με σύστημα οργάνωσης
- Συνεχής έλεγχος και προσαρμογή των εφαρμοσμένων τεχνολογιών

2.2.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η προκειμένη λύση στοχεύει στην απεικόνισή και προσομοίωση ενός ρομποτικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο όπως και στην δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου μέσω του ψηφιακού περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, το ψηφιακό δίδυμο αποτελείται από τον ψηφιακό κόσμο κατασκευασμένο ώστε να μιμείται την πραγματική μονάδα με την χρήση αρχείων CAD για τον σταθμό εργασίας, εξαρτήματα και με τη χρήση URDF για την ένταξη του ρομπότ. Παράλληλα, η χρήση αισθητήρα στέρεο κάμερας επιτρέπει την παρακολούθηση των ανθρώπων που βρίσκονται σε εγγύτητα στο ρομποτικό κελί με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Η πληροφορία για την τοποθεσία των ανθρώπων προβάλλεται στο ψηφιακό δίδυμο και έπειτα εισέρχεται στην σκηνή προγραμματισμού για την αποφυγή. Ακόμη, υπάρχει και το εργαλείο προσομοίωσης το οποίο αναπαράγει την ρομποτική πλατφόρμα και προσφέρει έλεγχο και δοκιμές όλων των στοιχείων χωρίς την ανάγκη φυσικής παρουσίας του εξοπλισμού. Επιπλέον η πλατφόρμα του ψηφιακού διδύμου έχει στοιχεία για την επιτήρηση και έλεγχο όλων των επιμέρους στοιχείων. Τέλος, όλες οι διεπαφές είναι συνδεδεμένες με το ενοποιημένο σύστημα ενορχήστρωσης για άμεσο έλεγχο όλων των συστημάτων και απλούστευση της διαδικασίας.



Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου και εργαλείου προσομοίωσης

2.2.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

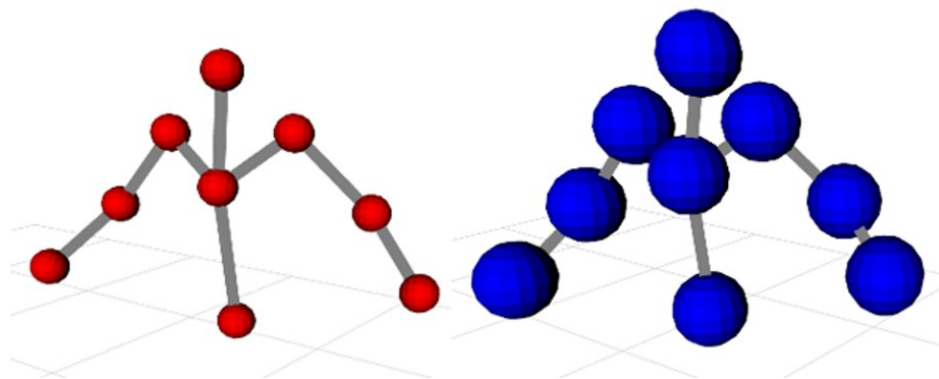
Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης των λειτουργιών διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν δύο βασικές ομάδες υλοποιήσεων. Η πρώτη ομάδα αφορά λειτουργίες που επιτρέπουν την αναπαράσταση του ρομποτικού κελιού στο ψηφιακό δίδυμο, ενώ η δεύτερη ομάδα επικεντρώνεται στη δημιουργία εργαλείων για την προσομοίωση των λειτουργιών. Για τη δημιουργία ρεαλιστικών και ακριβών οπτικοποιήσεων, η εφαρμογή αυτή αναπτύχθηκε με το Unity3D. Το Unity είναι ένα ισχυρό λογισμικό που παρέχει ένα ευρύ φάσμα εργαλείων για την ανάπτυξη δια-πλατφορμικών εφαρμογών και προσομοιώσεων. Η ενσωμάτωση με το υπόλοιπο σύστημα, βασίζεται στο δίκτυο του ROS2. Εντός της εφαρμογής για την επικοινωνία με το δίκτυο χρησιμοποιήθηκε η γέφυρα ROS2 TCP. Σε αυτήν την υλοποίηση, η εφαρμογή λειτουργεί ως πελάτης της σύνδεσης TCP και συνδέεται με τον διακομιστή που εκτελείται στον χώρο εργασίας ROS2. Αυτή η σύνδεση TCP και τα απαραίτητα στοιχεία ROS2 που περιγράφονται στις επόμενες υποενότητες υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Unity Robotics Hub, που παρέχεται από την Unity Technologies.

2.2.3.1 Ψηφιακό δίδυμο για εντοπισμό και αποφυγή ανθρώπου

Η ακριβής και αξιόπιστη ανίχνευση της θέσης του ανθρώπου σε πραγματικό χρόνο είναι μία καίρια λειτουργία για να υπάρχει ασφαλή συνεργασία ανθρώπου ρομπότ. Ο κύριος στόχος της λειτουργίας είναι η συλλογή δεδομένων από αισθητήρες και η επεξεργασία τους με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης για την παραγωγή τρισδιάστατων σημείων κλειδιών που αντιπροσωπεύουν τις ανθρώπινες αρθρώσεις. Τέλος, αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται κατά την κίνηση του ρομπότ για την αποφυγή σύγκρουσης.

Η διαδικασία βασίζεται στα παρακάτω σημαντικά βήματα. Πρώτα, μία στερεοσκοπική κάμερα ενεργοποιείται για την συλλογή δεδομένων χρώματος και βάθους υψηλής ποιότητας. Ύστερα, το μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης (MegaPose6D – κεφάλαιο 2.1.3.2) εφαρμόζεται στα δεδομένα και εντοπίζει όλες τις ανθρώπινες σιλουέτες στη φωτογραφία αποκρίνοντας τις καρτεσιανές συντεταγμένες για κάθε ορατή άρθρωση ως προς το πλαίσιο του φακού της κάμερας. Στην συνέχεια, κάθε σημείο λαμβάνει δύο αναγνωριστικούς κωδικούς, έναν ως προς το είδος της άρθρωσης και έναν μοναδικό. Έχει διαπιστωθεί ότι το κεφάλι, το στήθος και τα χέρια είναι τα μέρη του σώματος που κινδυνεύουν περισσότερο να συγκρουστούν με τον ρομποτικό βραχίονα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Για τη μείωση του αριθμού των σημείων-κλειδιών που παράγονται, εφαρμόζεται μια διαδικασία φιλτραρίσματος που διατηρεί μόνο τα σημεία που βρίσκονται σε άμεσο κίνδυνο και υπάρχουν μέσα σε ένα συγκεκριμένο πεδίο που συνάδει με την εμβέλεια του βραχίονα. Αυτό βελτιώνει την αποδοτικότητα του συστήματος, μειώνοντας τον όγκο των δεδομένων και διασφαλίζοντας την ασφάλεια του ανθρώπου-χειριστή.

Το σύστημα παρακολούθησης στηρίζεται στην αρχιτεκτονική ROS2. Οι συνδρομητές λαμβάνουν δεδομένα από τις κάμερες, ενώ οι εκδότες μεταδίδουν τα φιλτραρισμένα σημεία-κλειδιά. Το μοντέλο TN μπορεί επίσης να εκτιμήσει σημεία που δεν είναι άμεσα ορατά, χρησιμοποιώντας έναν ενσωματωμένο σκελετικό μοντέλο του χρήστη. Επιπλέον, η χρήση πολλαπλών συγχρονισμένων καμερών εξαλείφει τις αποκρούψεις και παρέχει πιο σταθερή παρακολούθηση.

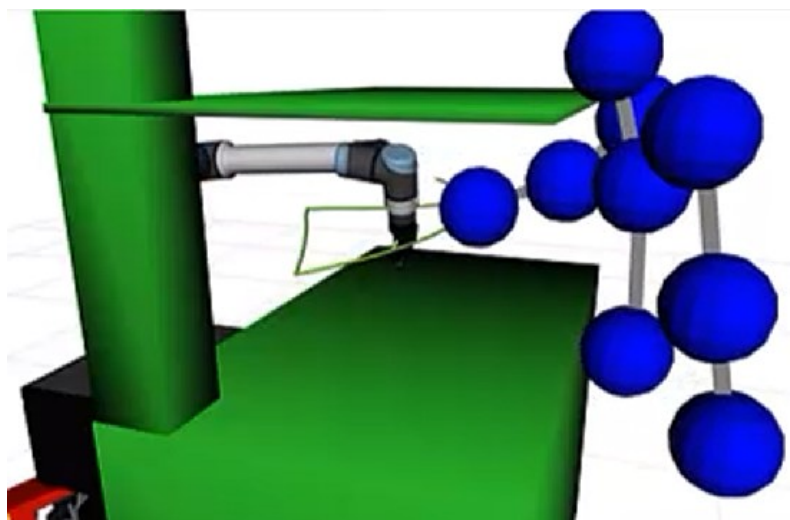


Εικόνα 9: Σημεία κλειδιά στο ανθρώπινο σκελετό και δημιουργία εμποδίων προς αποφυγή

Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της θέσης της κάμερας σε σχέση με το πλαίσιο της βάσης του ρομπότ. Αυτός ο μετασχηματισμός μεταξύ των δύο θέσεων υπολογίζεται με την χρήση βαθμονόμησης συστήματος χεριού-ματιού (hand eye calibration). Συγκεκριμένα ο τύπος της βαθμονόμησης είναι μάτι σε βάση (eye on base) καθώς η κάμερα βρίσκεται σε σταθερή θέση και απαιτεί την τοποθέτηση ενός δείκτη ArUco στο τελικό στοιχείο του βραχίονα. Τέλος με την αποθήκευση πολλαπλών θέσεων του δείκτη στο χώρο ώστε να είναι ορατός στην κάμερα ο αλγόριθμος βρίσκει τον αναγκαίο μετασχηματισμό.

Για τον έλεγχο του βραχίονα χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη χαμηλού επιπέδου MoveIt, η οποία προσφέρει εκτεταμένες λειτουργίες όπως η αποφυγή συγκρούσεων με στατικά προκαθορισμένα εμπόδια. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου τα σημεία εισέρχονται στην σκηνή προγραμματισμού του ρομπότ ως σφαίρες και κατατάσσονται ως δυναμικά. Όταν το ρομπότ λαμβάνει μια θέση στόχου, δημιουργείται ένα στιγμιότυπο της περιοχής σχεδιασμού που περιλαμβάνει όλα τα αντικείμενα σύγκρουσης. Αν οι σφαίρες του χειριστή τέμνονται με το ρομπότ κατά την αρχική φάση, η διαδικασία σχεδιασμού επαναλαμβάνεται. Αυτός ο σχεδιασμός εγγυάται την αποφυγή συγκρούσεων με στατικά αντικείμενα και τον χειριστή σε κάθε στιγμή.

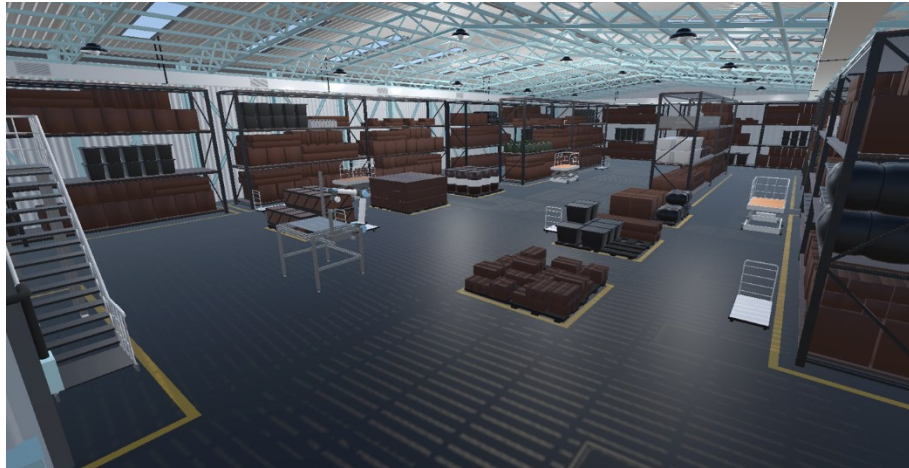
Ωστόσο για την συγκεκριμένη λύση χρειάστηκε η ανάπτυξη ενός διαμεσολαβητή με το MoveIt που διευρύνει τις δυνατότητες και για δυναμικά αντικείμενα. Αφού η τροχιά περάσει την πρώτη δοκιμή του συστήματος ο βραχίονας ξεκινάει να κινείται. Παράλληλα, το σύστημα παρακολούθησης συνεχίζει να ενημερώνει τα δυναμικά εμπόδια με βάση τις ανθρώπινες κινήσεις σε πραγματικό χρόνο. Ο διαμεσολαβητής συνεχώς ελέγχει την πιθανή σύγκρουση με την τωρινή θέση του ρομπότ όσο και με τις μελλοντικές πόζες που ακολουθούν την τροχιά μέσα σε μία συγκεκριμένη εμβέλεια. Εάν ανιχνευθεί πιθανή μελλοντική σύγκρουση, το σύστημα μειώνει σημαντικά την ταχύτητα του βραχίονα για ένα χρονικό διάστημα, επιτρέποντας την απομάκρυνση του εμποδίου. Εάν ο κίνδυνος επιμένει, ο βραχίονας διακόπτει τη λειτουργία του έως ότου η τροχιά του απελευθερωθεί.



Εικόνα 10: Αποφυγή ανθρώπου με την χρήση σημείων κλειδιών και δημιουργία δυναμικών εμποδίων

2.2.3.2 Ψηφιακό δίδυμο για αναπαράσταση σε πραγματικό χρόνο

Πρώτο βήμα για την δημιουργία μίας ρεαλιστικής αναπαράστασης στο ψηφιακό δίδυμο ήταν η κατασκευή ενός πραγματικού χώρου παραγωγής στο προσομοιωμένο περιβάλλον. Για την διαμόρφωση του χώρου, έπρεπε να εισαχθούν στην εφαρμογή διάφορα τρισδιάστατα μοντέλα όπως κουτιά, κοντέινερ, αλουμινένια προφίλ, ράφια κ.λπ. Όλα τα μοντέλα εμπλουτίστηκαν με τις κατάλληλες υφές και τοποθετήθηκαν στις αρμόζουσες θέσεις. Επιπλέον, ένα ακόμα στοιχείο που αναβάθμισε την ποιότητα της αναπαράστασης ήταν η χρήση συστήματος φωτισμού που δημιουργεί σκιές και φωτεινές περιοχές, αυξάνοντας την ακρίβεια. Πέρα από το στατικό περιβάλλον, αναγκαία είναι η εισαγωγή διάφορων αντικείμενων για την προσομοίωση ενός πραγματικού σταθμού εργασίας. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να αναπαραστήσουν την πραγματική ρομποτική μονάδα όπου θα εκτελεστεί η λειτουργία. Για να επιτευχθεί αυτή η αναπαράσταση, τα τρισδιάστατα μοντέλα δημιουργήθηκαν πρώτα από τα πραγματικά στοιχεία και στη συνέχεια εισήχθησαν στην εφαρμογή χρησιμοποιώντας το προεπιλεγμένο σύστημα εισαγωγής της Unity.



Εικόνα 11: Περιβάλλον προσομοίωσης σε Unity

Το βασικότερο στοιχείο της απεικόνισης είναι η ακριβής αναπαράσταση του ρομπότ που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της λειτουργίας. Η ανάπτυξη αυτής της λειτουργικότητας περιλάμβανε δύο βασικά βήματα. Το ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε είναι το RB Kairos+, εξοπλισμένο με έναν συνεργατικό βραχίονα UR10e και το πρώτο βήμα είναι η ένταξη του στην σκηνή. Για την εισαγωγή του ενοποιημένου αρχείου URDF, των αντίστοιχων mesh και εφαρμογή της κατάλληλης φυσικής στις αρθρώσεις χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη URDF Importer, που αναπτύχθηκε από την Unity Technologies. Το δεύτερο βήμα για την ακριβή και σε πραγματικό χρόνο αναπαράσταση της κατάστασης του ρομπότ ήταν η δημιουργία των απαραίτητων διεπαφών για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του ρομπότ και την δυναμική ενημέρωση του εικονικού μοντέλου. Δημιουργήθηκε ένας συνδρομητής ROS2 για τη λήψη των τιμών των καταστάσεων των έξι αρθρώσεων, οι οποίες εκφράζονται σε ακτίνια. Αυτές οι τιμές μετατράπηκαν στο σύστημα συντεταγμένων της Unity, καθώς το ROS2 και η πλατφόρμα Unity χρησιμοποιούν διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Μετά τη μετατροπή, οι τιμές μετατράπηκαν από ακτίνια σε μοίρες και αντιστοιχήθηκαν σε κάθε άρθρωση του εικονικού μοντέλου. Ο συνδρομητής επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία κάθε φορά που λαμβάνει νέες πληροφορίες, διασφαλίζοντας μια συνεχή αναπαράσταση του ρομπότ. Αυτή η ακολουθία επιτρέπει την αξιόπιστη αναπαράσταση του ρομπότ στο ψηφιακό δίδυμο.

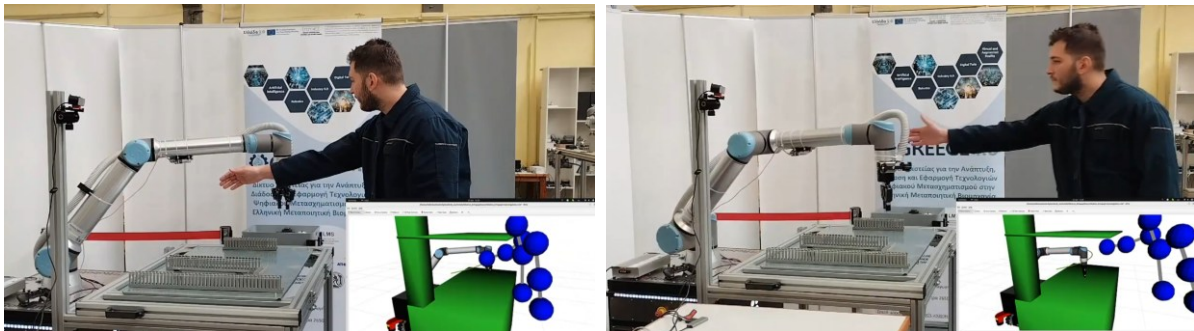
Μία ακόμη σημαντική λειτουργία της εφαρμογής είναι η εμφάνιση της επερχόμενης τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα. Με αυτό τον τρόπο δίνεται ένα ισχυρό πλεονέκτημα στον χρήστη, ο οποίος παρακολουθώντας τις τροχιές μπορεί να προβλέψει πιθανούς κινδύνους, όπως συγκρούσεις. Για αυτή την απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε ένα νέο μοντέλο με το εικονικό ρομπότ αλλά με διαφορετική υφή, ώστε να αποδίδει την όψη ενός ημιδιάφανου μπλε ολογράμματος. Παράλληλα, αναπτύχθηκε ένας ακόμη συνδρομητής ROS2 για να λαμβάνει τις πληροφορίες της αναμενόμενης τροχιάς κάθε φορά που το σύστημα δημιουργεί νέο πλάνο. Έπειτα, οι τιμές των καταστάσεων της τροχιάς αποδίδονται στο ολόγραμμα, δημιουργώντας μία σύντομη κίνηση. Με αυτή τη λειτουργία ο χρήστης μπορεί εύκολα να διακρίνει το πραγματικό ρομπότ από το εικονικό αντικείμενο που αναπαριστά τις μελλοντικές τροχιές.

Τέλος, αναπτύχθηκε η δυνατότητα για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων όρασης TN, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πραγματική λειτουργία. Η εφαρμογή επιτρέπει στον χρήστη να παρακολουθεί τα αποτελέσματα αυτών των συστημάτων μέσω μιας διεπαφής που απεικονίζει ζωντανά την εικόνα της κάμερας με επισημάνσεις, όπως πλαίσια ανίχνευσης ή σημεία βέλτιστης προσάρτησης. Κατασκευάστηκαν συνδρομητές ώστε να λαμβάνουν τις συμπιεσμένες εικόνες που δημοσιεύονται από τα συστήματα όρασης μέσω του πλαισίου ROS2. Οι εικόνες αυτές μετασχηματίζονται και εμφανίζονται στον αντίστοιχο καμβά στο περιβάλλον της εφαρμογής. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει την πλήρη απεικόνιση της απόκρισης των συστημάτων όρασης, εμβαθύνοντας τις πληροφορίες που λαμβάνει ο χρήστης.

2.2.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

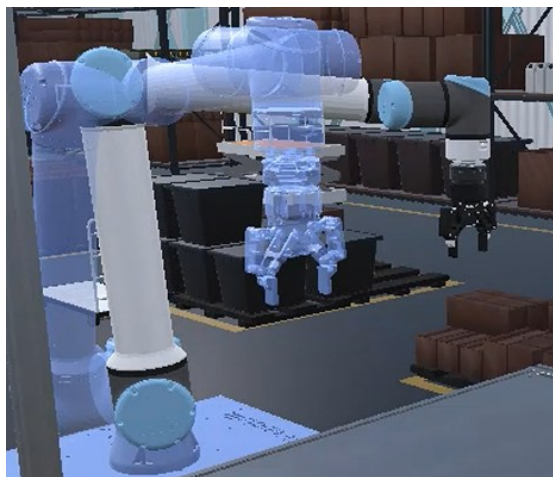
Η λύση που παρουσιάζεται στις προηγούμενες υποενότητες εφαρμόστηκε και ελέγχθηκε στο ίδιο σενάριο συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.1. Κατά την διαδικασία της συναρμολόγησης γίνεται χρήση όλων των τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν, επαληθεύοντας τα αποτελέσματά τους. Έως την ολοκλήρωση της πρώτης περιόδου του έργου, οι τεχνολογίες δοκιμάστηκαν σε εργαστηριακό επίπεδο, παρουσιάζοντας τα πρώτα ενδιάμεσα αποτελέσματα.

Αρχικά το σύστημα εντοπισμού του ανθρώπου δουλεύει συνεχώς στο παρασκήνιο καθ' όλη την διάρκεια της συναρμολόγησης. Τα σημεία κλειδιά που αντιστοιχούν στις αρθρώσεις περνούν μέσα από το φίλτρο και στην θέση των σημαντικότερων δημιουργούνται αντικείμενα σύγκρουσης. Στην συνέχεια το ρομπότ εκτελεί λειτουργίες παράλληλα με τον χρήστη πάνω από τον σταθμό εργασίας. Όταν ο χρήστης διακόψει την τροχιά του βραχίονα, τότε αυτός επιβραδύνει και σε περίπτωση που ύπαρξη του εμποδίου συνεχιστεί σταματάει. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο παρακάτω βίντεο μέσω αυτού του [συνδέσμου](#).



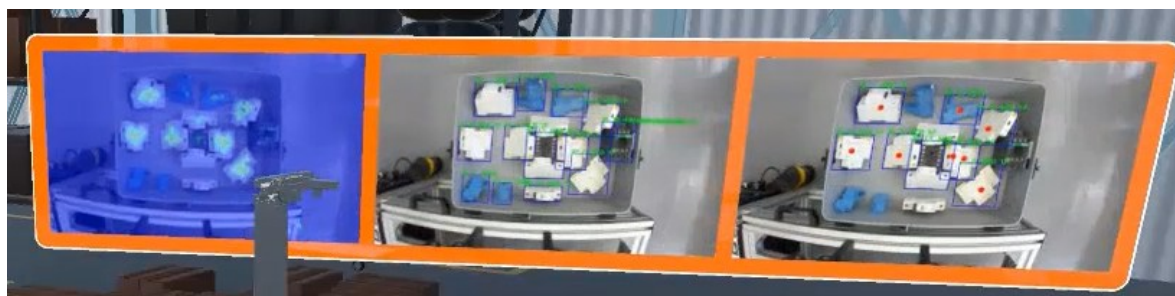
Εικόνα 12: Αποφυγή ανθρώπου

Παράλληλα η εφαρμογή Unity λειτουργεί στο παρασκήνιο εμφανίζοντας πολύτιμες πληροφορίες στους χρήστες. Όταν ο βραχίονας ακολουθεί ένα πλάνο τότε οι κινήσεις του αντικατοπτρίζονται στο ψηφιακό μοντέλο. Επιπλέον η αναμενόμενη τροχιά γίνεται ορατή μέσω του μπλε ολογράμματος.



Εικόνα 13: Ολόγραμμα τροχιάς ρομποτικού βραχίονα στο ψηφιακό δίδυμο

Επίσης η εφαρμογή δοκιμάστηκε σε συνδυασμό με την απόκριση των μοντέλων όρασης. Η διεπαφή εμφανίζεται και αποκαλύπτει την έξοδο όλων των μοντέλων και το τελικό συνδυαστικό βήμα σε τρία διακριτά πάνελ.



Εικόνα 14: Πάνελ παρουσίασης αποτελεσμάτων όρασης στο ψηφιακό δίδυμο

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

Οι διαδικασίες προσθετικής κατασκευής εν γένει παρουσιάζουν προκλήσεις σχετικές με την ποιότητά της, τόσο στο δομικό κομμάτι (παρουσία εγκλεισμάτων, πόρων και μικρορωγμών), όσο και γεωμετρικά. Προκειμένου να εντοπιστούν, και στο μέτρο του δυνατού, να εξαλειφθούν οι εν λόγω προκλήσεις, θα αναπτυχθούν κατάλληλοι αλγόριθμοι και εργαλεία λογισμικού. Η παρούσα λύση αναπτύσσει ένα λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής βασισμένο στην Τεχνητή Νοημοσύνη και την συλλογή δεδομένων (data collection).

2.3.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

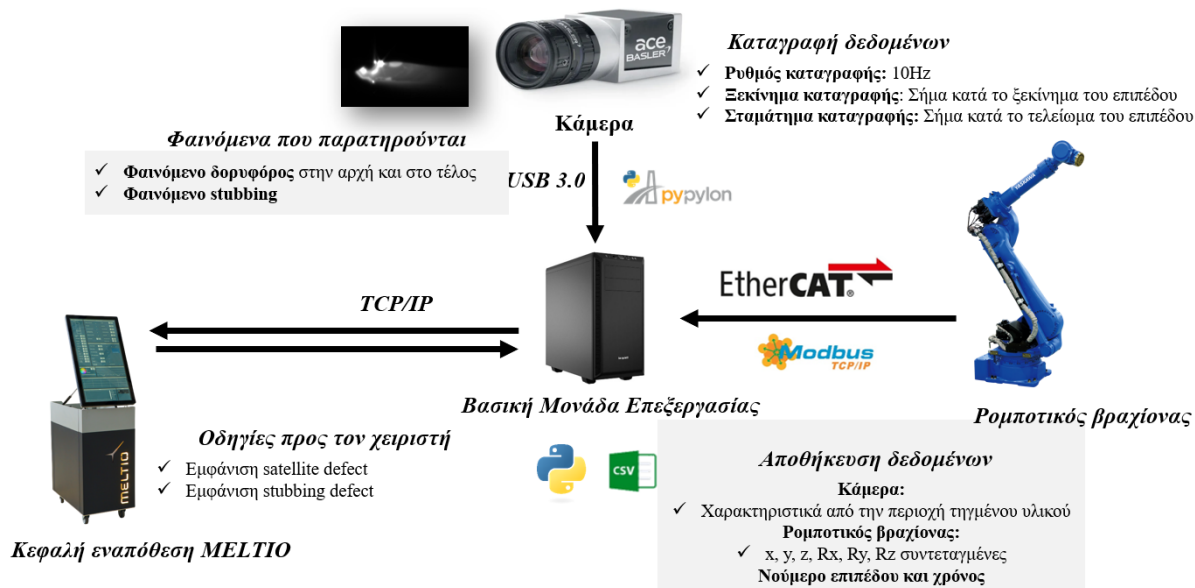
Η υλοποίηση της παρούσας λύσης πραγματοποιήθηκε σε διαδοχικά στάδια, ακολουθώντας μια οργανωμένη μεθοδολογία. Κάθε στάδιο είχε συγκεκριμένο σκοπό και συνέβαλε στην επιτυχή ανάπτυξη της πλατφόρμας ποιοτικού ελέγχου.

- Τοποθέτηση αισθητήρων και συλλογή δεδομένων (Διάρκεια: 2 μήνες): Πραγματοποιήθηκε η σωστή εγκατάσταση των αισθητηρίων και η έναρξη καταγραφής δεδομένων, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων.
- Σχεδίαση αρχιτεκτονικής πλατφόρμας (Διάρκεια: 2 μήνες): Αναπτύχθηκε η δομή της πλατφόρμας, προκειμένου να οργανωθεί η διαδικασία ελέγχου και ανάλυσης των δεδομένων.
- Πειραματική διαδικασία (Διάρκεια: 3-4 μήνες): Διεξήχθησαν πειράματα με διαφορετικές παραμέτρους, ώστε να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων με υγιή και ελαττωματικά δείγματα.
- Ανάλυση δεδομένων (Διάρκεια: 2-3 μήνες): Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τον εντοπισμό κρίσιμων χαρακτηριστικών που υποδηλώνουν ελαττώματα και τη συσχέτιση των θερμικών και γεωμετρικών φαινομένων.
- Ανάπτυξη μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης (Διάρκεια: 5-6 μήνες): Δημιουργήθηκαν και εκπαιδεύτηκαν αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης για την ανίχνευση ατελειών στη διαδικασία.
- Ενσωμάτωση στην πλατφόρμα ποιοτικού ελέγχου (Διάρκεια: 4 μήνες): Τα ανεπτυγμένα μοντέλα ενσωματώθηκαν στην πλατφόρμα, επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και αξιολόγηση της ποιότητας.

2.3.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Αφού το μοντέλο μηχανικής μάθησης είναι έτοιμο προς χρήση, δημιουργήθηκε μια πλατφόρμα που οργανώνει όλες τις ενέργειες που είχαν αναφερθεί και στο Παραδοτέο 1.2. Αρχικά, η πλατφόρμα είναι δημιουργημένη σε περιβάλλον Python και κάνει χρήση διάφορων βιβλιοθηκών για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ του εξοπλισμού. Η πρώτη δράση της πλατφόρμας είναι η δημιουργία σύνδεσης της βασικής μονάδας επεξεργασίας με την κεφαλή εναπόθεσης, με την χρήση TCP/IP Socket. Έπειτα, η πλατφόρμα ελέγχει αν η κάμερα είναι συνδεδεμένη και φορτώνει τις σωστές 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

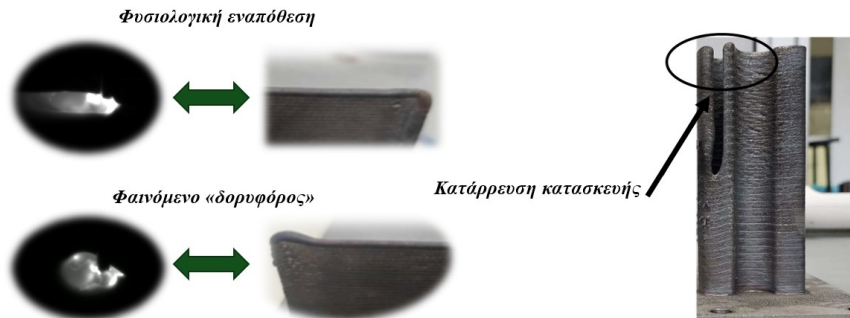
παραμέτρους μόνο όταν αρχίζει η εναπόθεση και έως ότου τελειώσει κάθε επίπεδο. Αυτό είναι εφικτό με την χρήση διάφορων σημάτων που στέλνονται από την κεφαλή στην αρχή και στο τέλος κάθε επιπέδου. Παρακάτω, στην Εικόνα 15, περιγράφονται οι συνδέσεις και οι ενέργειες του συστήματος.



Εικόνα 15: Αρχιτεκτονική πραγματικού συστήματος

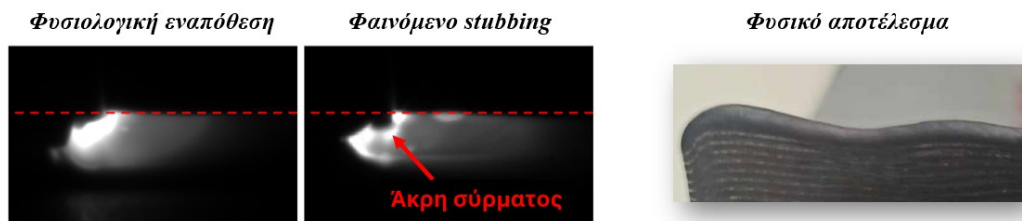
2.3.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Για την δημιουργία μιας πλατφόρμα ελέγχου της ποιότητας της κατεργασίας προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing- AM) με την μέθοδο εναπόθεσης ενέργειας και την χρήση laser (Direct Energy Deposition Laser Beam- DED-LB), είναι απαραίτητο να εντοπιστούν και να αναγνωριστούν τα πιθανά ελαττώματα και ανωμαλίες που μπορεί να προκύψουν. Δύο πολύ σημαντικά προβλήματα που συμβαίνουν συνήθως σε τέτοιου είδους θερμικές κατεργασίες είναι η δημιουργία μιας περιοχής με μεγαλύτερο πάχος και ύψος από την υπόλοιπη γεωμετρία συνήθως στην αρχή και στο τέλος της εναπόθεσης. Αυτό το φαινόμενο είναι καταγεγραμμένο στην βιβλιογραφία ως «ελάττωμα δορυφόρος» (satellite defect)¹ και οφείλεται στην στιγμιαία αύξηση εναπόθεσης υλικού. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι λόγω των κινηματικών φαινομένων του ρομποτικού βραχίονα σε συνδυασμό με την τροφοδοσία του υλικού. Στο ξεκίνημα της εναπόθεσης ο βραχίονας έχει μηδενική ταχύτητα και αρχίζει να επιταχύνει μέχρι το όριο που του έχει δοθεί. Αντίστοιχα συμβαίνει και με τον κινητήρα της τροφοδοσίας υλικού. Ωστόσο, επειδή το υλικό επιτυγχάνει αυτή την ταχύτητα σχεδόν την ίδια στιγμή που ξεκινάει, σε αντίθεση με το ρομπότ, υπάρχει διαφορά στις ταχύτητες η οποία αυξάνει τον ρυθμό εναπόθεσης και σαν αποτέλεσμα έχει την δημιουργία αυτού του ελαττώματος σε σφαιροειδές σχήμα. Ακόμα, όπως αναφέρθηκε ήδη, αυτό το φαινόμενο συμβαίνει στην αρχή και στο τέλος της εναπόθεσης, και στην περίπτωση που αυτά τα δύο σημεία συμπίπτουν, τότε το φαινόμενο είναι ακόμα πιο εμφανές. Ο λόγος ανάγκης ελέγχου του είναι διότι αυτή η ανωμαλία δημιουργεί ασυνέχειες κατά το ύψος της εναπόθεσης και επομένως χαλάει και την ισορροπία της κατεργασίας. Ακόμα, στην περίπτωση που δεν διορθωθεί, και η εναπόθεση προϋποθέτει αρκετά επίπεδα, μπορεί να προκύψουν προβλήματα στατικότητας της κατασκευής. Τα φυσικά αποτελέσματα όσο και τα σήματα των αισθητηρίων για αυτό το φαινόμενο φαίνονται στην Εικόνα 16.



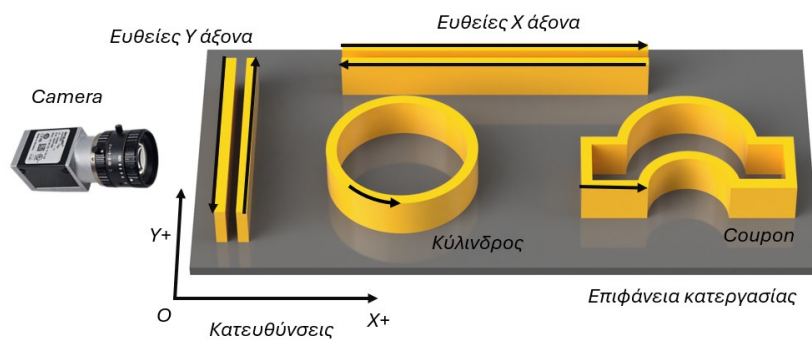
Εικόνα 16: Οπτικοποίηση satellite defect

Το δεύτερο ελάττωμα που παρουσιάζεται και χρήζει παρακολούθησης και ελέγχου είναι το φαινόμενο υπέρ-εναπόθεσης υλικού όπου το ολικό ύψος του κομματιού έχει αυξηθεί, μειώνοντας την απόσταση μεταξύ κεφαλής-υποστρώματος (standoff distance) κάνοντας το σύρμα να πιέζεται μέσα στην περιοχή τηγμένου υλικού (melt pool) αφού ακουμπάει πριν φτάσει στην σωστή απόσταση για να τηχθεί κάνοντας το να ταλαντώνεται (stutting defect-wire oscillation)². Αυτό το φαινόμενο, παρουσιάζεται ως κυματισμός στο φυσικό αποτέλεσμα της εναπόθεσης και δημιουργεί επίσης αστάθεια στην κατεργασία αφού δημιουργεί ασυνέχειες στο ύψος του κομματιού. Στην Εικόνα 17 φαίνεται το αποτέλεσμα στην περίπτωση ύπαρξης του φαινομένου όπως και η διαφορά μεταξύ ενός φυσιολογικού και όχι σήματος.



Εικόνα 17: Οπτικοποίηση φαινομένου stutting

Αφού έχουν αναγνωριστεί τα ελαττώματα που θέλουμε να παρακολουθήσουμε, πρέπει να γίνει η απαραίτητη πειραματική διαδικασία για την συλλογή δεδομένων με σκοπό την δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για την εκπαίδευση των μοντέλων μηχανικής μάθησης. Το παρόν σύστημα χρησιμοποιεί ως αισθητήριο μια οπτική κάμερα (camera), σε τέτοια διαμόρφωση που παρατηρεί την περιοχή τηγμένου υλικού από το πλάι και υπό γωνία (angular off axis). Επειδή αυτός ο σχηματισμός δίνει διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα την κατεύθυνση της εναπόθεσης, θα πρέπει να σχεδιαστούν και να εκτελεστούν πειράματα για διάφορες γεωμετρίες. Το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερος αντιληπτό σε λεπτότοιχες δομές (thin walls) αφού αυτές είναι οι πιο πιθανές να παρουσιάσουν πρόβλημα³, λόγω μικρού όγκου και αυξημένης συσσώρευσης θερμότητας. Παρακάτω, στην Εικόνα 18 φαίνονται οι τρεις γεωμετρίες που κατασκευάστηκαν και εξάχθηκαν δεδομένα.

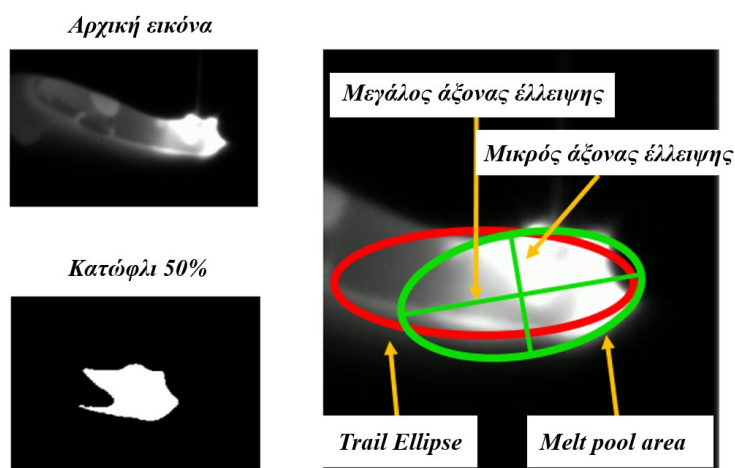


Εικόνα 18: Πειραματικές γεωμετρίες

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,
- ενέργεια laser 620-1000 Watt.

Αφού έχουν συλλεχθεί τα δεδομένα από την πειραματική διαδικασία για πέντε διαφορετικά επίπεδα ενέργειας laser, πρέπει να κατηγοριοποιηθούν σε υγιή και ελαττωματικά δείγματα (labeling) όσο και να γίνει η εξερεύνηση για την εύρεση των αντιπροσωπευτικών χαρακτηριστικών (feature engineering). Στην Εικόνα 19 παρακάτω, φαίνεται ο αλγόριθμος εξαγωγής των χαρακτηριστικών από την αρχική εικόνα της περιοχής τηγμένου υλικού. Ουσιαστικά, την στιγμή που λαμβάνεται η εικόνα, μεταφέρεται στον αλγόριθμο για επεξεργασία (image processing). Εκεί η εικόνα χωρίζεται σε δύο κατώφλια (thresholds), ένα τοποθετημένο στο 50% (125) και ένα στο 75% (64) της μέγιστης τιμής της εικόνας (255), και μένουν μόνο οι περιοχές (pixels) που είναι πάνω από τα κατώφλια. Αφού έχουν βρεθεί οι περιοχές, τότε τοποθετείται μια έλλειψη που τις περικλείει όλες τις πιθανές περιοχές και τοποθετείται πάνω στην αρχική εικόνα (masking). Αυτό σημαίνει ότι έχουμε δύο ελλείψεις, μία που χαρακτηρίζει καλά την περιοχή τηγμένου υλικού (melt pool area) και μία που περιλαμβάνει και κομμάτι του στερεοποιημένου υλικού (trail area). Έχοντας τις δύο περιοχές μπορούν να εξαχθούν χαρακτηριστικά όπως η επιφάνεια της έλλειψης, τα μήκη των αξόνων της έλλειψης όσο και άλλα χαρακτηριστικά της εικόνας όπως ο ολικός αριθμός των λευκών pixels (pixel value=255).



Εικόνα 19: Αλγόριθμος εξαγωγής χαρακτηριστικών

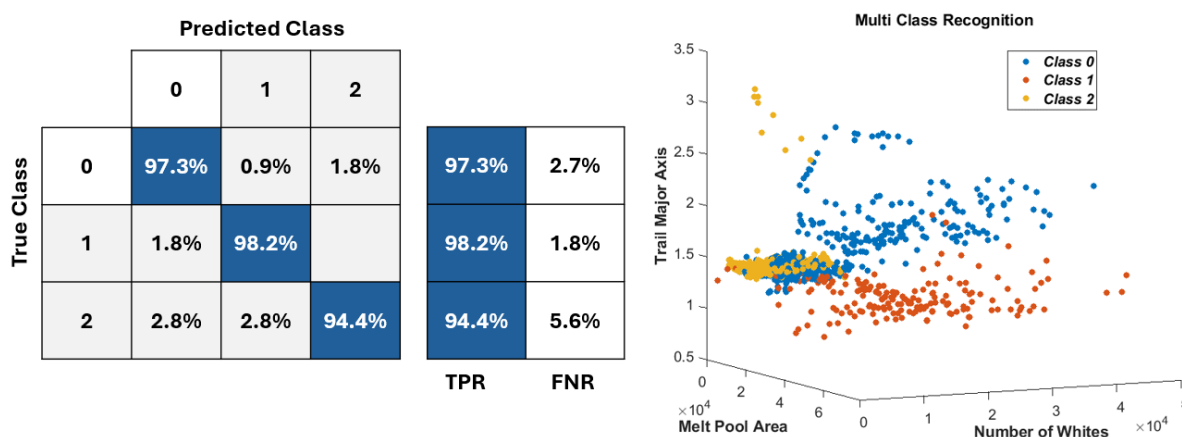
Έπειτα από την παρατήρηση των διάφορων χαρακτηριστικών στις υγιείς και όχι περιοχές αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν SVM (Support Vector Machine) μοντέλα με την μέθοδο Fine Gaussian. Αυτού του είδους τα μοντέλα είναι χρήσιμα για περιπτώσεις κατηγοριοποίησης δεδομένων σε συγκεκριμένες περιοχές προσπαθώντας να δημιουργήσει ένα επίπεδο στο οποίο μπορούν να ξεχωρίσουν τα δεδομένα. Η Fine Gaussian τεχνική, ουσιαστικά χρησιμοποιεί καμπύλες Gauss για να προσεγγίσει το επίπεδο. Ακόμα, για λόγους απλοποίησης, το satellite defect ονομάστηκε ως Τάξη-1 (Class-1) και το φαινόμενο stubbing ως Τάξη-2 (Class-2). Οι εικόνες που δεν ανταποκρίνονται σε κάποιο ελάττωμα και δείχνουν υγιή εναπόθεση κατηγοριοποιούνται ως Τάξη-0 (Class-0).

Αρχικά, δημιουργήθηκαν διαφορετικά μοντέλα για κάθε είδος ελαττώματος, με σκοπό να βρεθούν τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι που παράγουν καλά αποτελέσματα. Για την Τάξη-1 δημιουργήθηκε αρχικά ένα Fine Gaussian SVM χρησιμοποιώντας ως χαρακτηριστικά: Melt pool area, αριθμό λευκών pixels και την ισχύ των laser. Η εκπαίδευση του μοντέλου έγινε βάση 250 υγιών και 181 ελαττωματικών δειγμάτων. Για προστασία από υπερ-προσαρμογή (overfitting) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος K-fold με παράμετρο ίση με 5. **Το αποτέλεσμα του μοντέλου ήταν ακρίβεια ίση με 76.1%, 75.3% TPR**. Το TPR (True Positive Rate) μετρά το ποσοστό των

πραγματικά θετικών περιπτώσεων που το μοντέλο προβλέπει σωστά και δίνεται από τον τύπο $TPR=TP/(TP+FN)$. Για την βελτιστοποίηση της ακρίβειας του μοντέλου προστέθηκε ακόμα ένα χαρακτηριστικό εκπαίδευσης, το μήκος του μεγάλου άξονα της μεγάλης έλλειψης (trail major axis). Τα αποτελέσματα έδωσαν μία ακρίβεια μεγέθους 99.1%, 98.3% TPR και <2% FNR.

Για την Τάξη-2 ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι: *melt pool area*, *μήκος μικρού άξονα μεγάλης έλλειψης*, *μήκος μεγάλου άξονα μεγάλης έλλειψης*. Το μέγεθος των δεδομένων για την εκπαίδευση αυτού του μοντέλου ανέρχεται στα 504 υγιά και 600 ελαττωματικά δείγματα που επίσης χωρίστηκαν με 5 K-Folds. Τα αποτελέσματα έδωσαν ακρίβεια ίση με 70.8%, 69.1% TPR και 10% FNR.

Έπειτα, για την χρήση ενός μοντέλου μηχανικής μάθηση κατά την χρήση της πλατφόρμας, ενώθηκαν τα χαρακτηριστικά των δύο παραπάνω μοντέλων σε ένα ενιαίο. Το τελικό μοντέλο που δημιουργήθηκε είναι ένα Fine Gaussian SVM, εκπαιδευμένο σε 1535 δείγματα χρησιμοποιώντας ως χαρακτηριστικά τα εξής: *melt pool area*, *μήκος μικρού άξονα μεγάλης έλλειψης*, *μήκος μεγάλου άξονα μεγάλης έλλειψης*, *αριθμό λευκών ριξέλς* και *την ισχύ των laser*. Για προστασία από υπερ-προσαρμογή τα δεδομένα χωρίστηκαν σε 70% για εκπαίδευση και 30% για επικύρωση (validation). Η **ακρίβεια** που επιτεύχθηκε είναι μεγέθους **94.4%** και τα αποτελέσματα του μοντέλου φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα 20.

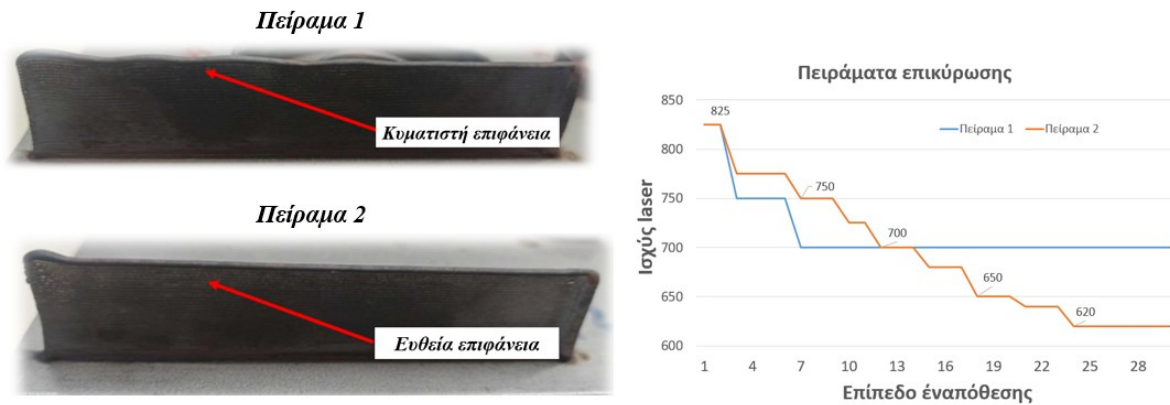


Εικόνα 20: Πίνακας σύγχυσης και διάγραμμα περιοχών μοντέλου

Ακόμα από την Εικόνα 20 μπορούμε να παρατηρήσουμε από το διάγραμμα τον σχετικά καθαρό διαχωρισμό των περιοχών του μοντέλου. Ωστόσο στο διάγραμμα είναι εφικτή η απεικόνιση μόνο τριών χαρακτηριστικών (σε σχέση με τα πέντε που έχουν χρησιμοποιηθεί) και έτσι δεν είναι δυνατή η πλήρη απεικόνιση του διαχωρισμού των περιοχών. Παρόλο αυτόν τον περιορισμό, φαίνεται καθαρά ο διαχωρισμός μεταξύ Τάξης-0 και Τάξης-1.

2.3.4 Παρουσίαση υλικού ενδιάμεσης έκδοσης και ενδιάμεσων αποτελεσμάτων

Έχοντας χτίσει την πλατφόρμα και τοποθετήσει το μοντέλο για την πρόβλεψη των ελαττωμάτων άρχισε η δοκιμαστική φάση. Σε αυτό το σημείο, δύο διαφορετικά πειράματα διεξήχθησαν, με σκοπό την δοκιμή του μοντέλου. Σαν γεωμετρία επιλέχθηκε η απλή ευθεία προς τον Y άξονα, με ταχύτητα ρομπότ 10m/s και ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος 15.3 mm/s. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο πειραμάτων είναι οι τιμές της ισχύς των laser. 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. Το φυσικό αποτέλεσμα των δύο πειραμάτων φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 21.

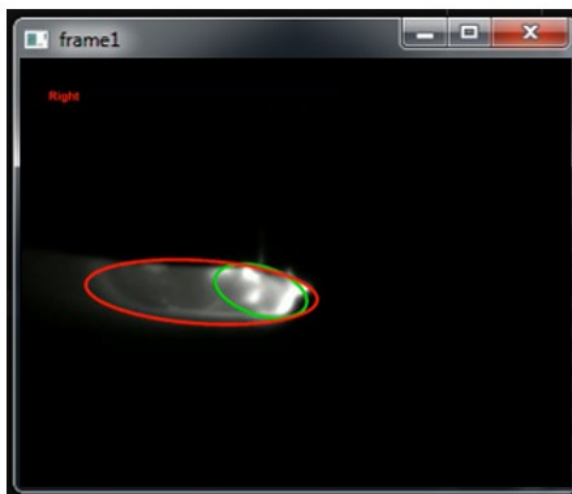


Εικόνα 21: Πειράματα επικύρωσης μοντέλου και συμπεριφορά ισχύς laser.

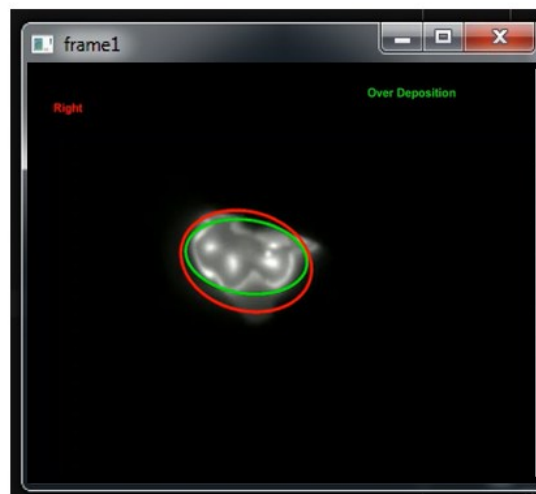
Τα αποτελέσματα από το 1^ο πείραμα έδειξαν ακριβή πρόβλεψη του μοντέλου για το φαινόμενο του δορυφόρου ενώ για το φαινόμενο stubbing, το μοντέλο έδωσε ενδείξεις στο τελευταίο στάδιο ισχύς (700 Watt) και έως ότου ολοκληρωθεί η διεργασία. Για το 2^ο πείραμα, το μοντέλο πάλι κατάφερε να χαρακτηρίσει με ακρίβεια τα φαινόμενα δορυφόρου. Ωστόσο στην περίπτωση του φαινομένου stubbing, το μοντέλο έδωσε ενδείξεις μόνο στο εύρος μεταξύ 750-680 Watt. Αυτό σημαίνει ότι λόγω της συνεχόμενης μείωσης της ισχύς των laser, η διεργασία διορθώθηκε και έτσι εξαφανίστηκε το φαινόμενο. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το φυσικό αποτέλεσμα που φαίνεται παραπάνω στην Εικόνα 21 από την διαφορά στην ποιότητα της επιφάνειας στο τελικό επίπεδο, αφού στο πρώτο που εμφανίστηκε σημαντικά το stubbing υπάρχει σημαντικός κυματισμός στην επιφάνεια, σε αντίθεση με το δεύτερο πείραμα που έχει ευθεία επιφάνεια.

Για την οπτικοποίηση των εικόνων και των αποτελεσμάτων της κάμερας χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη OpenCV της Python και το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 22. Στο πάνω αριστερά σημείο δίνεται η κατεύθυνση του ρομποτικού βραχίονα και στο πάνω δεξιά φαίνονται τα ελαττώματα που εντοπίζονται από το μοντέλο. Ταυτόχρονα δίνονται και οι ελλείψεις στην τελική εικόνα για καλύτερη καθοδήγηση του χειριστή ως προς την οπτική του μοντέλου.

Δευτερόλεπτο 3



Δευτερόλεπτο 10



Εικόνα 22: Οπτικοποίηση κατά την διεργασία.

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

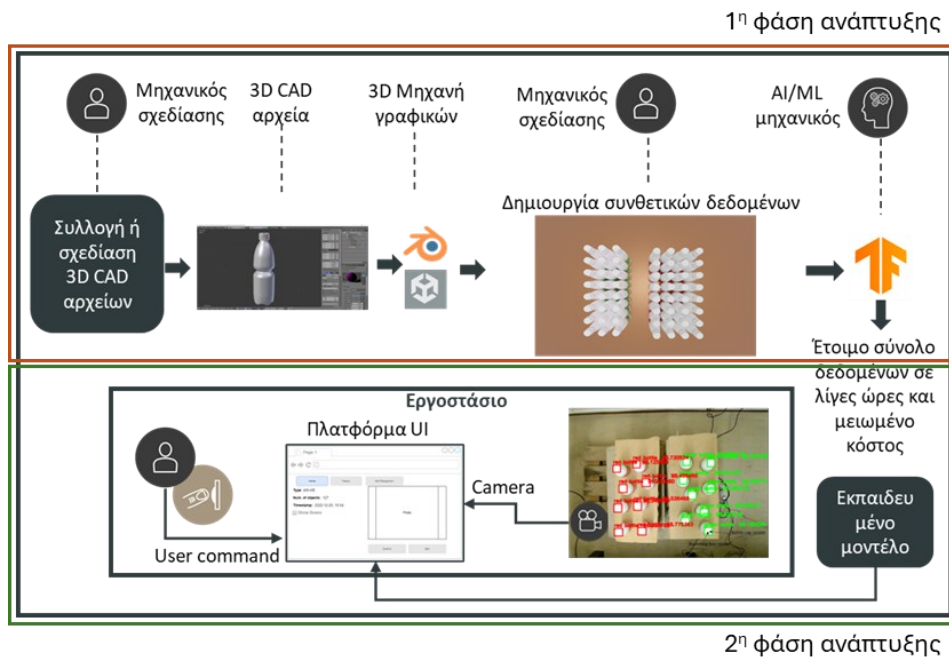
Η παρούσα λύση προσφέρει ένα πλαίσιο δημιουργίας συνόλων δεδομένων μέσω μιας αλυσίδας εργαλείων προσομοίωσης. Το πλαίσιο χρησιμοποιείται για την δημιουργία συνθετικών εικόνων όπως π.χ. κατεργασμένων κομματιών και την εκμετάλλευσή τους από αλγορίθμους Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) με στόχο την εφαρμογή τους 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 λύσης

Για την ανάπτυξη της εν λόγω λύσης, ο κύριος εταίρος 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). **Εκτιμώμενη διάρκεια: 2 μήνες**
- 2 Τροποποίηση αλγορίθμου παραγωγής συνθετικών δεδομένων: Ο υπάρχων αλγόριθμος παραγωγής συνθετικών δεδομένων (εικόνων) απαιτεί εξατομίκευση ώστε να προσεγγίζει το εν λόγω μηχανολογικό πρόβλημα. **Εκτιμώμενη διάρκεια: 2 μήνες**
- 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 (Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα) ανοιχτού κώδικα με στόχο την εκπαίδευση και ανάπτυξη ενός λογισμικού αναγνώρισης προϊόντων. **Εκτιμώμενη διάρκεια: 3 μήνες**
- 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. **Εκτιμώμενη διάρκεια: 2 μήνες**
- 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. **Εκτιμώμενη διάρκεια: 2 μήνες**
- 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). **Εκτιμώμενη διάρκεια: 2 μήνες**
- 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. **Εκτιμώμενη διάρκεια: 3 μήνες**
- 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. **Εκτιμώμενη διάρκεια: 3 μήνες.**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κύριο κομμάτι ανάπτυξης κατά το πρώτο ήμισυ της EE2 για την παρούσα λύση αφοσιώνεται στην παραγωγή συνθετικών δεδομένων και την εκπαίδευση μοντέλων TN. 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.



Εικόνα 23: Παραστατική αρχιτεκτονική εφαρμογής συνθετικής παραγωγής δεδομένων

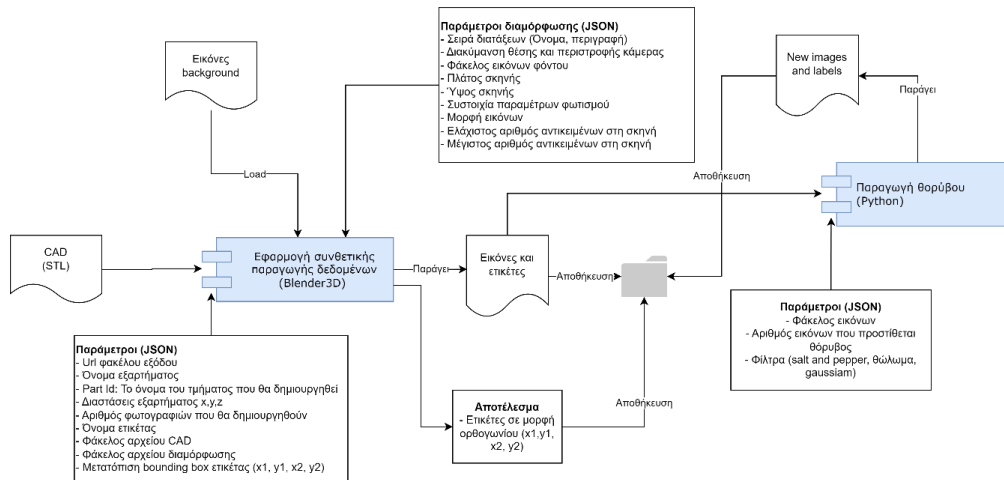
2.4.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

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 απαθανάτισουν ψηφιακά με την μορφή συνθετικών εικόνων. Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 24) και η υλοποίηση της βασίζεται καθολικά στην γλώσσα ανοιχτού κώδικα Python, μορφότυπα 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:

- Σχεδιαστικά αρχεία αντικειμένων (CAD): εισάγονται στην εφαρμογή (κατά κύριο λόγο με την μορφή .stl - stereolithography) τα σχεδιαστικά αρχεία των αντικειμένων που 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. Μετά το πέρας της παραγωγής του βασικού συνόλου δεδομένων, 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.
- 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.

Κύριο αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός συνόλου συνθετικών εικόνων, καθώς και οι ετικέτες (bounding boxes) επισήμανσης τους, το οποίο θα ικανοποιεί τις πληροφορίες εισόδου του χρήστη. Το παραγόμενο σύνολο δεδομένων θα είναι απευθείας έτοιμο για εκπαίδευση από αλγόριθμους TN.

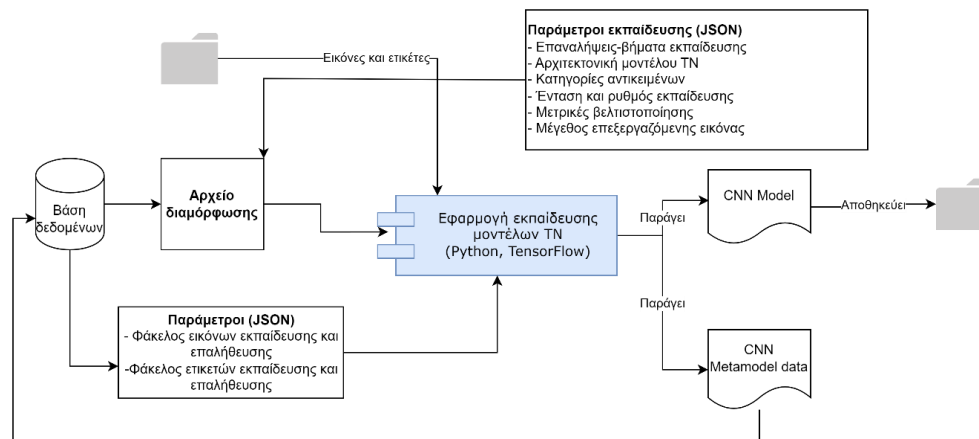
Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 24: Αρχιτεκτονική εφαρμογής παραγωγής συνθετικών δεδομένων

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 25) 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 Συνελκτικών 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 προσβέει. Η εφαρμογή απαιτεί ως είσοδο τα εξής στοιχεία:

- Επιλογή μοντέλου: ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μέσα από μια ποικιλία προεπιλεγμένων Συνελκτικών Νευρωνικών Δικτύων.
- 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 επισήμανσης 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.

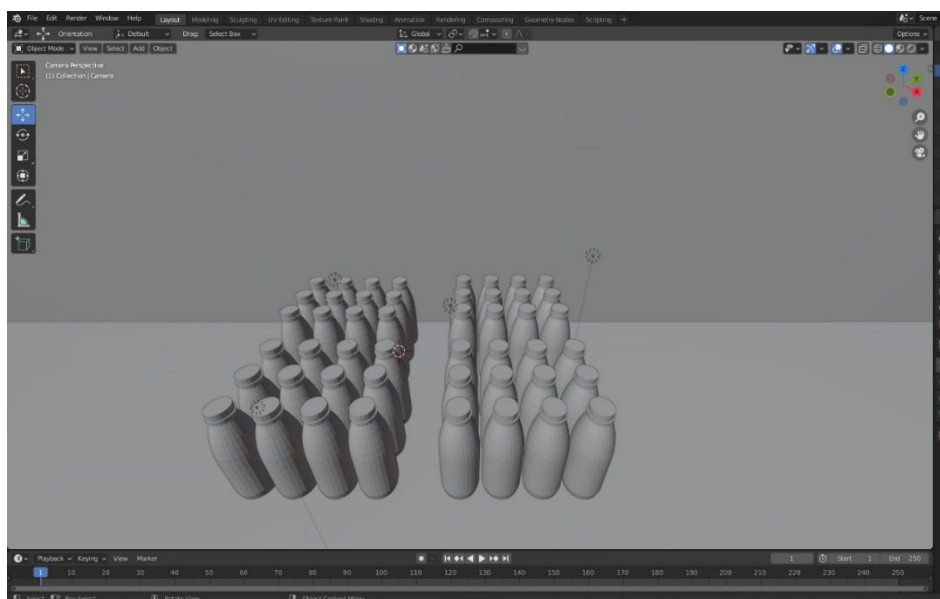


Εικόνα 25: Αρχιτεκτονική εφαρμογής εκπαίδευσης μοντέλων TN

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 στο παρόν στάδιο διενεργήθηκε μέσω του built-in Python API που προσφέρει το Blender3D. Σε μετέπειτα στάδια αυτές οι λειτουργίες θα διαμορφώνονται μέσω του κεντρικού περιβάλλοντος χρήστη της πλατφόρμας καθιστώντας την διαδικασία πιο φιλική και βολική προς τους πελάτες της λύσης.



Εικόνα 26: Μοντελοποίηση σκηνής στο γραφικό περιβάλλον Blender3D

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 26.

2.4.3.2 Τροποποίηση αλγορίθμου 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 24, οι παράμετροι δημιουργίας συνθετικών δεδομένων, πρέπει να ορίζονται με τυπικό και αυτοματοποιημένο τρόπο. Για την εκτέλεση 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 συνόλου 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 αλγορίθμου παραγωγής συνθετικών δεδομένων, είναι η παραμετροποίηση των παραπάνω στοιχείων ώστε να είναι εύκολα μεταβαλλόμενα από τον χρήστη τόσο σε θέματα εξατομίκευσης όσο και βολικότητας. Η εξατομίκευση εξάλλου της τρισδιάστατης ψηφιακής σκηνής

είναι απαραίτητη για την γενίκευση της εφαρμογής και την δυνατότητα ικανοποίηση πολλαπλών πιλοτικών εφαρμογών σε εμπορικό στάδιο. Ως συνέπεια, ο αλγόριθμος παραγωγής συνθετικών δεδομένων τροποποιήθηκε ώστε να λαμβάνει τιμές για τις εκάστοτε παραμέτρους εκπαίδευσης, χρησιμοποιώντας το μορφότυπο επικοινωνίας JSON. Συγκεκριμένες παράμετροι και ενδεικτικές τιμές πάνω σε μια πρώτη, δοκιμαστική πιλοτική εφαρμογή παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο (2.4.4)

2.4.4 Ενδιάμεσα αποτελέσματα και έκδοση λύσης

2.4.4.1 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

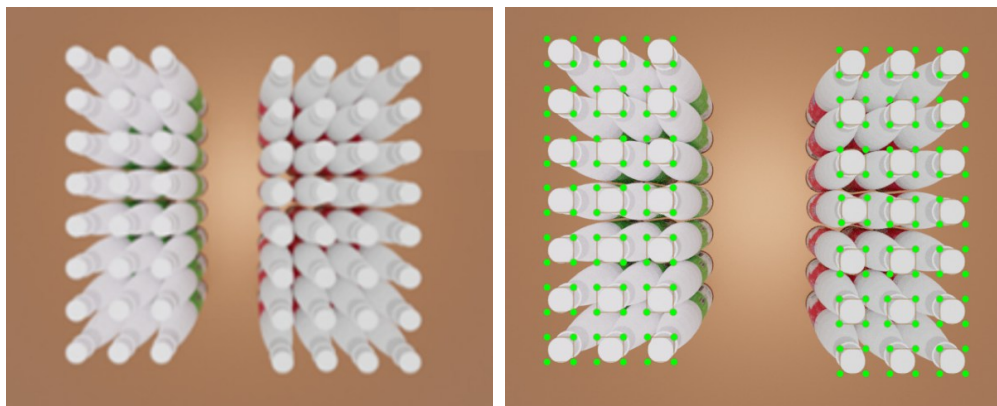
Η μέχρι τώρα πρόοδος της λύσης αξιολογήθηκε ήδη από τα μέσα της ΕΕ2. Αυτό συνέβη με την προκαταρκτική ενασχόληση με την παραγωγή συνθετικών δεδομένων και εκπαίδευση μοντέλων TN για ένα απλό προκαταρκτικό σενάριο εφαρμογής. Σύμφωνα και με την Εικόνα 26, το έργο ενασχολείται με την πιλοτική οπτική αναγνώριση γαλακτοκομικών προϊόντων (με μορφή μπουκαλιών) σε θέματα ελέγχου ποιότητας και μεταφοράς μέσω ρομποτικών βραχιόνων. Στην παρούσα φάση, το έργο εξετάζει μια απλοποιημένη μορφή της τελικής πιλοτικής εφαρμογής, η οποία αφορά την αναγνώριση ενός αριθμού μπουκαλιών και την εκτίμηση του αριθμού τους. Ως εκ τούτου, ορίστηκε μία (1) 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 26. Η παραμετροποίηση της παραγωγής εικόνων (παράμετροι ομάδας 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 της ενότητας Εικόνα 24, δημιουργείται η ψηφιακή σκηνή της Εικόνα 26 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 εδώ επιλέχθηκε σε μέγεθος 900x675 pixels, δ) αριθμός παραγόμενων εικόνων ο οποίος επιλέχθηκε σε αριθμό 2200 εικόνων.

Πίνακας 1: Παράμετροι παραγωγής συνθετικών εικόνων

Ομάδα	Παράμετρος	Περιγραφή
Α	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
	Ρύθμιση κάμερας	Τυχαιοποίηση θέσης στο καρτεσιανό σύστημα κατά ποσοστό +/- 30% από την βέλτιστη θέση
Β	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 24 , και τις παραμέτρους του Πίνακα 1, 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. Δείγματα του συνόλου συνθετικών δεδομένων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 27: Παραγωγή συνθετικών δεδομένων και επισήμανση δεδομένων (labelling)

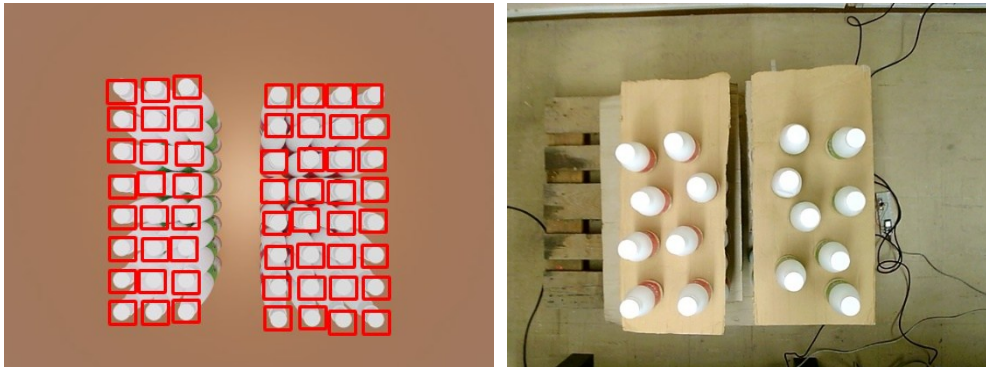
Η προσέγγιση της παρούσας λύσης εκμεταλλεύεται Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNN), τα οποία αποτελούν την πλέον προηγμένη τεχνολογία για την οπτική αναγνώριση αντικειμένων και συναφείς εφαρμογές. Το συνθετικό σύνολο δεδομένων που δημιουργήθηκε, θα χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση ενός τέτοιου μοντέλου TN, με τις παραμέτρους εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν να παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Συγκεκριμένα, στην παρούσα φάση ασχοληθήκαμε μονάχα με ένα CNN μοντέλο, το YOLOv8, ενώ ενασχόληση με περισσότερα ανταγωνιστικά μοντέλα αναμένεται στο υπόλοιπο της ΕΕ2. Για την εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η ολότητα του συνόλου δεδομένων, με τα δεδομένα να χωρίζονται κατά ποσοστό 90/10% σε δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης. Η συνολική διάρκεια της φάσης εκπαίδευσης τέθηκε στα 7000 βήματα (2 ώρες) ενώ σε κάθε βήμα προσπελάζονται όλες οι εικόνες εκπαίδευσης, εισερχόμενες σε δέσμες των 64. Η ανάλυση εκπαίδευσης των εικόνων διέφερε με αυτήν της φυσικής τους ανάλυσης και τέθηκε στα 480x480 pixels για ταχύτερη εκπαίδευση και χαμηλότερες υπολογιστικές ανάγκες. Ο ρυθμός/ένταση εκπαίδευσης ορίστηκε μεταβλητός με την μέγιστη τιμή του να τίθεται στα 1000 βήματα.

Πίνακας 2: Παράμετροι εκπαίδευσης Συνελικτικού Νευρωνικού Δικτύου

Παράμετρος	Τιμή
Μοντέλο CNN	YOLOv8
Αριθμός εικόνων ανά δέσμη εκπαίδευσης	64
Μέγεθος εισαγωγής εικόνας (pixels)	480x480
Ρυθμός εκπαίδευσης	0.00013
Στάδιο μέγιστου ρυθμού εκπαίδευσης	1000
Συνολική διάρκεια/βήματα εκπαίδευσης	7000
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 αλγόριθμου, ο οποίος αναπτύχθηκε σε γλώσσα ανοιχτού κώδικα Python. Στο παρόν στάδιο, το μοντέλο δοκιμάστηκε μονάχα σε συνθετικά δεδομένα (δείτε Εικόνα 28), τα οποία δεν είχαν χρησιμοποιηθεί στην φάση εκπαίδευσης. Η απόδοση του αλγορίθμου ήταν άριστη, εμφανίζοντας υψηλή ακρίβεια στην τοποθέτηση των bounding boxes των μπουκαλιών στην εικόνα. Η κατηγορία ανίχνευσής («bottle») έχει αφαιρεθεί για λόγους βολικότητας κατά την

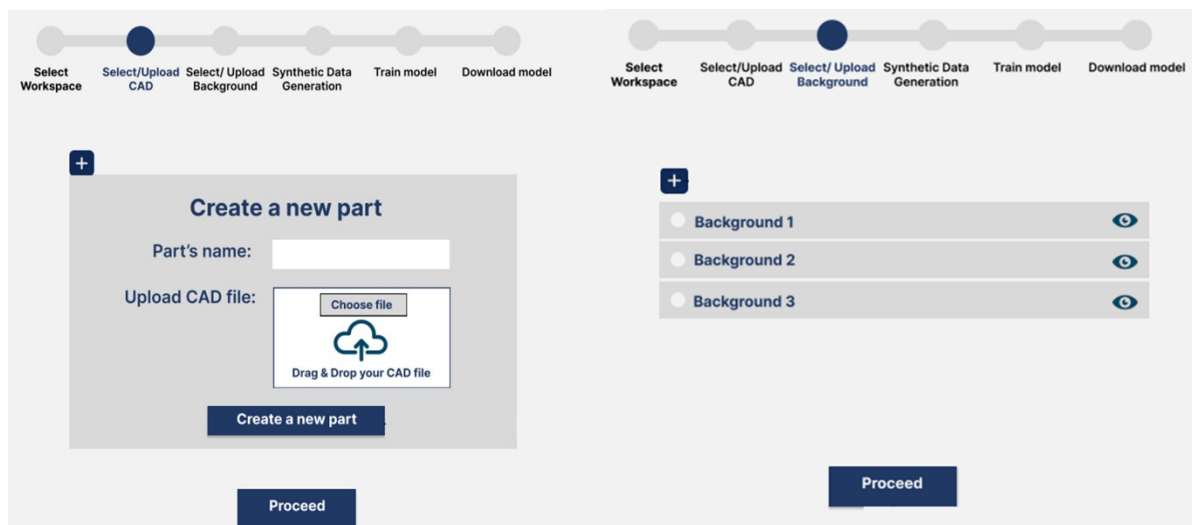
ανάγνωση του παραδοτέου. Στο δεξιό σκέλος της Εικόνα 28 παρουσιάζεται μια αναπαράσταση του πραγματικού σενάριου επαλήθευσης όπως αυτό θα διεξαχθεί σε επόμενα στάδια του έργου (ΕΕ2 και ΕΕ3). Γίνεται αντιληπτό πως η συνθετική εικόνα αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το πραγματικό σενάριο και αποτελεί μια πρώτη, έμπιστη επαλήθευση της εν λόγω προσέγγισης.

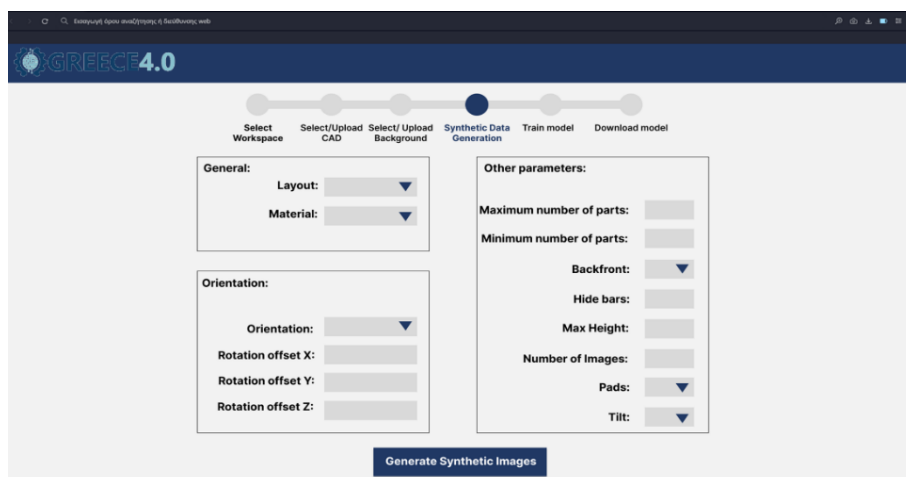


Εικόνα 28: Αναγνώριση πάνω σε συνθετικά δεδομένα (αριστερά) και Αναπαράσταση πραγματικού σεναρίου

2.4.4.2 Παρουσίαση υλικού ενδιάμεσης έκδοσης

Με την παρούσα λύση να έχει ολοκληρώσει σε σημαντικό βαθμό τα στάδια ανάπτυξης των τεχνολογιών/αλγορίθμων παραγωγής συνθετικών δεδομένων και εκπαίδευσης μοντέλων οπτικής αναγνώρισης TN (CNN), το βάρος ανάπτυξης μεταφέρεται στην μεταφορά και προσφορά των προηγούμενων μέσω μιας εμπορικής και εύχρηστης, ολοκληρωμένης πλατφόρμας. Στο παρόν στάδιο, έχουν ήδη σχεδιαστεί αναλυτικά web σχέδια της πλατφόρμας, ενώ κομμάτια της έχουν ήδη αναπτυχθεί σε πραγματικές συνθήκες. Η ανάπτυξη της εν λόγω πλατφόρμας διεξάγεται με χρήση των γλωσσών ανοιχτού κώδικα Java και HTML. Ενδεικτικά παρατίθενται σελίδες της υπό ανάπτυξη εφαρμογής.





Εικόνα 29: Αναπαράσταση εισαγωγής αντικειμένων, επιλογής φόντου και εισαγωγής παραμέτρων παραγωγής συνθετικών δεδομένων μέσα από το κεντρικό περιβάλλον χρήστη

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται ενδεικτικά τρία στάδια της φάσης παραγωγής συνθετικών δεδομένων: α) εισαγωγή αντικειμένων, β) επιλογή φόντου και γ) εισαγωγή παραμέτρων παραγωγής συνθετικών δεδομένων. Οι άνωθι ενέργειες συμφωνούν απολύτως με τις διαδικασίες που ορίστηκαν στην παράγραφο 2.4.3.2. Στόχος της πλατφόρμας είναι να διευκολύνει και οπτικοποιήσει την παραγωγή συνθετικών δεδομένων, να επιτρέψει την εκπαίδευση μοντέλων TN και να προσφέρει ένα περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη για την λήψη φυσικών εικόνων σε πραγματικό χρόνο και την αξιοποίηση των τεχνολογιών TN με στόχο την οπτική αναγνώριση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η ανάπτυξη της πλατφόρμας θα συνεχιστεί και θα ολοκληρωθεί στο υπόλοιπο της ΕΕ2 περιλαμβάνοντας την πλήρη ενσωμάτωση των αλγορίθμων εκπαίδευσης μοντέλων TN, την προσφορά πληθώρας μοντέλων CNN και τον διαχωρισμό των χρηστών ανάλογα με τα δικαιώματά τους (η πλατφόρμα προορίζεται για εμπορική χρήση μέσα από διάφορα δωρεάν και επί πληρωμή πακέτα).

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

2.5.α.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

Η ανάπτυξη της λύσης έχει σχεδιαστεί και αναλυθεί σε 7 στάδια υλοποίησης. Ο σχεδιασμός έγινε με σκοπό την οργάνωση της ανάπτυξης σε διακριτά βήματα. Τα στάδια ανάπτυξης είναι τα εξής:

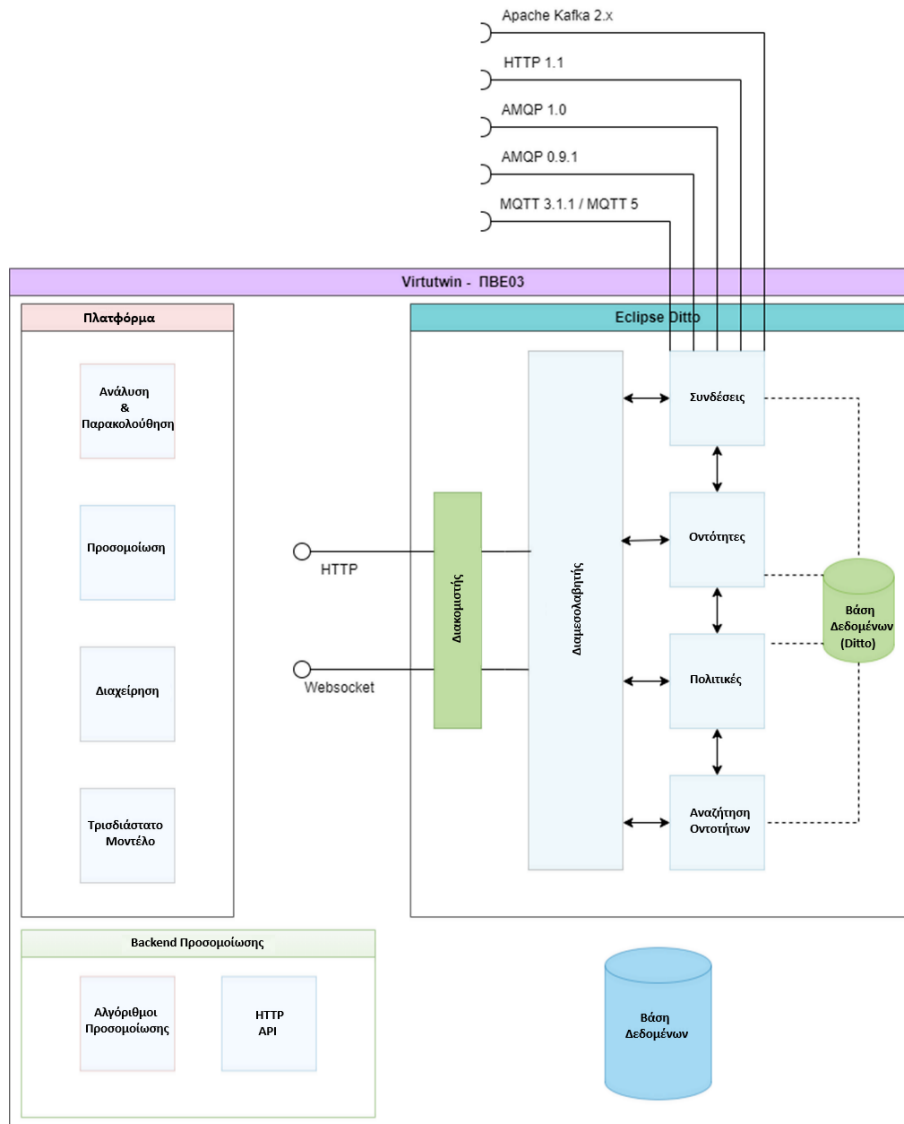
1. Δημιουργία πειραματικής υποδομής με χρήση βιομηχανικού εξοπλισμού: Συλλογή και πρώτη εγκατάσταση υλικού και απαραίτητων αισθητήρων
2. Διασύνδεση υποδομής με το υποσύστημα IoT: Δημιουργία και έλεγχος υπηρεσιών διασύνδεσης αισθητήρων με την υπό-ανάπτυξη λύση.
3. Δημιουργία νέων βάσεων δεδομένων για την αποθήκευση αρχείων και πληροφοριών: Δημιουργία αποθετηρίων πληροφοριών από τη συλλογή δεδομένων
4. Εκτέλεση προσομοιώσεων: Εκκίνηση λειτουργιών πάνω στα υπο-συλλογή δεδομένα
5. Εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης: Εκπαίδευση των μοντέλων της λύσης πάνω στα αποτελέσματα
6. Εκτέλεση δοκιμαστικών σεναρίων: Διενέργεια δοκιμών μέσω της ολοκληρωμένης λύσης
7. Βελτιστοποίηση τελικής λύσης: Επανεξέταση αποτελεσμάτων, διεπαφής με στόχο την εύρεση και σχεδιασμό βέλτιστων λειτουργιών

2.5.α.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της παρούσας λύσης μπορεί να συνοψιστεί μέσα από δύο διαγράμματα τα οποία περιγράφουν τόσο την **όψη 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** που 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.
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. **Elasticsearch Database:** Λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος αποθήκευσης για δεδομένα χρονοσειρών, επιτρέποντας γρήγορη και αποτελεσματική πρόσβαση σε πληροφορίες. Χάρη στις ισχυρές δυνατότητες αναζήτησης και ανάλυσης που προσφέρει, καθιστά δυνατή την ανακάλυψη κρυμμένων συσχετίσεων, την αναγνώριση προτύπων και την εξαγωγή πολύτιμων επιχειρηματικών γνώσεων από μεγάλα σύνολα δεδομένων.



Εικόνα 30: Αρχιτεκτονική λύσης

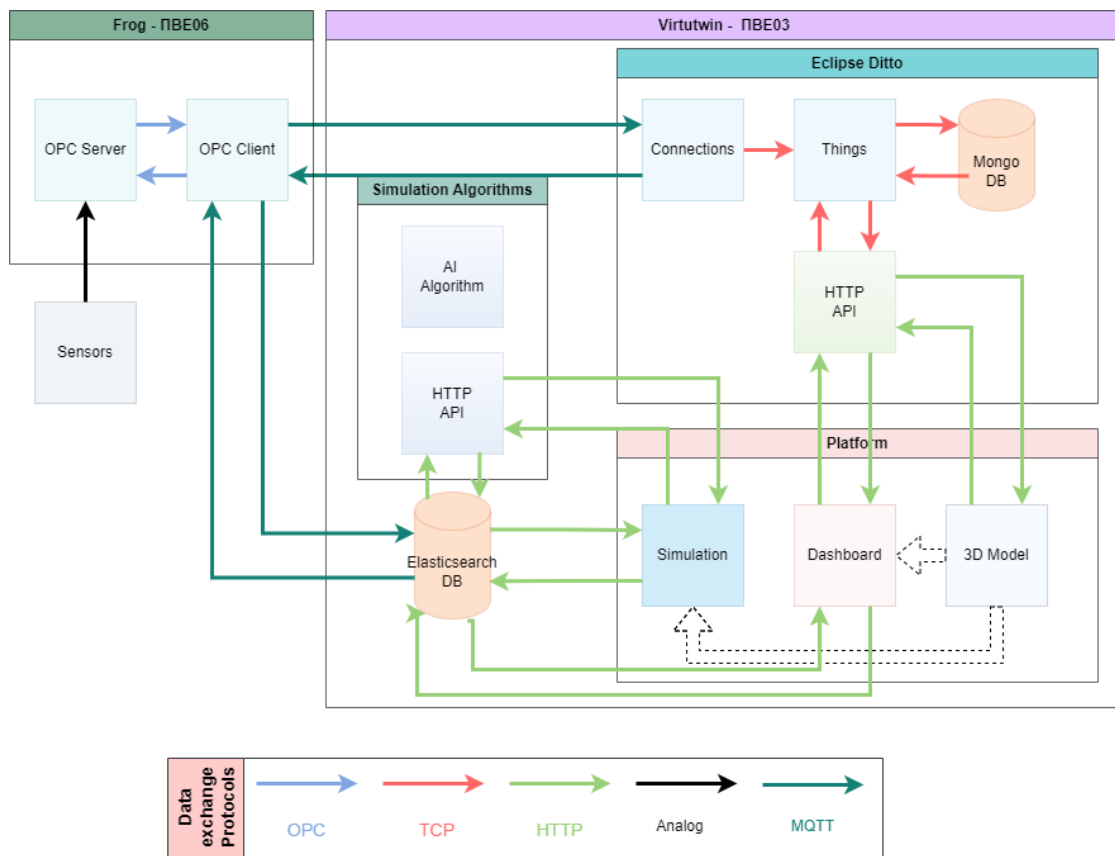
Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική διαμορφώνει ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα για τη συλλογή, διαχείριση και απεικόνιση δεδομένων από ποικίλες πηγές, όπως αισθητήρες και SCADA συστήματα. Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών διασφαλίζεται μέσω ενός ανθεκτικού και ασφαλούς καναλιού που βασίζεται στο πρωτόκολλο MQTT,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

Τέλος, η ενσωμάτωση αλγορίθμων machine learning επιτρέπει τη δημιουργία προγνωστικών μοντέλων και την ανίχνευση ανωμαλιών, προσφέροντας στους χρήστες τη δυνατότητα να εκτελούν προσομοιώσεις και να

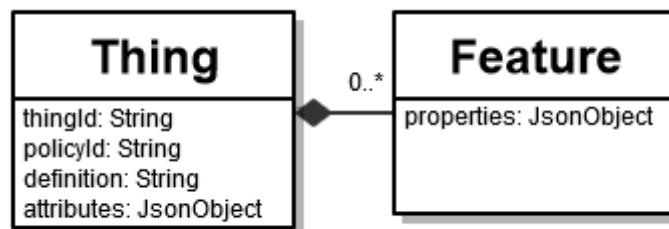
λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις. Το σύστημα συνδυάζει όλα αυτά τα στοιχεία σε μια ενιαία λύση, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη συλλογή, ανάλυση και αξιοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής πληροφορίας

2.5.α.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Στο εσωτερικό του Eclipse Ditto, το οποίο αποτελεί τη θεμελιώδη δομή για τη δημιουργία και διαχείριση ψηφιακών διδύμων, κάθε φυσικό ή εικονικό αντικείμενο—όπως αισθητήρες, μηχανήματα, διαδικασίες ή πληροφοριακά συστήματα—αναπαρίσταται ως ένα Thing. Κάθε Thing διαθέτει ένα σύνολο από Features, δηλαδή ιδιότητες και λειτουργίες, ενώ η πλατφόρμα προσφέρει μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης (Policies) που επιτρέπουν την ακριβή ρύθμιση των δικαιωμάτων χρηστών και συστημάτων. Επιπρόσθετα τα χαρακτηριστικά thingId και attributes λειτουργούν ως ένα μοναδικό αναγνωριστικό ενός Thing και για τη μοντελοποίηση των διάφορων ιδιοτήτων ενός Thing αντίστοιχα.



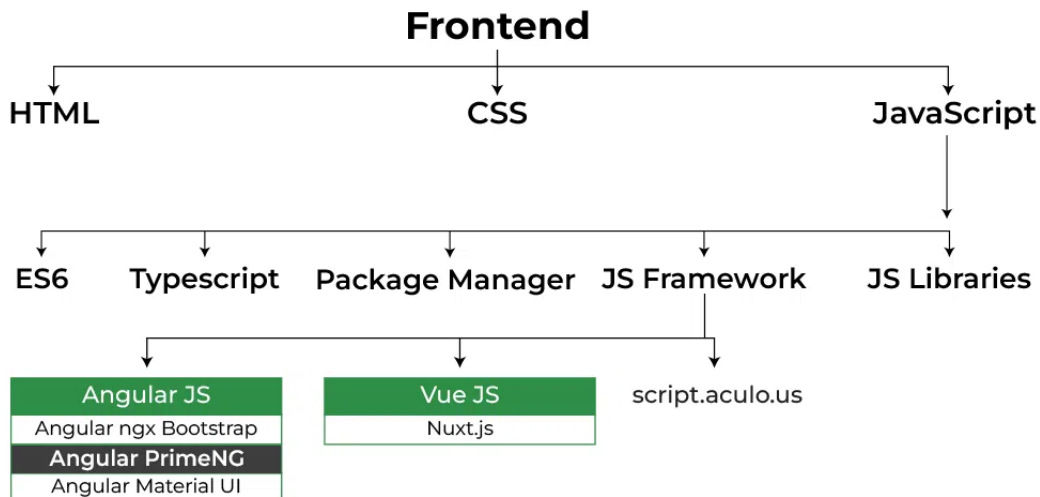
Εικόνα 32: Επισκόπηση Eclipse Ditto Thing

Η λειτουργικότητα του Ditto επεκτείνεται στην ενορχήστρωση και επεξεργασία δεδομένων, συνδέοντας πληροφορίες από διάφορες πηγές και δημιουργώντας μια ενιαία, συνεκτική εικόνα των διαδικασιών. Χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικά περιβάλλοντα για τη διαχείριση δεδομένων IoT, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση λειτουργιών, τη διάγνωση πιθανών δυσλειτουργιών και την υποστήριξη προγνωστικής συντήρησης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο βλαβών και απρογραμμάτιστων διακοπών λειτουργίας.

Η διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας αναπτύσσεται με Angular και PrimeNG, προσφέροντας ένα διαδραστικό και δυναμικό περιβάλλον για την παρακολούθηση και διαχείριση των δεδομένων. Ο συνδυασμός HTML και CSS διασφαλίζει έναν σύγχρονο και φιλικό σχεδιασμό, βελτιώνοντας τη συνολική εμπειρία του χρήστη και την οπτικοποίηση κρίσιμων πληροφοριών.

Το Angular PrimeNG είναι ένα ανοιχτού κώδικα framework που προσφέρει μια πλούσια γκάμα από έτοιμα στοιχεία UI για Angular, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη διαδραστικών ιστοσελίδων.

Το PrimeNG επιτρέπει τη δημιουργία διαφόρων components, panels, overlays, menus, charts και άλλων, προσφέροντας τη δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών μίας σελίδας (single-page applications). Σε αυτή την περίπτωση, η εφαρμογή φορτώνει μόνο μια σελίδα HTML και μόνο το απαιτούμενο τμήμα της ανανεώνεται κάθε φορά που ο χρήστης αλληλεπιδρά, αντί να ανανεώνεται ολόκληρη η σελίδα. Αυτό βελτιώνει την εμπειρία χρήστη, προσφέροντας ταυτόχρονα επιπλέον λειτουργικότητες για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών, ανάλογα με τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή.



Εικόνα 33: Οικοσύστημα τεχνολογιών Angular

Για την αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων, η πλατφόρμα αξιοποιεί το MongoDB για ευέλικτη διαχείριση δομημένων και μη δομημένων δεδομένων, ενώ το Elasticsearch επιτρέπει ταχεία αναζήτηση και σε βάθος ανάλυση δεδομένων χρονοσειρών. Αυτή η αρχιτεκτονική καθιστά δυνατή την ανίχνευση αποκλίσεων και ανωμαλιών σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στην έγκαιρη λήψη αποφάσεων και την αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων. Τα δεδομένα αποθηκεύονται ως έγγραφα JSON, επιτρέποντας ευελιξία και ευκολία στη διαχείριση διαφορετικών τύπων πληροφοριών.

Η αναζήτηση γίνεται γρήγορα μέσω της δομής ανεστραμμένου ευρετηρίου, υποστηρίζοντας τόσο δομημένα όσο και πλήρη κείμενα με χρήση γλώσσας ερωτημάτων JSON (Query DSL). Η ευρετηρίαση σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την άμεση αναζήτηση, ενώ οι δυνατότητες ανάλυσης βοηθούν στην εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών.

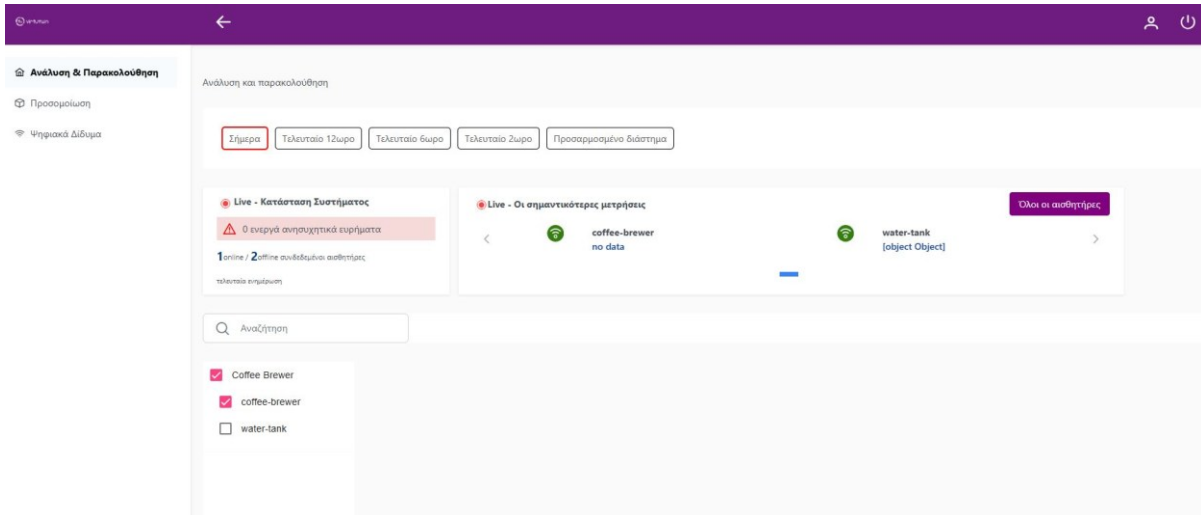
Το Elasticsearch χρησιμοποιεί μηχανισμό διαμοιρασμού για την κατανομή δεδομένων σε πολλούς κόμβους, εξασφαλίζοντας πλεονασμό και υψηλή διαθεσιμότητα. Τα δεδομένα χωρίζονται σε θραύσματα με πρωτεύοντα

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

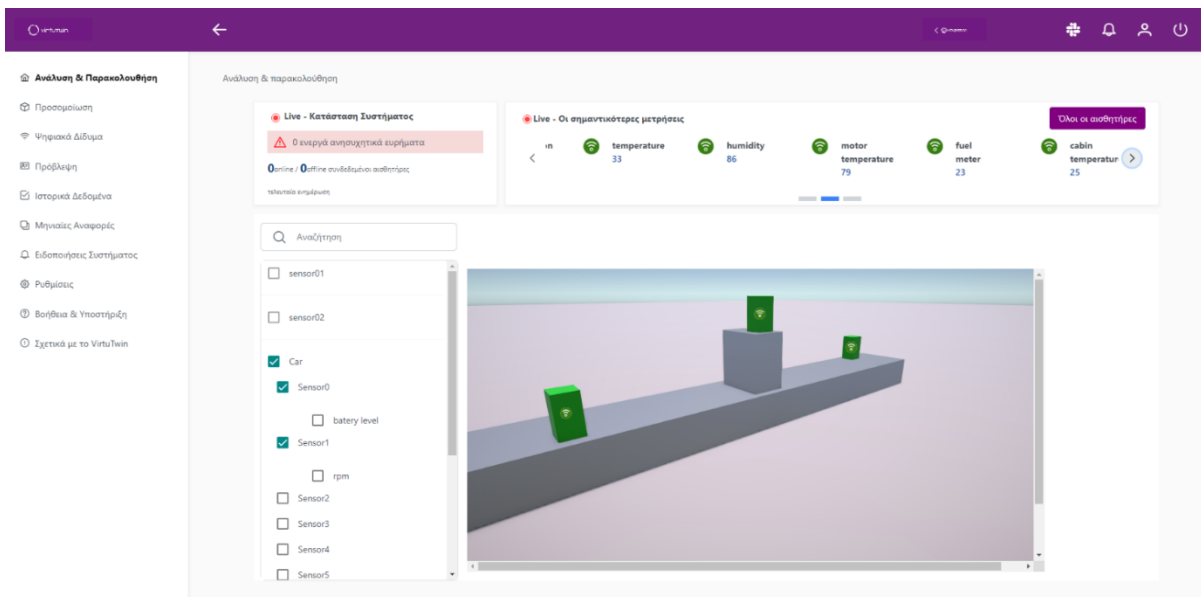
και αντίγραφα για καλύτερη ανοχή σφαλμάτων και επεκτασιμότητα. Η δυνατότητα Cross-Cluster Replication (CCR) επιτρέπει τη συγχρονισμένη αναπαραγωγή δεδομένων σε απομακρυσμένα σύμπλοκα για ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της ανάκτησης σε περίπτωση αποτυχίας.

2.5.α.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρέχονται ενδεικτικές εικόνες που περιγράφουν τη διεπαφή του χρήστη με τη πλατφόρμα που συστάθηκε με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικής.



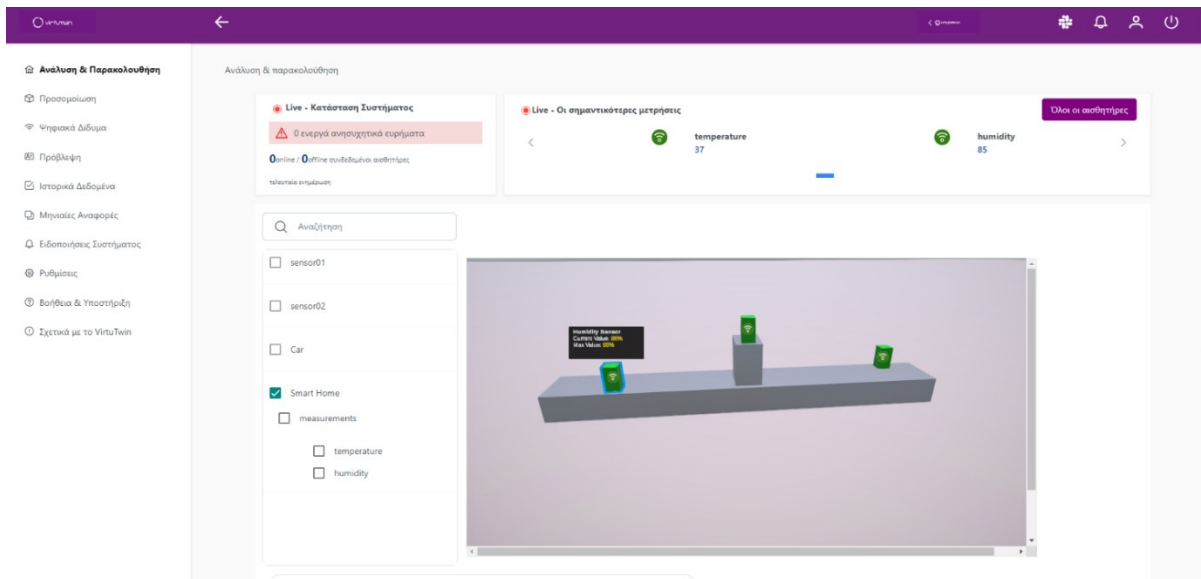
Εικόνα 34: Επισκόπηση Dashboard 1



Εικόνα 35: Επισκόπηση Dashboard 2

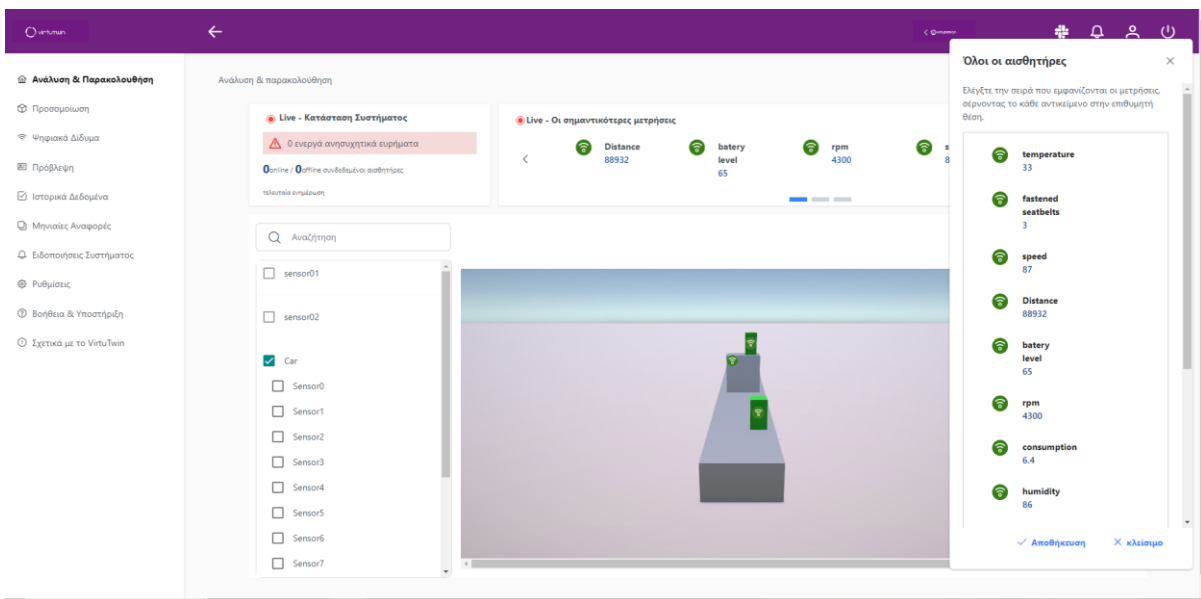
Οι παραπάνω εικόνες παρουσιάζουν έναν λειτουργικό πίνακα εργαλείων. Στο επάνω μέρος της οθόνης, οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο παρέχουν μια απλή επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης του ψηφιακού διδύμου. Για την διευκόλυνση του χρήστη, παρέχεται η δυνατότητα επιλογής μερικών αισθητηρίων - εξοπλισμού έτσι ώστε να μπορεί να εστιάσει μόνο στα δεδομένα που τον ενδιαφέρουν.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 36: 3D Viewer

Στο κέντρο παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου με σημεία ενδιαφέροντος στρατηγικά τοποθετημένα. Η τοποθέτηση του ποντικιού πάνω από αυτά τα σημεία αποκαλύπτει τιμές σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας την άμεση σύνδεση μεταξύ της φυσικής οντότητας και της ψηφιακής αναπαράστασής της.



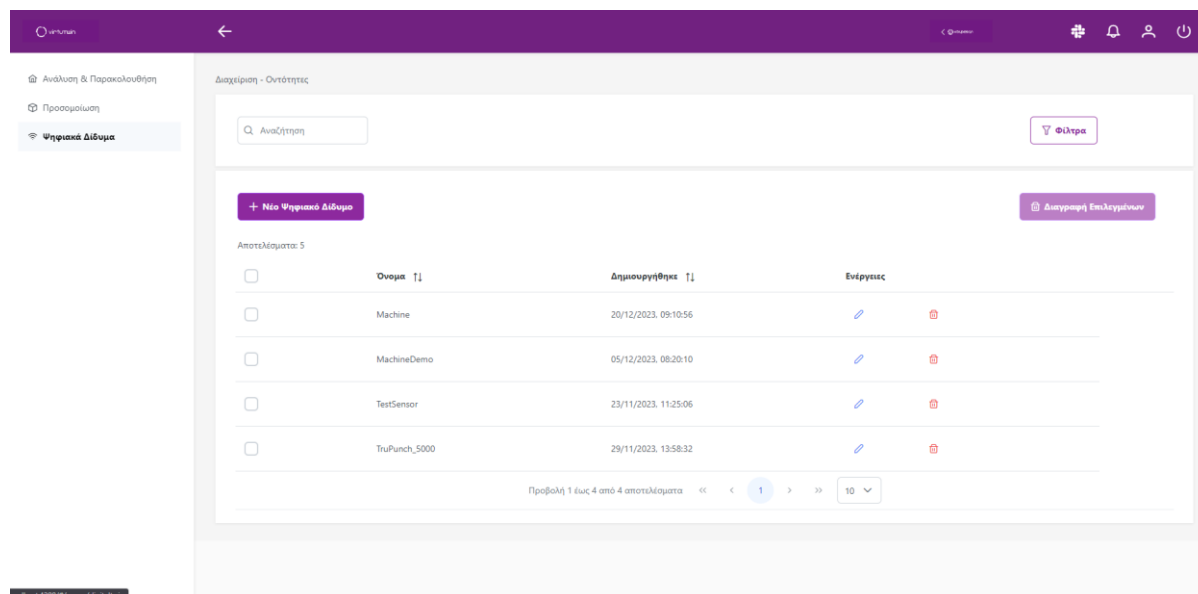
Εικόνα 37: Μενού επιλογής αισθητήρων

Στη δεξιά πλευρά της οθόνης, ένα διακριτικό dropdown μενού οργανώνει μια ολοκληρωμένη λίστα με όλους τους διαθέσιμους αισθητήρες. Αυτός ο προσεγγισμένος σχεδιασμός επιτρέπει στους χρήστες να δίνουν προτεραιότητα και να επιλέγουν συγκεκριμένους αισθητήρες ή σημεία ενδιαφέροντος με βάση τις προτιμήσεις τους. Επιλέγοντας τους αισθητήρες που τους ενδιαφέρουν, οι χρήστες μπορούν να φέρουν εύκολα τα πιο κρίσιμα δεδομένα στο προσκήνιο, επιτρέποντάς τους να εστιάσουν στις πληροφορίες που έχουν μεγαλύτερη σημασία. Αυτή η λειτουργία ενισχύει τη χρηστικότητα του dashboard, καλύπτοντας μεμονωμένες ανάγκες και βελτιστοποιώντας την εμπειρία του χρήστη για αποτελεσματική παρακολούθηση και ανάλυση.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Με την επιλογή ενός feature, ο πίνακας εργαλείων εμφανίζει ιστορικά δεδομένα μέσω απλών και σαφών γραφημάτων. Η διεπαφή δίνει προτεραιότητα στην ευκολία χρήσης, με έξυπνα χειριστήρια πλοήγησης για την εξερεύνηση του τρισδιάστατου μοντέλου και τη μετάβαση μεταξύ λειτουργιών.

Ο χρήστης μπορεί να δει όλα τα Ψηφιακά Δίδυμα και να προσθέσει νέα μέσα από ένα συλλογικό μενού.



Εικόνα 38: Διαχείριση ψηφιακών διδύμων

Η λύση που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο θα δοκιμαστεί και θα εφαρμοστεί στο παρακάτω σενάριο χρήσης εύρεσης σφαλμάτων σε μία μηχανή διάτρησης (TRUMPF TruPunch 5000). Ο σκοπός του σεναρίου ήταν να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική παρακολούθηση της μηχανής και να εντοπιστεί η αιτία της βλάβης στη βάση του τραπέζιού του TRUMPF TruPunch 5000 στο παραγωγικό περιβάλλον. Το σενάριο και τα στάδια του δομούνται ως εξής:

1. Επιλογή, εγκατάσταση και διασύνδεση κατάλληλων αισθητήρων με την πλατφόρμα του ψηφιακού διδύμου. Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί αισθητήρας κραδασμών με σκοπό την αναγνώριση της μη φυσιολογικής λειτουργίας της μηχανής διάτρησης. Βάσει αυτών των δεδομένων θα γίνει η εκπαίδευση των μοντέλων.
2. Δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του TruPunch 5000 χρησιμοποιώντας το Eclipse Ditto. Αυτό θα επιτρέπει την καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων των αισθητήρων ενώ παράλληλα, μέσω της μοντελοποίησης του συστήματος θα είναι δυνατή η εκτέλεση προσομοιώσεων.
3. Σχεδιασμός τρισδιάστατης αναπαράστασης του TruPunch 5000. Αυτό είναι προαιρετικό καθώς το τρισδιάστατο μοντέλο δεν μας παρέχει πληροφορίες, παρόλα αυτά προσφέρει μια καλύτερη εμπειρία στον χρήστη.
4. Ανάπτυξη αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης για προσομοιώσεις και ανίχνευση σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο. Όπως αναφέρθηκε στο βήμα 1, τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης θα εκπαιδευτούν με τα πραγματικά δεδομένα από τους εγκατεστημένους αισθητήρων. Για να γίνει σωστή εκπαίδευση θα γίνει συλλογή δεδομένων τόσο σε σωστή λειτουργία όσο και κατά την διάρκεια σφαλμάτων.
5. Προσαρμογή της πλατφόρμας του ψηφιακού διδύμου με την ενσωμάτωση όλων των παραπάνω στοιχείων.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 39: TruPunch 5000

Θα πραγματοποιηθεί τοποθέτηση του αισθητήρα δονήσεων/κραδασμών στη βάση του τραπέζιου του μηχανήματος, μια κρίσιμη θέση για τον εντοπισμό ανωμαλιών που σχετίζονται με τον μηχανισμό πέδησης. Αυτή η τοποθέτηση επιτρέπει την ακριβή παρακολούθηση των κραδασμών που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία διάτρησης, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για πιθανές μηχανικές ανωμαλίες.



Εικόνα 40: Τοποθέτηση αισθητήρα

Τα δεδομένα που θα συλλεχθούν από τον αισθητήρα από τη παρούσα λύση θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση και τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων στη διεπαφή που αναπτύχθηκε.

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

2.5.β.1 Στάδια υλοποίησης 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:

- Ορισμός AML μοντέλου γραμμής παραγωγής
- Δημιουργία και συγχρονισμός Ψηφιακού Διδύμου
- Εκτέλεση σεναρίου σε πραγματικό χρόνο
- Εκτέλεση υποθετικών σεναρίων στο Ψηφιακό Δίδυμο

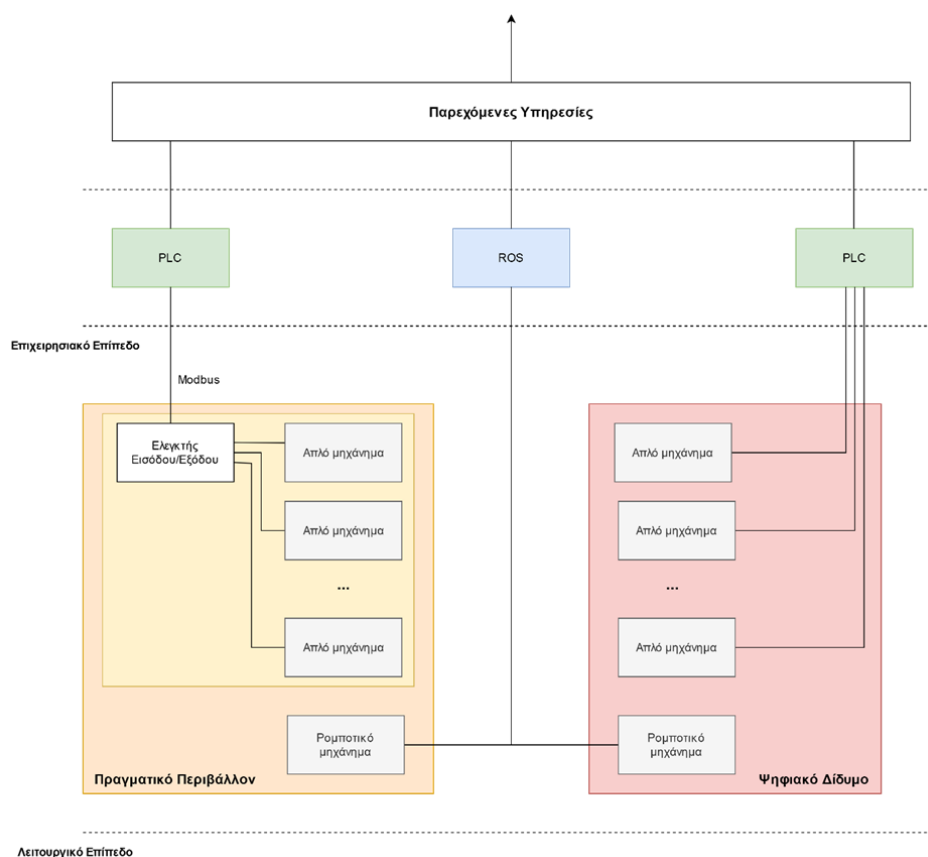
Εργασίες που θα ολοκληρωθούν στο επόμενο χρονικό διάστημα:

- Βελτίωση στον συγχρονισμό πραγματικού περιβάλλοντος με Ψηφιακό Δίδυμο
- Χρήση γλώσσας BPMN για την περιγραφή των παραγωγικών διαδικασιών
- Ολοκλήρωση διεπαφών με OPC UA (τώρα λειτουργεί με modbus)
- Βελτιστοποίηση Simulation Scenario Editor (γραφική διεπαφή δημιουργίας σεναρίων)
- Ολοκλήρωση VR απεικόνισης
- Ολοκλήρωση αλγορίθμων πρόβλεψης στο Simulation βάση των συλλεγόμενων δεδομένων.

Τα αποτελέσματα των εργασιών που έχουν ολοκληρωθεί μέχρι στιγμής αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους.

2.5.β.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η προτεινόμενη λύση, όπως αυτή αποτυπώνεται στην Εικόνα 41, περιλαμβάνει μια ιεραρχική αρχιτεκτονική συστήματος που ενσωματώνει ένα πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας με το αντίστοιχο ψηφιακό του δίδυμο. Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελείται από τρία επίπεδα: το **Λειτουργικό Επίπεδο**, το **Επιχειρησιακό Επίπεδο** και το **Επίπεδο Παρεχόμενων Υπηρεσιών**, υπογραμμίζοντας τον τρόπο ροής δεδομένων και ελέγχου μεταξύ των πραγματικών και ψηφιακών περιβαλλόντων.



Εικόνα 41: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης λύσης

Το **λειτουργικό επίπεδο** όπως προδίδει το όνομα του αντιπροσωπεύει τα φυσικά και ψηφιακά περιβάλλοντα όπου πραγματοποιούνται λειτουργικές δραστηριότητες. Περιλαμβάνει δύο βασικά μέρη:

- **Πραγματικό Περιβάλλον:** Περιλαμβάνει φυσικά μηχανήματα και ελεγκτές:
 - **Ελεγκτής Εισόδου/Εξόδου (I/O Controller):** Λειτουργεί ως διεπαφή για τη διαχείριση των σημάτων εισόδου/εξόδου από τα φυσικά συστήματα.
 - **Απλά Μηχανήματα:** Αντιπροσωπεύουν βασικά, αυτόνομα μηχανικά ή ηλεκτρικά συστήματα που συνδέονται με τον I/O Controller.
 - **Ρομποτικά Μηχανήματα:** Προηγμένα συστήματα με δυνατότητες αυτόνομης ή ημιαυτόνομης λειτουργίας τα οποία συνδέονται απευθείας με διεπαφές του ανώτερου επιπέδου.
- **Ψηφιακό Δίδυμο:** Ένα εικονικό αντίγραφο του πραγματικού περιβάλλοντος το οποίο αναπαριστά τη δομή και τη συμπεριφορά των πραγματικών μηχανών, συμπεριλαμβανομένων απλών και ρομποτικών μηχανών.

Το **επιχειρησιακό επίπεδο** διευκολύνει την επικοινωνία και τον έλεγχο μεταξύ των φυσικών και εικονικών συστημάτων. Υποστηρίζεται από δύο βασικές τεχνολογίες:

- **PLC (Programmable Logic Controller):** Παρέχουν δυνατότητες λογικής ελέγχου και διασύνδεσης για τα πραγματικά και ψηφιακά περιβάλλοντα, εξασφαλίζοντας συνοχή και συγχρονισμό. Για την επικοινωνία τους με τις συσκευές του **λειτουργικού επιπέδου** χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο **Modbus**.
- **ROS (Robot Operating System):** Διαχειρίζεται τα ρομποτικά μηχανήματα και εξασφαλίζει την ενσωμάτωσή τους τόσο με φυσικά όσο και με ψηφιακά συστήματα. Το ROS επιτρέπει πιο σύνθετες λειτουργίες, όπως η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και ο συντονισμός μεταξύ μηχανημάτων.

Στο ανώτερο επίπεδο, το σύστημα παρέχει υπηρεσίες σε εξωτερικές εφαρμογές ή χρήστες. Αυτό το επίπεδο λειτουργεί ως ενιαία διεπαφή για την πρόσβαση και τη διαχείριση των λειτουργικών και επιχειρησιακών επιπέδων. Η αρχιτεκτονική των επιμέρους υποσυστημάτων που το αποτελούν οργανώνεται σε δύο βασικά αρθρώματα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 42:

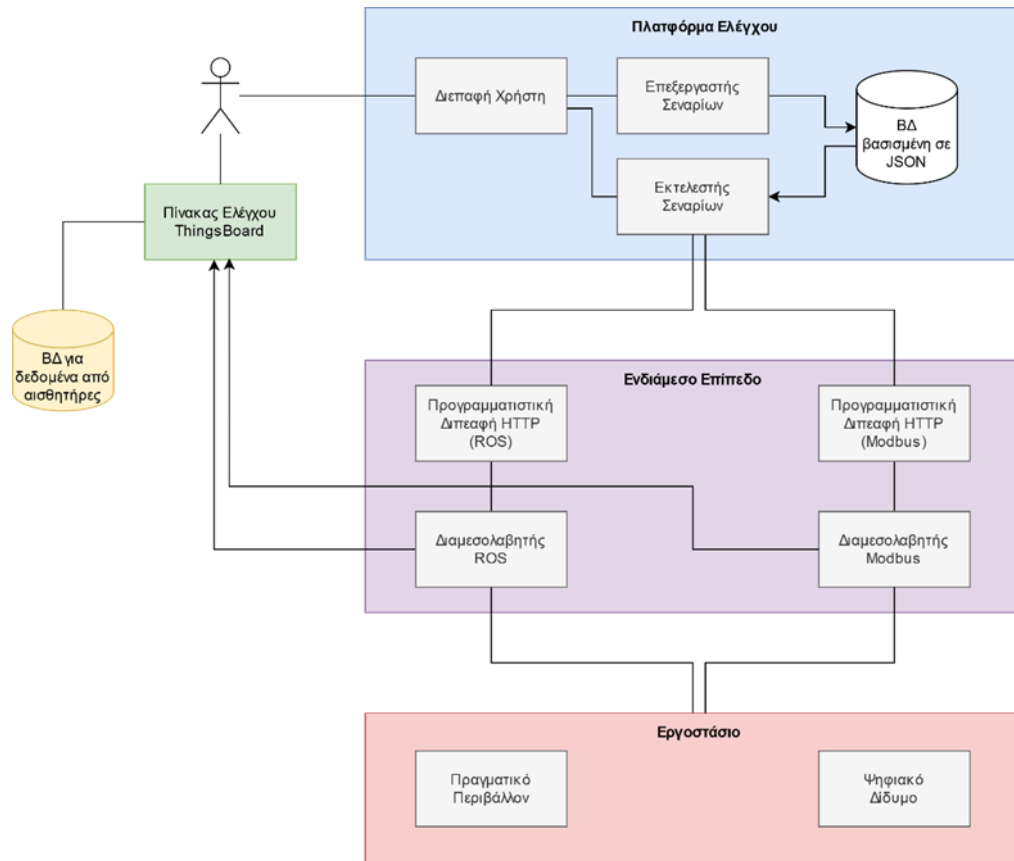
- **Πλατφόρμα Ελέγχου:** Ο κεντρικός κόμβος για τη δημιουργία, εκτέλεση και διαχείριση σεναρίων.
- **Middleware:** Ο ενδιάμεσος σύνδεσμος που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ της πλατφόρμας ελέγχου και των συστημάτων του εργοστασίου.

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

- **Διεπαφή Χρήστη:** Παρέχει το περιβάλλον αλληλεπίδρασης για τον χρήστη.
- **Επεξεργαστής Σεναρίων:** Επιτρέπει τη δημιουργία και διαμόρφωση σεναρίων για τις λειτουργίες του εργοστασίου.
- **Εκτελεστής Σεναρίων:** 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 middleware 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 τον ROS broker.
- **Προγραμματιστική Διεπαφή HTTP (Modbus):** Επιτρέπει τη διασύνδεση της πλατφόρμας με τον Modbus broker
- **Διαμεσολαβητής ROS:** Διαχειρίζεται την επικοινωνία και τον έλεγχο των φυσικών και 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 τον ROS broker για τις απλούστερες συσκευές του εργοστασίου που επικοινωνούν μέσω του πρωτοκόλλου Modbus.



Εικόνα 42: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης λύσης – Επίπεδο παρεχόμενων υπηρεσιών

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

- **Πίνακας Ελέγχου ThingsBoard:** Μια διεπαφή οπτικοποίησης όπου οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν τις λειτουργίες του εργοστασίου σε πραγματικό χρόνο.
- **Βάση Δεδομένων Αισθητήρων:** Συλλέγει και αποθηκεύει δεδομένα από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο πραγματικό περιβάλλον για ιστορική ανάλυση και λειτουργική αξιολόγηση.

2.5.β.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Στο λειτουργικό επίπεδο όπως απεικονίζει η Εικόνα 41, ανήκει το Πραγματικό Περιβάλλον και το Ψηφιακό Δίδυμο, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Το Ψηφιακό Δίδυμο αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη:

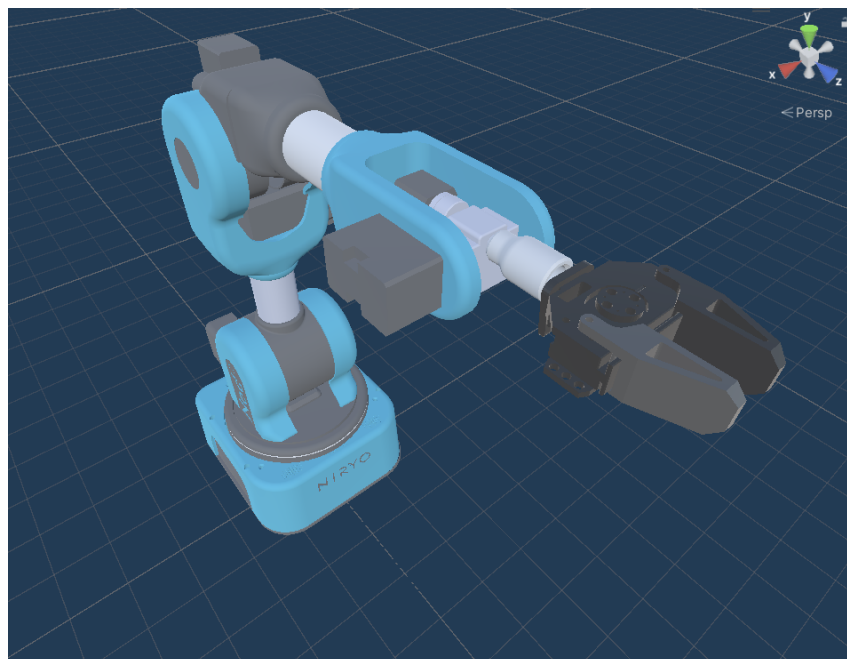
- Τη μηχανή βιντεοπαιχνιδιών Unity, η οποία παρέχει πληθώρα λειτουργιών σχετική με βιντεοπαιχνίδια, και επομένως με τρισδιάστατα περιβάλλοντα και μηχανές φυσικής (physics engines), που είναι οι δύο κύριες λειτουργίες για τις οποίες έγινε η επιλογή της εξ αρχής.
- Το δεύτερο κομμάτι του που είναι απαραίτητο 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 δοκιμασμένων 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 ενταχθεί ως κόμβος

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

(node) στο ROS, και έτσι να επιτευχθεί η επικοινωνία της με το Ned2 βραχίονα. 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. Στη παρούσα διάταξη χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ ενός Virtual PLC και των Ψηφιακών Fishertechnik 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 Robot Operating System (ROS), για τη μοντελοποίηση ρομπότ σε προσομιώσεις 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 προσομιώνει 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 έρχεται 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 διάφορα αρχεία.



Εικόνα 43: Το αποτέλεσμα της χρήσης του URDF Importer

Το Πραγματικό Δίδυμο (Physical Twin) αποτελείται από:

- Τα κύρια μηχανήματα: Τρία Fishertechnik Digital Factory I4.0 Μηχανήματα. Ένα milling & drilling index line station, ένα Punching Machine, και ένα Warehouse. Τα μηχανήματα παρέιχαν και τις ψηφιακές τους

αναπαραστάσεις, οι οποίες μεταφέρθηκαν στο Unity. Επίσης ο ρομποτικός βραχίονας, Ned2, από την εταιρία Niryo.

- Ένα Arduino της εταιρίας Industrial Shields, ώστε να λειτουργεί ως μικροελεγκτής για τα ρεύματα εισόδου/εξόδου στα Fishertechnik μηχανήματα.

Ο ρόλος του Operational Layer είναι να δέχεται τα I/Os (δεδομένα εισόδου και εξόδου) και να εμπεριέχει καθορισμένα προγράμματα τα οποία μπορούν να τα αξιοποιήσουν. Ύστερα να διαθέτει αυτά τα προγράμματα προς το πιο πάνω επίπεδο ως services, ώστε να μπορούν να κληθούν από τον χρήστη. Στο Operational Layer ανήκουν τα δύο OpenPLC, και οι λειτουργίες του ROS. Συγκεκριμένα συμπεριλαμβάνονται:

- Ένα Raspberry Pi το οποίο δρα ως το PLC του Πραγματικού Διδύμου. Είναι απευθείας συνδεδεμένο μέσω καλωδίου Ethernet με το Arduino, και του υπαγορεύει τη λογική λειτουργίας των εισόδων/εξόδων του, βάσει ενός προγράμματος που έχει εγκατεστημένο, του OpenPLC. Το OpenPLC επιτρέπει τη μεταφόρτωση και εκτέλεση ενός .st αρχείου το οποίο υπαγορεύει τη προαναφερθείσα λογική στο Arduino.
- Ένα OpenPLC το οποίο τρέχει στον ίδιο υπολογιστή που τρέχει και το Unity. Σκοπός του αποτελεί ο έλεγχος των ψηφιακών μηχανημάτων στο Ψηφιακό Δίδυμο.
- Το ROS. Το ROS μετέχει και στο Operational και στο Λειτουργικό επίπεδο. Στο Operational Layer είναι υπεύθυνο, όχι για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα αυτή τη φορά αλλά για την επικοινωνία και διάθεση services προς ένα εξωτερικό επίπεδο με το οποίο αλληλεπιδρά ο χρήστης.

Σε ό,τι αφορά στις υπηρεσίες που προσφέρονται στον τελικό χρήστη, η πλατφόρμα ελέγχου συνδέει πραγματικά συστήματα και τα εικονικά τους αντίγραφα (Digital Twins), επιτρέποντας τη δημιουργία, παρακολούθηση και εκτέλεση σεναρίων. Ο χρήστης αλληλεπιδρά 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 περιλαμβάνει τέσσερα επιμέρους βασικά στοιχεία:

- **Διεπαφή χρήστη:** λειτουργεί ως το μπροστινό τμήμα όπου οι χρήστες μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το σύστημα, να έχουν πρόσβαση στον επεξεργαστή σεναρίων και να παρακολουθούν την εκτέλεση. Η διεπαφή χρήστη έχει υλοποιηθεί σε Python με χρήση του microframework Flask και του συστήματος διαχείρισης προτύπων Jinja ενώ για το frontend της αξιοποιεί την συλλογή βιβλιοθηκών του Bootstrap.
- **Επεξεργαστής σεναρίων:** επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν και να προσαρμόζουν ροές εργασίας ή σενάρια, τα οποία αποθηκεύονται σε μορφή JSON στο σύστημα αποθήκευσης της πλατφόρμας.
- **Εκτελεστής σεναρίων:** Όταν τα σενάρια οριστούν εκτελούνται με τη βοήθεια αυτού του υποσυστήματος, το οποίο συντονίζει τις ενέργειες μεταξύ των διάφορων στοιχείων του συστήματος.
- **Βάση δεδομένων:** μια βάση δεδομένων βασισμένη σε έγγραφα JSON η οποία αποθηκεύει της απαραίτητες πληροφορίες τόσο για τα σενάρια εκτέλεσης αλλά και τις συσκευές και τις ρουτίνες που τα εκτελούν.

Η πλατφόρμα ελέγχου επικοινωνεί με τους φυσικούς και ψηφιακούς δίδυμους μέσω εξειδικευμένων brokers και APIs. Για τα φυσικά συστήματα, επικοινωνεί με τον broker ROS μέσω ενός HTTP API σχεδιασμένου για συσκευές βασισμένες σε ROS. Ο broker 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 πλατφόρμα συνδέεται μαζί τους μέσω ενός διαφορετικού HTTP API συμβατό με τον Modbus broker. Ο συγκεκριμένος broker έχει υλοποιηθεί επίσης σε γλώσσα Python με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης PyModbus ενώ και τα δύο APIs έχουν δημιουργηθεί με το Flask microframework.

Η αρχιτεκτονική εξασφαλίζει συνεχή ροή δεδομένων. Οι χρήστες ορίζουν σενάρια μέσω του πίνακα ελέγχου, ο οποίος προωθεί τις εισόδους στην πλατφόρμα ελέγχου για επεξεργασία. Ο εκτελεστής σεναρίων ανακτά

ρυθμίσεις από το JSON αποθηκευτικό σύστημα, εκτελεί ροές εργασίας και αλληλεπιδρά με τους brokers για την υλοποίηση ενεργειών στους δίδυμους. Τα δεδομένα και η ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο από τους φυσικούς και ψηφιακούς δίδυμους 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 σχεδιαστής 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 middleware Ditto που αποσκοπεί στην ευκολότερη παρακολούθηση συσκευών IoT 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 λειτουργικοτήτων για την εκτέλεση μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας.

```
{
  "id": "2",
```

```
"name": "Dummy",
"date_added": "2024-10-07",
"actions": [
  {
    "order": 1,
    "routine": "1",
    "wait": 1
  },
  {
    "order": 2,
    "routine": "5",
    "wait": 1
  }
]
```

2.5.β.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Η πιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος έγινε στο αντίγραφο-μικρογραφία μιας γραμμής παραγωγής που υπάρχει εγκατεστημένο στο Ινστιτούτο Βιομηχανικών Συστημάτων του ΑΘΗΝΑ. Η γραμμή παραγωγής αποτελείται από πραγματικά συστήματα ελέγχου (PLC, ρομποτικά συστήματα ελέγχου) όπως φαίνεται στην Εικόνα 44.



Εικόνα 44: Πειραματική διάταξη γραμμής παραγωγής και Ψηφιακού διδύμου

Για τις ανάγκες των δοκιμών, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

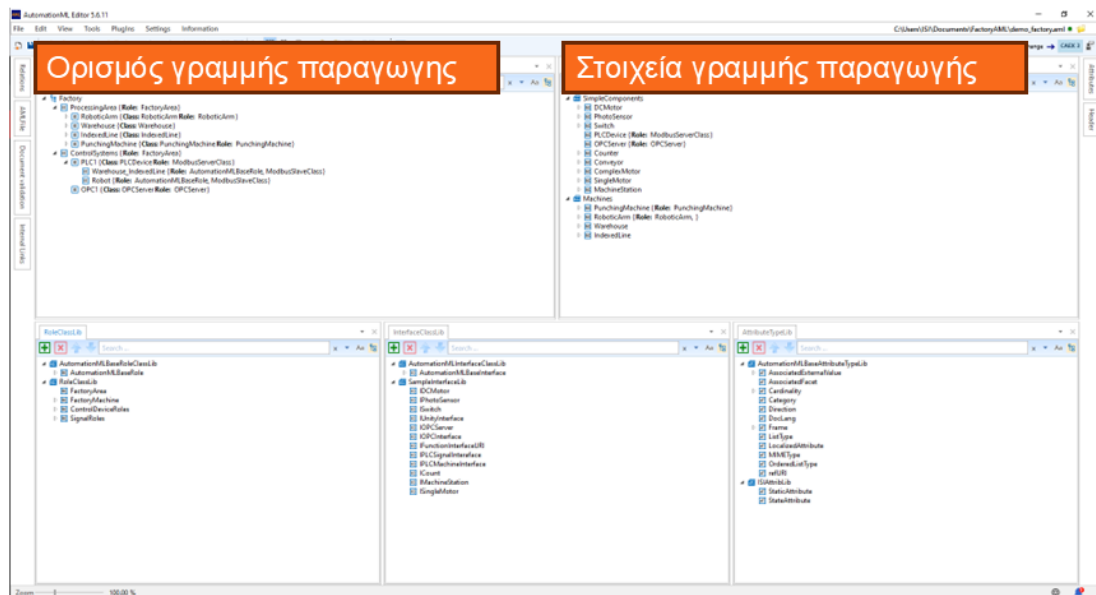
Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 45: Σενάριο εκτέλεσης Ψηφιακού Διδύμου

Ακολούθησαν τα εξής βήματα:

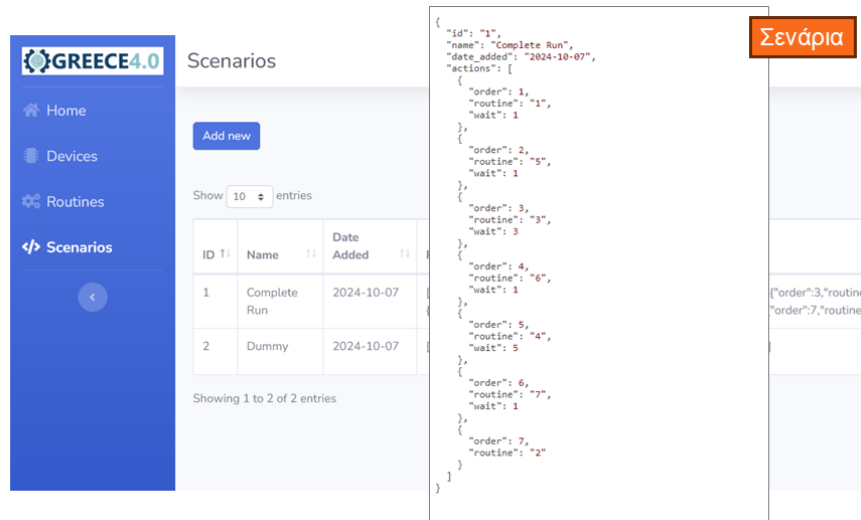
1. Μοντελοποίηση γραμμής παραγωγής με AutomationML



Εικόνα 46: Μοντελοποίηση γραμμής παραγωγής με AutomationML

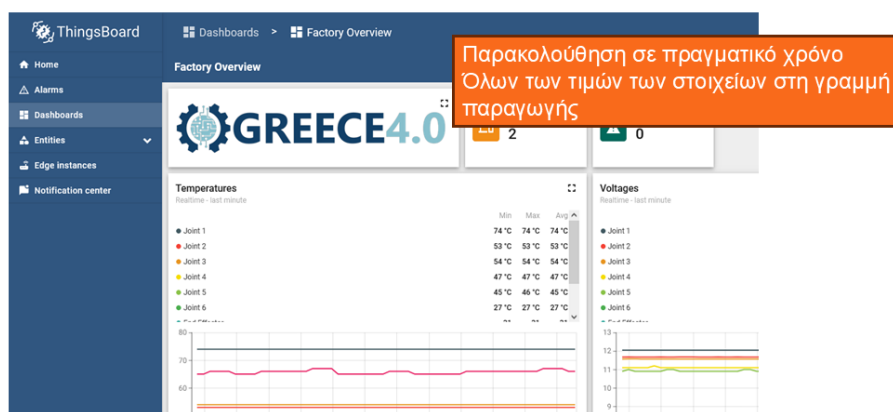
2. Ορισμός Σεναρίου σε json

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

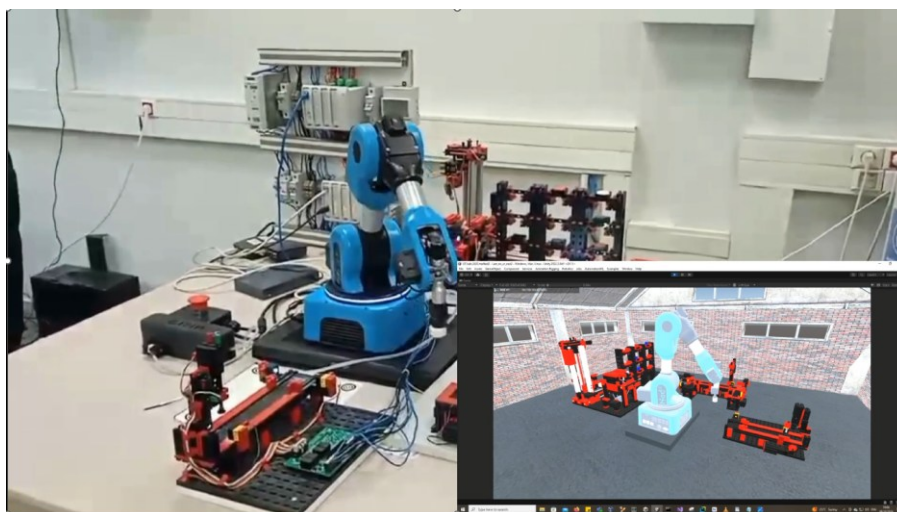


Εικόνα 47: Ορισμός Σεναρίου

3. Εκτέλεση και παρακολούθηση μέσω της τρισδιάστατης γραφικής διεπαφής και του Simulation Scenario Editor.



Εικόνα 48: Παρακολούθηση εκτέλεσης σεναρίου μέσω Simulation Scenario Editor



Εικόνα 49: Παρακολούθηση λειτουργίας της πραγματικής γραμμής παραγωγής μέσω του Ψηφιακού Διδύμου

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

2.6.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

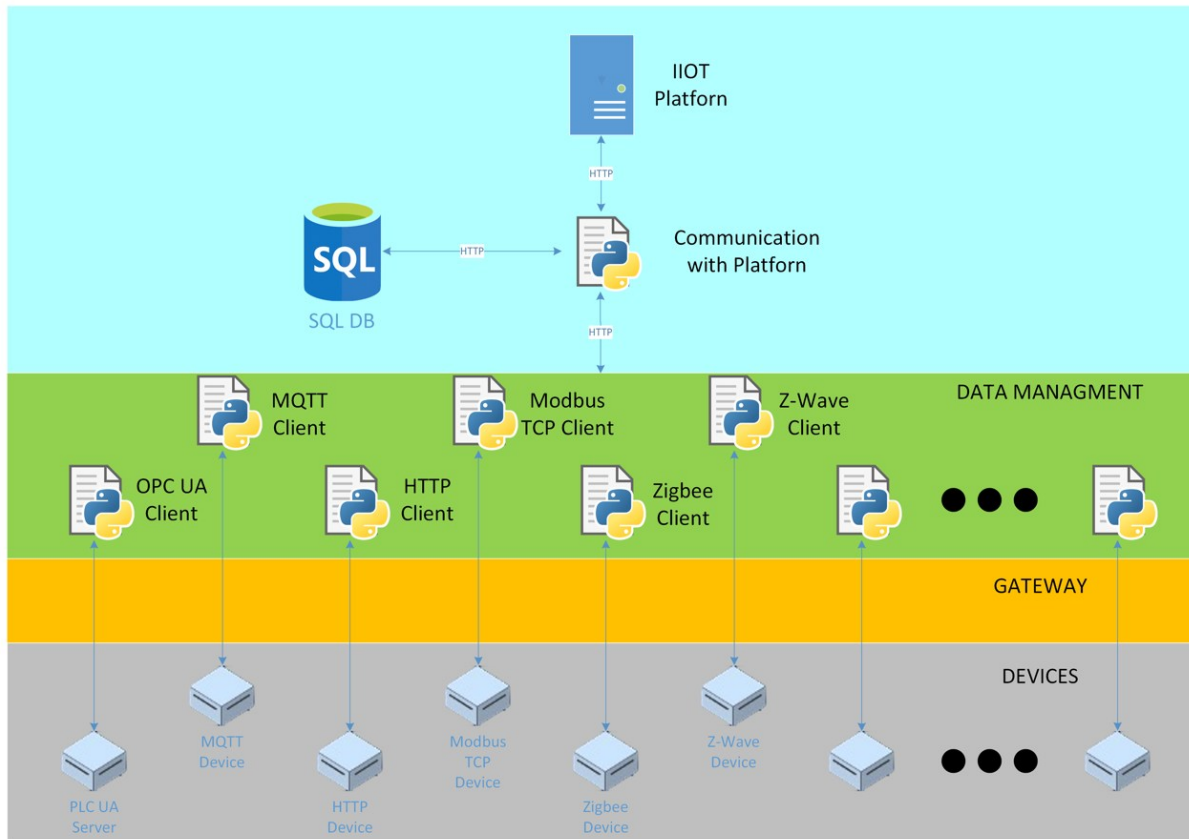
Τα δύο βασικά κομμάτια ανάπτυξης της λύσης είναι ο σχεδιασμός της πύλης συλλογής δεδομένων, η οποία συλλέγει τα δεδομένα με διάφορα πρωτοκόλλα, και η δημιουργία της IIoT πλατφόρμας, η οποία τα οπτικοποιεί και τα διαχειρίζεται. Εκτός από τις δύο βασικές εφαρμογές χρειάζεται η δημιουργία μίας SQL Database με σκοπό την περεταίρω αποθήκευση τους και η δημιουργία μοντέλων μηχανικής μάθησης για την εξαγωγή πληροφοριών από τα δεδομένα. Πιο αναλυτικά στο χρονοδιάγραμμα περιγράφονται τα παρακάτω στάδια:

- Ανάπτυξη προγραμμάτων για συλλογή δεδομένων: Σε αυτό το στάδιο γράφονται κώδικες οι οποίοι επιτρέπουν την επικοινωνία με τις συσκευές μέσω διαφορετικών πρωτοκόλλων (π.χ. MQTT, OPC UA). Έτσι διασφαλίζεται η ομαλή και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων προς την πύλη συλλογής.
- Σχεδιασμός πύλης συλλογής δεδομένων: Η λειτουργία της πύλης είναι αυτή του ενδιάμεσου σταθμού μεταξύ των συσκευών και της πλατφόρμας. Είναι σχεδιασμένη με στόχο να υποστηρίζει πολυπρωτόκολλη επικοινωνία, να επεξεργάζεται τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να διασφαλίζει την ακεραιότητά τους.
- Δημιουργία κεντρικής IIoT πλατφόρμας: Σχεδιάζεται και υλοποιείται μια πλατφόρμα βασισμένη σε τεχνολογίες cloud ή edge computing, η οποία προσφέρει δυνατότητες οπτικοποίησης, ανάλυσης και διαχείρισης των δεδομένων. Περιλαμβάνει dashboards, ειδοποιήσεις και εργαλεία ανάλυσης.
- Εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης: Σε αυτό το στάδιο αναπτύσσονται μοντέλα μηχανικής μάθησης, όπου χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που συλλέγονται για την εκπαίδευσή τους, με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης της αξιοπιστίας τους.
- Εκτέλεση δοκιμαστικών σεναρίων: Σε αυτό το στάδιο, μέσω σεναρίων προσομοίωσης και ρεαλιστικών εφαρμογών, δοκιμάζεται η λειτουργικότητα της λύσης προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση και η αξιοπιστία της.
- Βελτιστοποίηση τελικής λύσης: Σε αυτό το στάδιο, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών, γίνονται βελτιώσεις σε επίπεδο λογισμικού, απόδοσης και διεπαφής χρήστη. Στόχος είναι η επίτευξη μιας σταθερής, ασφαλούς και εύκολα επεκτάσιμης λύσης.

2.6.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Στην ενδιάμεση έκδοση της λύσης υλοποιούνται τα δύο βασικά της στοιχεία: Η IIoT πλατφόρμα και η πύλη συλλογής δεδομένων. Για τις δοκιμές συλλογής δεδομένων χρησιμοποιείτε βιομηχανικούς προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής ο οποίος στέλνει δεδομένα, μέσω διαφορετικών πρωτοκόλλων, στην πλατφόρμα. Ενδιάμεσα υλοποιούνται προγράμματα που συλλέγουν αυτά τα δεδομένα, από τα διάφορα πρωτόκολλα, και τα στέλνουν σε ένα κεντρικό πρόγραμμα το οποίο τα καταχωρεί στην πλατφόρμα.

Η πλατφόρμα υλοποιείται σε λειτουργικό Linux Server, και έχει την δυνατότητα να λειτουργεί και σε Virtual Machine. Στην πλατφόρμα δίνεται domain name και καταχωρείτε στους παγκοσμίους DNS έτσι ώστε να έχει δυνατότητα σύνδεσης από οπουδήποτε. Τα επιμέρους προγράμματα συλλογής δεδομένων δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στον ίδιο υπολογιστή με την πλατφόρμα και μπορούν να τρέχουν σε διαφορετικά συστήματα και να στέλνουν τα δεδομένα μέσω δικτύου.



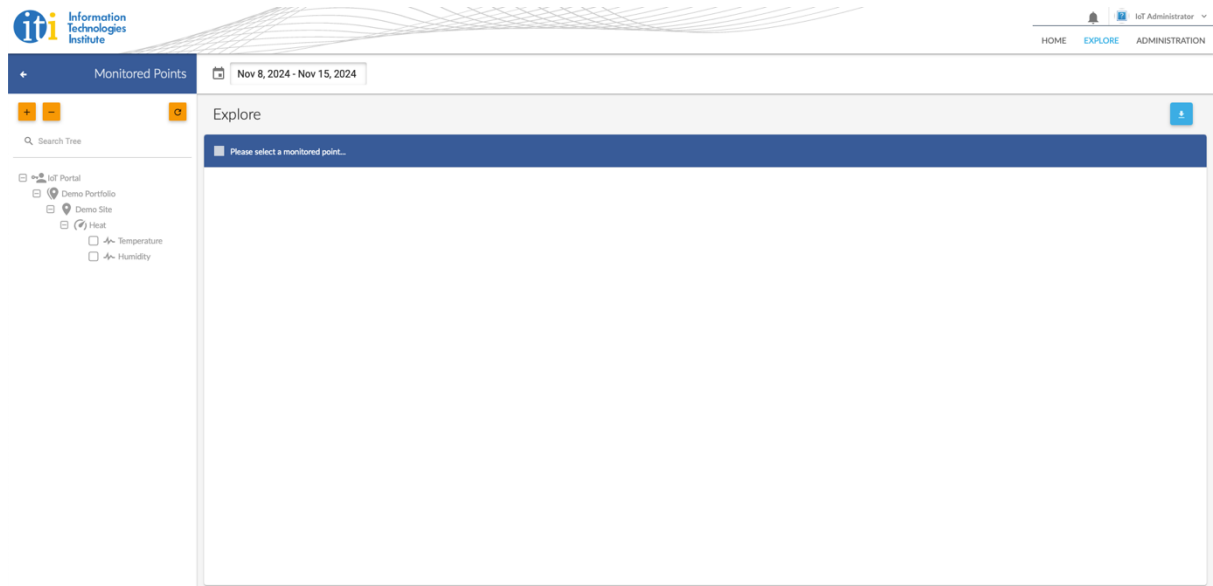
Εικόνα 50 – Αρχιτεκτονική Λύσης IIoT

2.6.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Η IIoT πλατφόρμα παρέχει ένα εργονομικό και φιλικό προς τον χρήστη πίνακα αλληλεπίδρασης, από τον οποίο μπορεί να εισάγει νέες συσκευές, να τις οργανώσει σε μορφή διακλάδωσης, να εποπτεύει την κατάσταση τους καθώς και δημιουργεί γραφήματα με της ιστορικές τιμές ανά περίοδο χρόνου. Συγκεκριμένα χαρακτηριστικά:

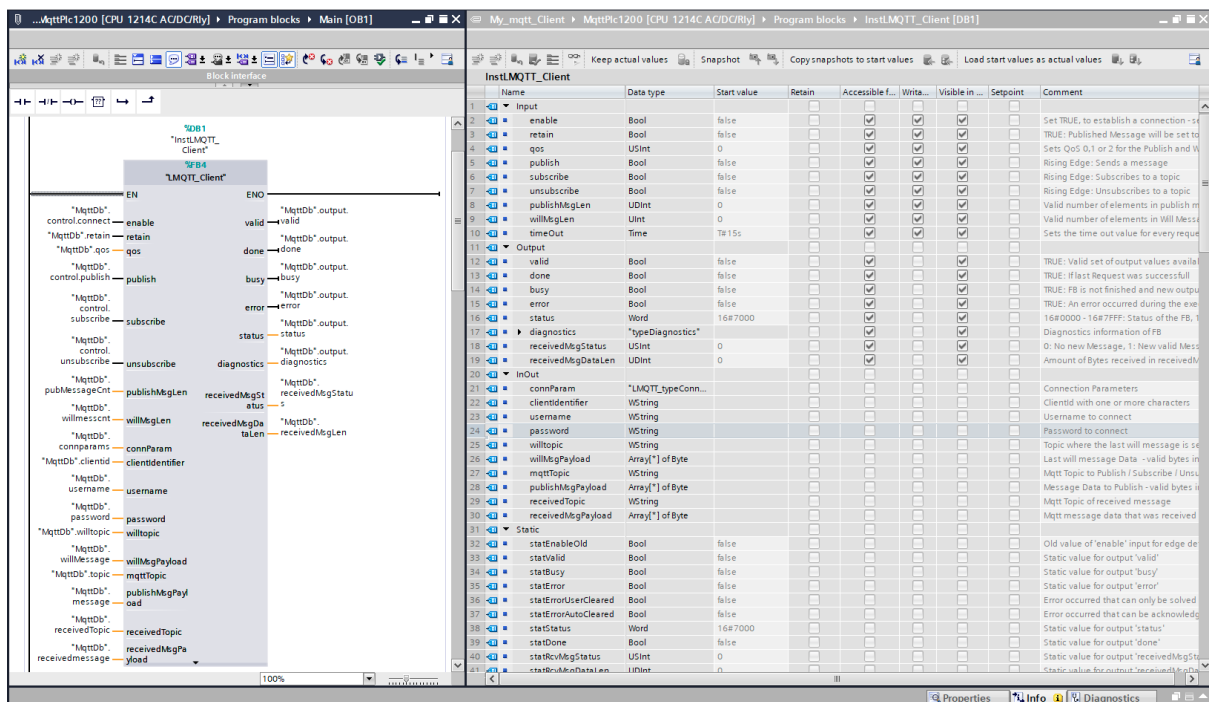
- Η πλατφόρμα έχει επίπεδα πρόσβασης ανά χρήστη, όπου έχουν διαφορετικά δικαιώματα και πρόσβαση σε διαφορετικές εφαρμογές τις. Ένας απλός χρήστης π.χ. μπορεί μόνο να δει τις τιμές από τους αισθητήρες και τις κατηγορίες που του έχουν επιτρέψει. Ένας χρήστης με δικαιώματα διαχειριστή μπορεί να δημιουργήσει νέους χρήστης και να διαχειριστεί τα δικαιώματα τους.
- Η IIoT πλατφόρμα υποστηρίζει διαλειτουργικότητα μέσω ενσωμάτωσης με δημοφιλή πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το MQTT, το OPC UA και το Modbus, επιτρέποντας την ευέλικτη σύνδεση με ποικίλες βιομηχανικές συσκευές και αισθητήρες. Παρέχει επίσης υποστήριξη για APIs που διευκολύνουν την ενσωμάτωση με εξωτερικά πληροφοριακά συστήματα, όπως ERP ή MES.
- Ο σχεδιασμός της πλατφόρμας βασίζεται σε αρχιτεκτονική μικροϋπηρεσιών, διασφαλίζοντας υψηλή επεκτασιμότητα και ανθεκτικότητα. Κάθε λειτουργία υλοποιείται ως ανεξάρτητη υπηρεσία, γεγονός που επιτρέπει τη συνεχή αναβάθμιση και συντήρηση χωρίς να επηρεάζεται η συνολική λειτουργία.
- Η βάση δεδομένων της πλατφόρμας είναι σχεδιασμένη να χειρίζεται μεγάλους όγκους δεδομένων (big data) με υποστήριξη για καταναμημένα συστήματα αποθήκευσης, διασφαλίζοντας την ταχύτητα ανάκτησης και την ασφάλεια των δεδομένων.
- Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων σε διάφορες μορφές (π.χ. CSV, JSON) για χρήση σε εξωτερικές εφαρμογές, ενώ υποστηρίζει εργαλεία για δημιουργία αναφορών (reports) που προσαρμόζονται στις ανάγκες του χρήστη.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



- *Εικόνα 51 – Περιβάλλον Χρήστη Πλατφόρμας IIoT (Dashboard)*

2.6.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα



Εικόνα 52 – Εργαλείο Αποστολής Δεδομένων με MQTT στο PLC

Ένα παράδειγμα χρήσης που υλοποιήθηκε είναι η αποστολή δεδομένων στην πλατφόρμα μέσω βιομηχανικού προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC). Στην Εικόνα 52 φαίνεται το προς παράδειγμα πρόγραμμα το οποίο αποστέλλει τα δεδομένα μέσω του πρωτοκόλλου MQTT.

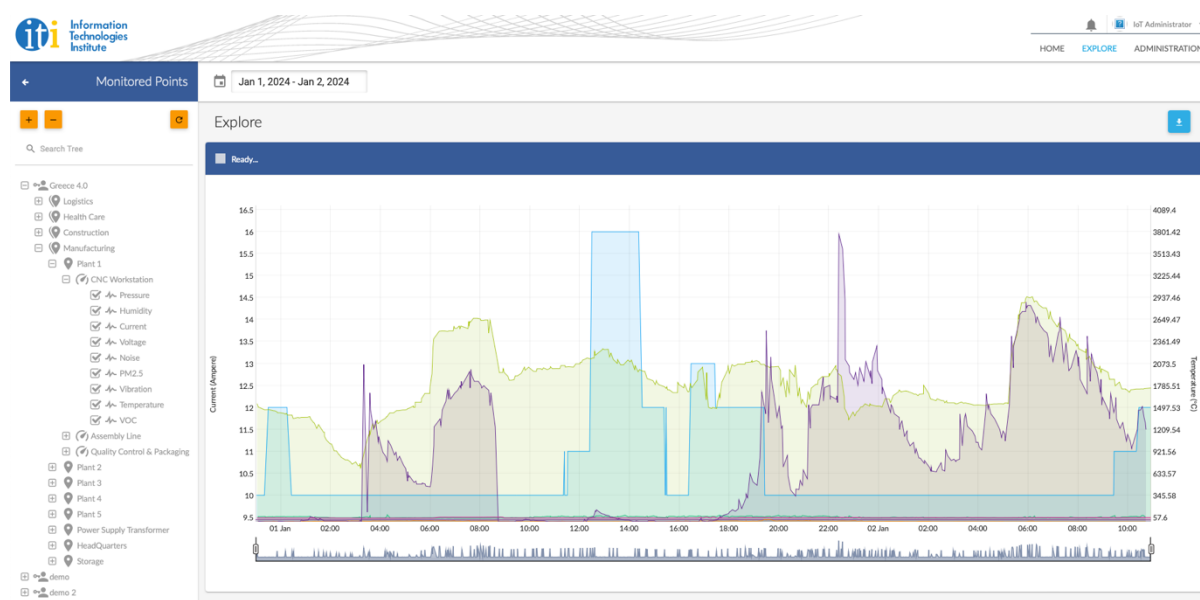
Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής συλλέγει τα δεδομένα από αισθητήρες, μέσω φυσικών ψηφιακών ή αναλογικών εισόδων, και τα καταχωρεί σε εσωτερικές μνήμες. Έπειτα, με την χρήση ρουτινών (function blocks)

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

που αναπτύχθηκαν, επεξεργάζεται αυτά τα δεδομένα προκειμένου να προκύψουν οι πραγματικές τιμές. Τις τιμές αυτές τις καταχωρεί εκ νέου σε μια εσωτερική βάση δεδομένων (data block). Το εργαλείο LMQTT Client λαμβάνει ως είσοδο την εσωτερική βάση δεδομένων, τη διεύθυνση της πλατφόρμας, τα διαπιστευτήρια εισόδου και τις εντολές ελέγχου προκειμένου να τα δημοσιεύει, ανά έναν προκαθορισμένο χρόνο, στην πλατφόρμα. Ως έξοδο μας επιστρέφει την κατάσταση λειτουργίας και διαγνωστικά στοιχεία. Στο παράδειγμα χρήσης που υλοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκαν σύνολα δεδομένων (datasets) από την βιομηχανία και προσομοιώθηκαν ως εισόδοι στον ελεγκτή. Συγκεκριμένα λάμβανε τις παρακάτω τιμές:

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

Τα αποτελέσματα απεικόνισης των παραπάνω από την Πλατφόρμα παρουσιάζονται στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53 – Δεδομένα στο Dashboard IIoT Πλατφόρμας

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί ο χρήστης έχει την δυνατότητα να οπτικοποιεί τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ανά περίοδο χρόνου σε γραφήματα. Μπορούν να απεικονιστούν τιμές από πολλαπλές εισόδους στο ίδιο γράφημα.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρήσης έχει δημιουργηθεί η δομή (portfolio) Greece 4.0, το οποίο περιλαμβάνει τις εξής τοποθεσίες (sites):

- Logistics
- Healthcare
- Construction
- Manufacturing

Η τοποθεσία Manufacturing περιλαμβάνει τις υπο-τοποθεσίες:

- CNC Workstation
- Assembly Line
- Quality Control & Packaging

Και στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο παρουσιάζονται οι τιμές των αισθητήρων του CNC Workstation για ένα διάστημα 10 ωρών.

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

2.7.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

Η συγκεκριμένη λύση αποτελείται από τρία υποσυστήματα, τα δύο αφορούν εφαρμογές ενώ το τρίτο είναι η υποδομή IoT με την οποία ανταλλάσσουν πληροφορίες οι εφαρμογές. Τα βήματα ανάπτυξης είναι τα παρακάτω:

- Δημιουργία βασικού συστήματος Industrial IoT
- Δημιουργία εφαρμογής XR-Viewer
- Διασύνδεση IoT με την εφαρμογή XR-Viewer
- Δημιουργία νέων βάσεων δεδομένων για την αποθήκευση αρχείων και πληροφοριών
- Δημιουργία εφαρμογής XR-Creator
- Εφαρμογή προτύπων ψηφιακού διδύμου
- Εκτέλεση δοκιμαστικών σεναρίων
- Βελτιστοποίηση τελικής λύσης

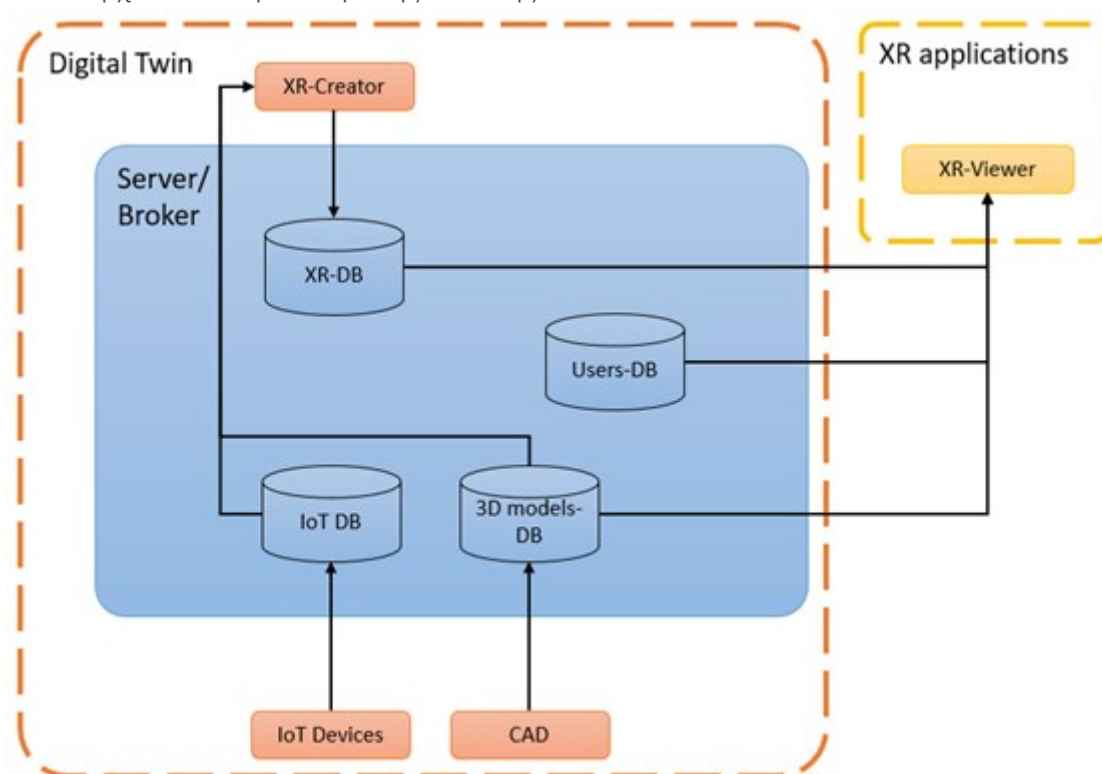
Τα δύο βασικά κομμάτια ανάπτυξης της λύσης είναι η εφαρμογή XR-Creator, η οποία επιτρέπει την δημιουργία εικονικών σεναρίων, και η εφαρμογή XR-Viewer η οποία αναπαράγει τα εν λόγω σεναρία σε συσκευές επαυξημένης πραγματικότητας. Εκτός από τις δύο βασικές εφαρμογές χρειάζεται η δημιουργία μίας πρότυπης 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 σενάρια 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 σενάρια, 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.
- Βελτιστοποίηση τελικής λύσης: Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμαστικών σεναρίων θα γίνει η τελική βελτιστοποίηση του συστήματος η οποία θα διορθώνει ελαττώματα που αναγνωρίστηκαν.

2.7.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης



Εικόνα 54: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης λύσης

Στην ενδιάμεση έκδοση του συστήματος θα υλοποιηθούν τα δύο κύρια στοιχεία, XR-Creator και XR-Viewer, καθώς και οι απαραίτητες βάσεις για την αποθήκευση των δεδομένων. Επίσης θα υπάρχει η διασύνδεση με δεδομένα IIoT. Η υλοποίηση των βασικών συστημάτων θα γίνουν με το Unity το οποίο είναι μια δημοφιλής πλατφόρμα ανάπτυξης παιχνιδιών και εφαρμογών, η οποία επιτρέπει στους προγραμματιστές να δημιουργούν διαδραστικό περιεχόμενο για διάφορες πλατφόρμες, όπως εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας. Για την ανάπτυξη της εφαρμογής χρειάζονται και δύο software development kits (SDKs) το OpenXR και το AR Core. Το OpenXR είναι ένα ανοιχτό πρότυπο που αναπτύχθηκε από το Khronos Group, με στόχο την ενοποίηση της ανάπτυξης εφαρμογών επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας. Προσφέρει ένα κοινό API που επιτρέπει στις εφαρμογές να λειτουργούν με διάφορες συσκευές AR και VR χωρίς να απαιτείται ξεχωριστή προσαρμογή για κάθε πλατφόρμα. Αντίστοιχα, το ARCore είναι η πλατφόρμα της Google για την ανάπτυξη εμπειριών

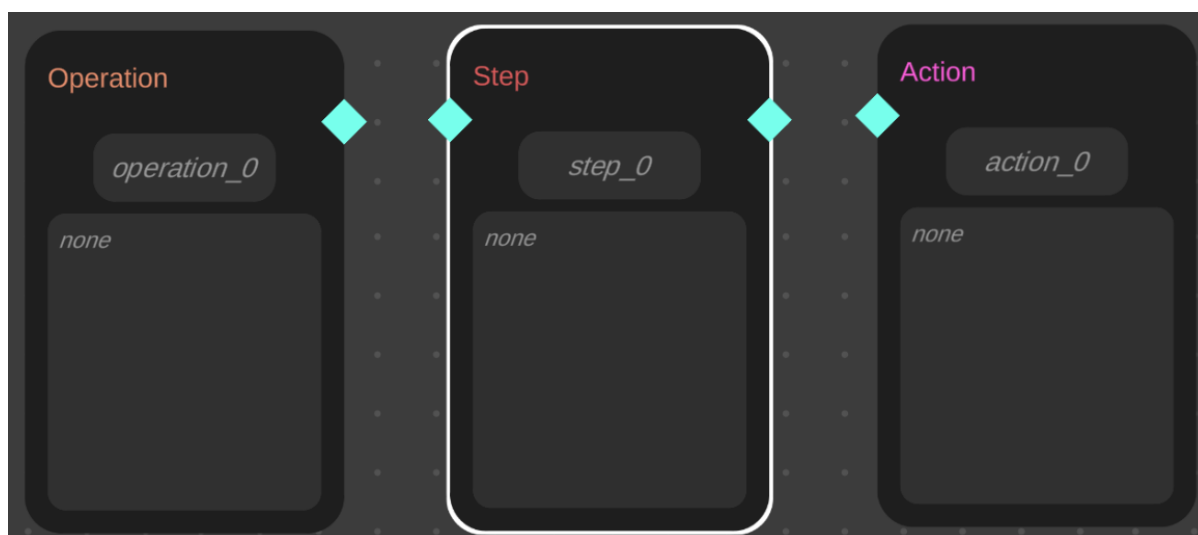
επαυξημένης πραγματικότητας σε συσκευές Android. Παρέχει εργαλεία και APIs για την ανίχνευση επιπέδων, την εκτίμηση φωτισμού και την τοποθέτηση εικονικών αντικειμένων στον πραγματικό κόσμο, επιτρέποντας τη δημιουργία πλούσιων και διαδραστικών AR εφαρμογών.

2.7.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.7.3.1 XR-Creator

Η εφαρμογή XR-Creator παρέχει μία εύχρηστη διεπαφή χρήστη για την δημιουργία των σεναρίων εκπαίδευσης. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει nodes τα οποία αντιπροσωπεύουν τα στάδια του σεναρίου. Πιο συγκεκριμένα τα nodes χωρίζονται σε 3 κατηγορίες.

- **Εργασίες-δραστηριότητες:** Πρόκειται για μία γενική περιγραφή μίας διαδικασίας. Κάθε σενάριο μπορεί να έχει πολλαπλές δραστηριότητες οι οποίες αφορούν το σενάριο εκπαίδευσης, χωρίς αυτές να έχουν άμεση σχέση.
- **Βήματα:** Πρόκειται για την περιγραφή ενός βήματος που πρέπει να ακολουθηθεί για να ολοκληρωθεί μία διαδικασία. Κάθε δραστηριότητα μπορεί να έχει πολλά βήματα καθώς επίσης οι δραστηριότητα μπορούν να έχουν κοινά βήματα.
- **Ενέργειες:** Πρόκειται για συγκεκριμένες ενέργειες που πρέπει να γίνουν σε ένα ή περισσότερα βήματα. Οι ενέργειες είναι ο πυρήνας του κάθε σεναρίου καθώς στις ενέργειες μπορεί να ενσωματωθεί το οπτικοακουστικό υλικό.

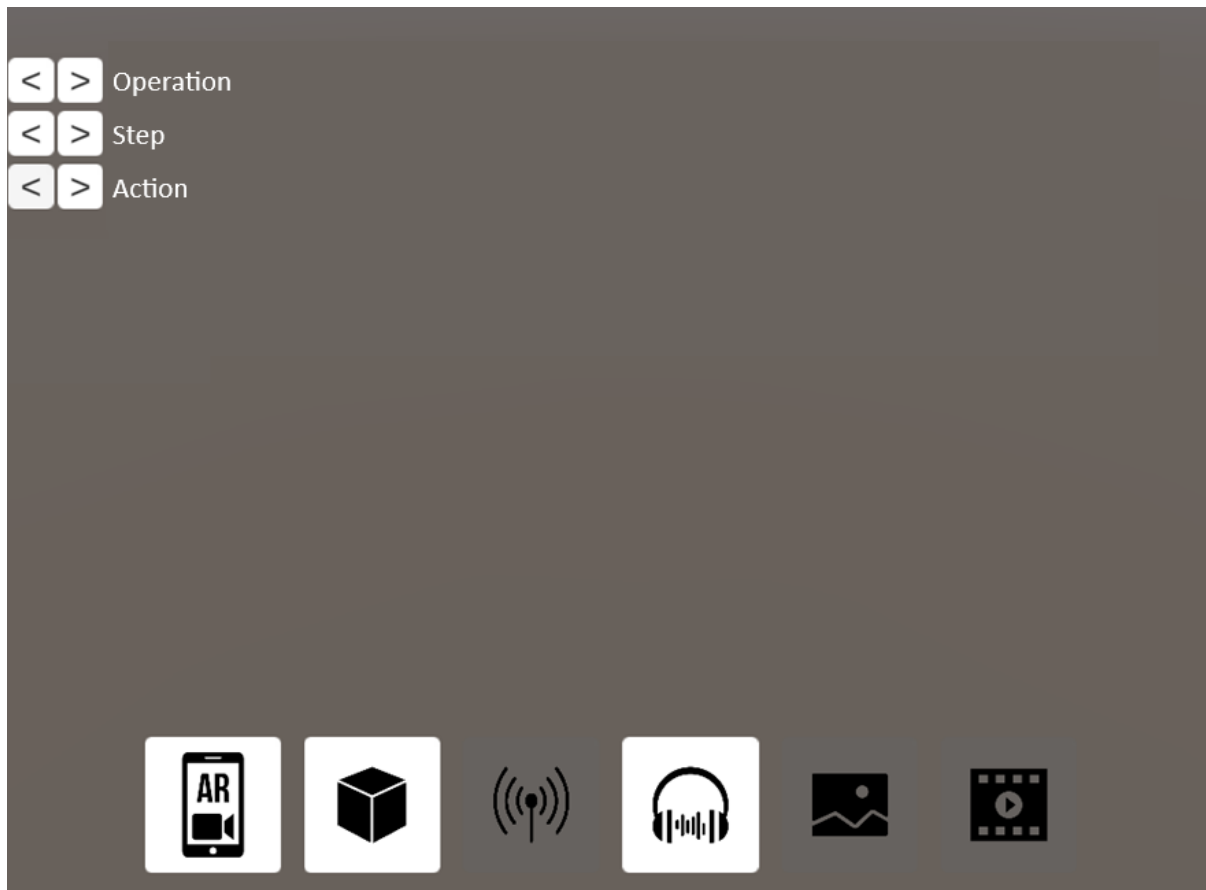


Εικόνα 55: XR Creator Nodes

Ο χρήστης θα πρέπει να περιγράψει το σενάριο εκπαίδευσης με την χρήση των nodes, δημιουργώντας ένα «δέντρο». Μέσα από το περιβάλλον της εφαρμογής μπορεί εύκολα να περάσει τις απαραίτητες πληροφορίες για τον εκπαιδευόμενο όπως το όνομα και την περιγραφή της εργασίας/βήματος/ενέργειας. Τέλος μπορεί εύκολα να συνδέσει το απαραίτητο οπτικοακουστικό υλικό στις ενέργειες που επιθυμεί.

2.7.3.2 XR-Viewer

Η εφαρμογή XR-Viewer καταναλώνει τα σεναρία που δημιουργούνται μέσω του XR-Creator. Ο χρήστης πρέπει πρώτα να επιλέξει το σενάριο που θέλει να δει και στην συνέχεια θα μπορεί να δει τις εργασίες, τα βήματα και τις ενέργειες του σεναρίου. Η εφαρμογή μπορεί να προβάλει το οπτικοακουστικό υλικό όπως έγγραφα κειμένου, εικόνες και βίντεο ενώ σε περιπτώσεις που υπάρχουν τρισδιάστατα μοντέλα, μπορεί να τα προβάλει μέσω της επαυξημένης πραγματικότητας, δίνοντας στον χρήστη μία διαδραστική και ολοκληρωμένη εμπειρία. Η χρήση της εφαρμογής είναι όσο το δυνατόν πιο απλή γίνεται με σκοπό την διευκόλυνση του χρήστη.

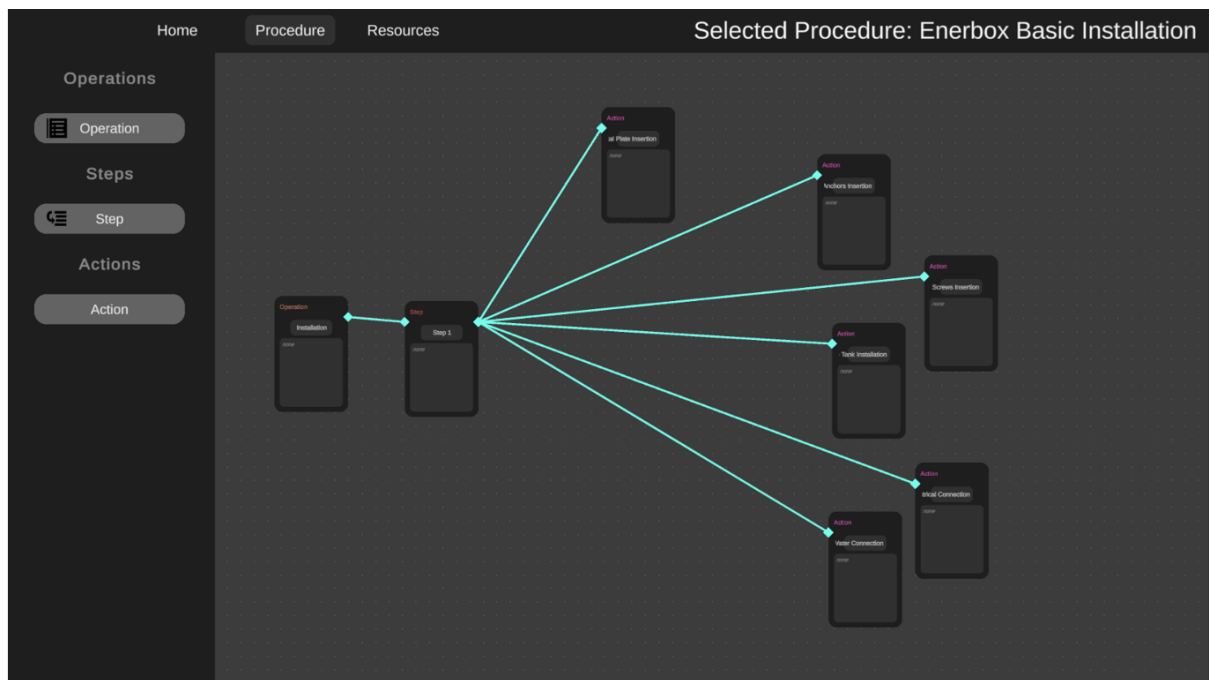


Εικόνα 56: Εφαρμογή XR-Viewer

2.7.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

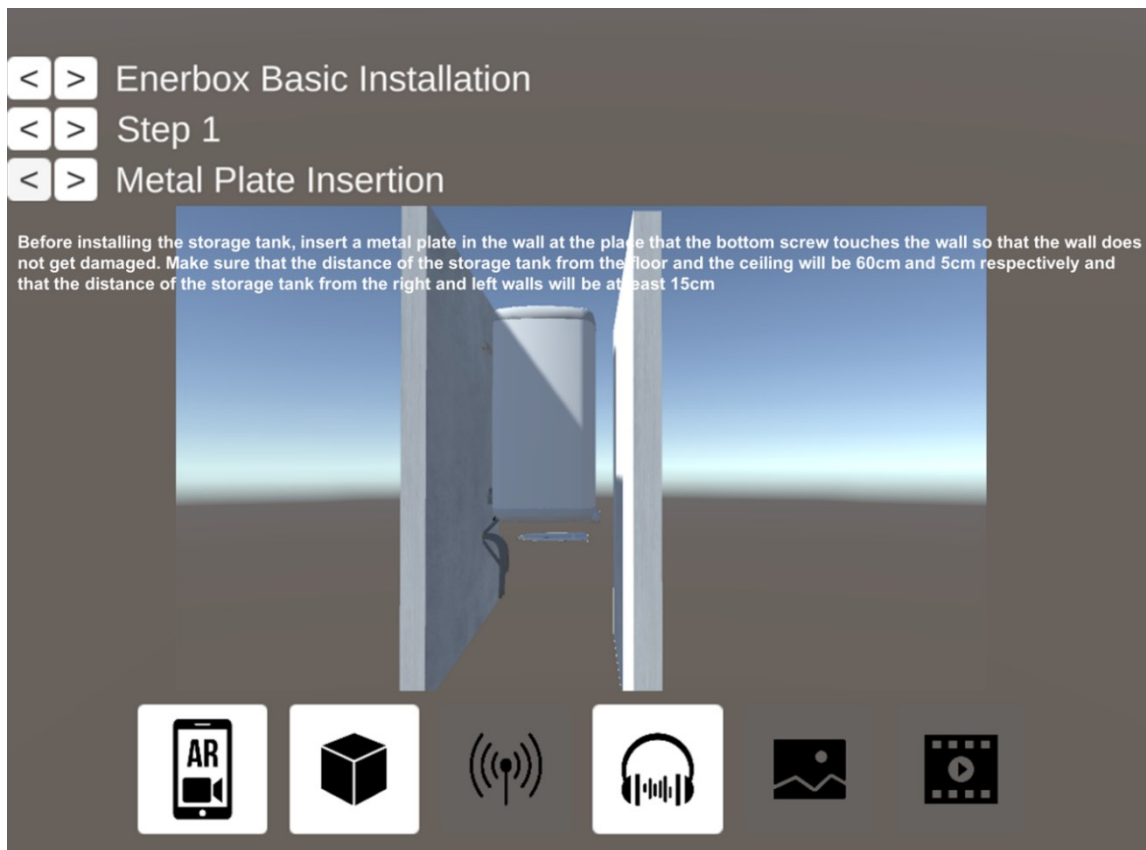
Και οι δύο εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα δοκιμαστικό σενάριο εκπαίδευσης. Το σενάριο αφορά την εγκατάσταση θερμοσίφωνα. Όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, το σενάριο περιεγράφηκε στην εφαρμογή XR-Creator. Για το συγκεκριμένο σενάριο χρειάστηκε ένα node εργασίας, ένα βήμα και έξι ενέργειες. Πιο συγκεκριμένα, οι ενέργειες που χρειάζονται είναι οι εξής:

1. Εισαγωγή της ειδικής μεταλλικής πλάκας στον τοίχο
2. Τοποθέτηση των ούπα στο ύψος όπου θα κρεμαστεί η δεξαμενή αποθήκευσης, είτε στις εξωτερικές θέσεις (45 cm) είτε στις εσωτερικές θέσεις (35 cm).
3. Τοποθέτηση των βιδών ανάρτησης μέσα στα ούπα.
4. Κρέμασμα της δεξαμενής αποθήκευσης στις βίδες και ρύθμιση της βίδα στο κέντρο της κάτω περιοχής (όπου τοποθετήθηκε η μεταλλική πλάκα στο βήμα 1), ώστε η δεξαμενή να μην γέρνει.
5. Σύνδεση των καλωδίων.
6. Σύνδεση των σωληνώσεων.



Εικόνα 57: Αναπαράσταση του σεναρίου στην εφαρμογή XR-Creator

Στην Εικόνα 58 φαίνεται το εν λόγω σενάριο στην εφαρμογή XR-Viewer όπου ο χρήστης μπορεί να δει τα βήματα και το οπτικοακουστικό υλικό. Πιο συγκεκριμένα, τα περισσότερα βήματα συνοδεύονται από εικόνες και τρισδιάστατα μοντέλα, τα οποία περιέχουν και animations για την περαιτέρω βοήθεια προς τον χρήστη.



Εικόνα 58: Το σενάριο χρήσης στην εφαρμογή XR-Viewer

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

2.8.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

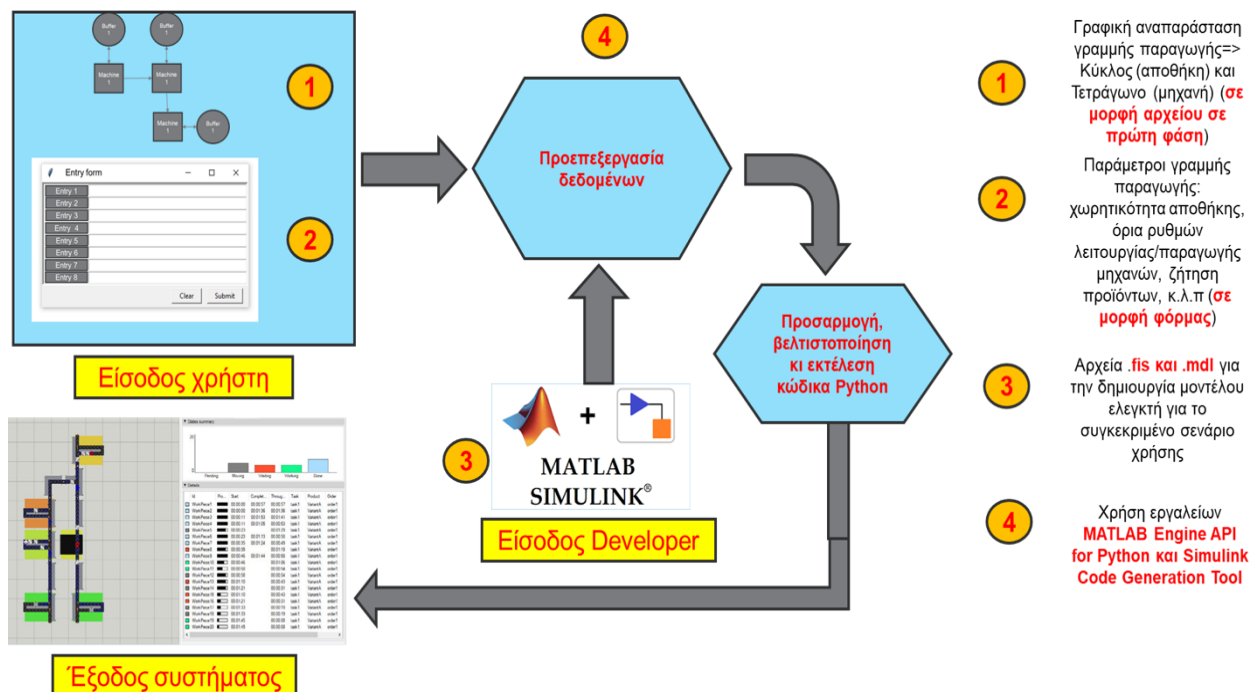
Η παρούσα τεχνολογική λύση εστιάζει στην ανάπτυξη εργαλείων λογισμικού με στόχο την αυτοματοποιημένη και ταχεία επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής και δυναμικής διαχείρισης προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής, λαμβάνοντας ανατροφοδότηση σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο και αναδιατάσσοντας κατάλληλα τις ροές παραγωγής. Όπως περιεγράφηκε αναλυτικά στο Παραδοτέο 1.2, η βασική ιδέα της λύσης είναι η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου και πολύπλευρου συστήματος ανάλυσης ετερογενών δεδομένων και παροχής κρίσιμης πληροφορίας για τη λήψη αποφάσεων, με δυνατότητα προσαρμογής σε περιβάλλοντα παραγωγής και διανομής προϊόντων οποιασδήποτε μορφολογίας. Κύρια χαρακτηριστικά της εργαλειοθήκης αποτελούν η απλότητα στην χρήση, η υψηλή ταχύτητα απόκρισης ακόμα και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες κι απρόβλεπτες αλλαγές, η ποικιλία παραμέτρων που μπορούν να εξεταστούν στο εκάστοτε σενάριο εφαρμογής, καθώς και η ευελιξία προσαρμογής της σε σχεδόν κάθε αρχιτεκτονική δικτύου παραγωγής κάνοντας χρήση 3 βασικών δομικών μονάδων (modules) για την χαρτογράφηση του δικτύου: γραμμή παραγωγής/διανομής, συναρμολόγηση/κόμβος συγκέντρωσης και αποσυναρμολόγηση/κόμβος διανομής.

Η υλοποίηση αποτελείται από αρκετά στάδια, καθώς χρειάζεται να συνδυαστούν ποικίλα εργαλεία-υποσυστήματα ώστε να μοντελοποιηθεί πλήρως το δίκτυο παραγωγής και η διαδικασία δρομολόγησης ενός προϊόντος από την φάση της έναρξης επεξεργασίας της πρώτης ύλης μέχρι την μεταμόρφωσή της σε τελικό/εξαγωγίμο παράγωγο. Ο προγραμματισμός των βασικών εργασιών/σταδίων υλοποίησης περιλαμβάνει συνοπτικά τις παρακάτω φάσεις/διαδικασίες:

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση στάθμης γνώσεων, κατά την οποία λαμβάνει χώρα η λεπτομερής καταγραφή υφιστάμενων λύσεων, τεχνολογιών, ερευνητικών εργασιών που σχετίζονται με τον προγραμματισμό ευέλικτης κι ανθεκτικής παραγωγής
- Εγκατάσταση και διαμόρφωση προγραμματιστικού περιβάλλοντος για ανάπτυξη εφαρμογών στα πλαίσια της λύσης, εστιάζοντας στην χρήση σύγχρονων, ευέλικτων και συμβατών εργαλείων
- Σχεδιασμός αρχιτεκτονικής επεξεργασίας κι ανάλυσης δεδομένων κύκλου παραγωγής με χρήση ελεγκτών ασαφούς λογικής, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διακριτά στάδια της διαδικασίας, πιθανές παραμέτρους ενδιαφέροντος αλλά, κυρίως, πολλαπλές τοπολογίες δικτύων παραγωγής και χρήσης σε βιομηχανικές συνθήκες
- Ανάπτυξη εργαλείων λογισμικού για επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής, διαδικασία που αποτελεί τον κύριο στόχο της ΕΕ2 για την συγκεκριμένη τεχνολογική λύση
- Καθορισμός βασικών παραμέτρων για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση δικτύων παραγωγής μέσω γραφικού περιβάλλοντος, προκειμένου να είναι κατά το δυνατόν ευκολότερη και πληρέστερη η αποτύπωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου σε μια μορφή «κατανοητή» και «μεταφράσιμη» από το προγραμματιστικό περιβάλλον προς τον τελικό χρήστη κι αντίστροφα
- Έλεγχος και αξιολόγηση μοντέλων μέσω προσομοίωσης σεναρίων χρήσης και διαφορετικών τύπων δικτύων παραγωγής, θέτοντας τις βάσεις για την μετάβαση από το «εργαστήριο» στην πράξη
- Προσαρμογή λύσης για λειτουργία σε πλήρως βιομηχανικές συνθήκες, αντικαθιστώντας τα μοντέλα αρχικοποίησης κι εναλλαγής των τιμών των παραμέτρων παραγωγής με πραγματικές τιμές που λαμβάνονται σε πραγματικά περιβάλλοντα χρήσης
- Βελτιστοποίηση υλοποίησης και εξαγωγή της ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα χωρίς εξαρτήσεις από εφαρμογές τρίτων, με στόχευση το εξαγώμενο λογισμικό να είναι σε μορφή εκτελέσιμου αρχείου που θα επιτρέπει την φορητότητα και χρήση του σε διαφορετικά (υπολογιστικά) συστήματα

2.8.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Με βάση την καταγραφή της βασικής ιδέας στο Παραδοτέο 1.2, την αξιοποίηση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και την καταγραφή πληροφορίας/δεδομένων/εργαλείων κατά τους πρώτους μήνες υλοποίησης της ΕΕ2 εξειδικεύτηκαν τα κύρια τμήματα εκτέλεσης/ανάπτυξης καθώς και οι τεχνικές απαιτήσεις και λεπτομέρειες αυτών. Η αρχιτεκτονική της ενδιάμεσης έκδοσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 59.



Εικόνα 59: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης για την εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής

2.8.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Το πρώτο τμήμα της υλοποιούμενης αρχιτεκτονικής περιλαμβάνει την συγκέντρωση της απαιτούμενης πληροφορίας από τον τελικό χρήστη, διαδικασία που θα «αρχικοποιήσει» το σύστημα επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων παραγωγής. Η είσοδος του χρήστη περιλαμβάνει τον σχεδιασμό της τοπολογίας του δικτύου παραγωγής στην βιομηχανική μονάδα, καθώς και τις τιμές βασικών παραμέτρων όπως ο αριθμός των μηχανών κι αποθηκών, τα χαρακτηριστικά/προδιαγραφές αυτών (ρυθμός παραγωγής κι αξιοπιστία, χωρητικότητα αντίστοιχα), τα είδη των παραγόμενων προϊόντων, οι ενδιάμεσοι σταθμοί-κόμβοι διασύνδεσης, η ζήτηση των προϊόντων.

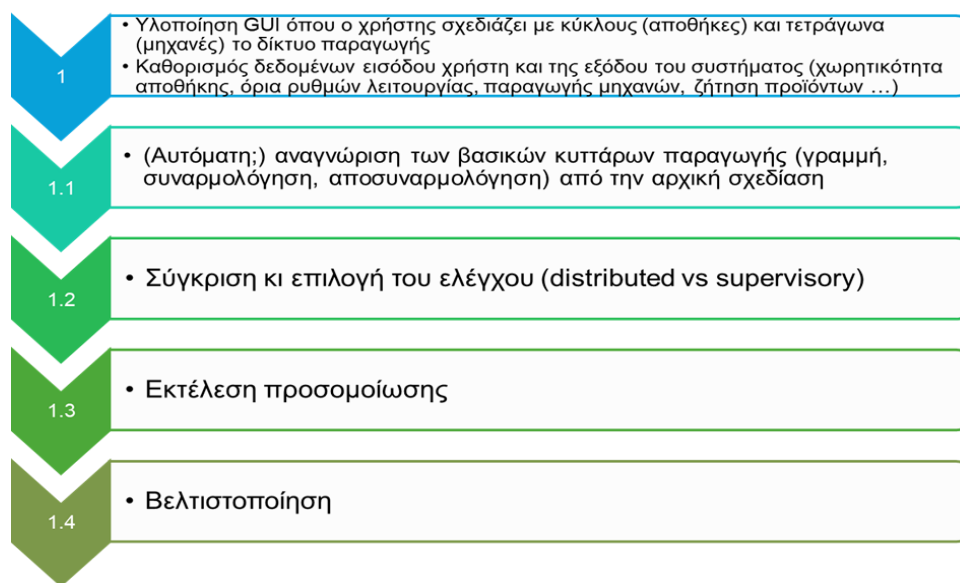
Στη συνέχεια γίνεται «μετάφραση» της τοπολογίας σε μορφή κατανοητή από ένα εργαλείο σχεδίασης και μοντελοποίησης συστημάτων ως συνδυασμός 3 τύπων δομικών μονάδων: γραμμή (Line), συναρμολόγηση (Assembly), αποσυναρμολόγηση (Disassembly). Στα πρώτα στάδια υλοποίησης, η «μετάφραση» αυτή γίνεται με τη χρήση της βιβλιοθήκης Simulink της προγραμματιστικής πλατφόρμας Matlab, καθώς με αυτό το εργαλείο έχουν μοντελοποιηθεί και επαληθευθεί αρκετά παραδείγματα δημοσιευμένων εργασιών από την ομάδα εργασίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στην τελική έκδοση της λύσης, στο στάδιο αυτό θα συμπεριληφθεί εργαλείο ανοιχτού κώδικα συμβατό με το περιβάλλον ανάπτυξης Python ώστε το λογισμικό να μην έχει εξαρτήσεις από εφαρμογές τρίτων και να δύναται να χρησιμοποιηθεί απευθείας από τον τελικό χρήστη με απλούστερα βήματα και σε άμεσο χρόνο.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή τους είδους του ελεγκτή που θα επιτελέσει την λειτουργία αξιολόγησης/στάθμισης των παραμέτρων παραγωγής και θα ανακαταλείπει την ροή με βάση τις τρέχουσες

συνθήκες, τυχόν απρόοπτα γεγονότα και την επιθυμητή έξοδο. Στα πλαίσια του έργου, αρχικά θα είναι διαθέσιμα 3 είδη ελεγκτών: κατανεμημένος (distributed), επιβλεπτικός (supervisory) κι εξελικτικός (evolutionary). Στην τελική έκδοση της λύσης θα δύνανται να ενσωματωθούν κι άλλα μοντέλα μονάδων ελέγχου.

Με βάση την επιλογή του ελεγκτή και τον καθορισμό των σεναρίων λειτουργίας του δικτύου παραγωγής (ορίζοντας διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους και εισάγοντας τυχαιότητα στην εμφάνιση αλλαγών κι απρόβλεπτων καταστάσεων) ξεκινά μια επαναληπτική διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων, βελτιστοποίησης παραμέτρων και ανατροφοδότησης,όποτε χρειάζεται, ώστε το απόθεμα (WIP) να παραμένει στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα και να αποφεύγονται καταστάσεις υπερφόρτωσης ή αδιεξόδου. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης θα μπορεί να προσομοιώνει διάφορα σενάρια στη διαδικασία παραγωγής και να διασφαλίζει την βέλτιστη λύση για αυτά προκειμένου να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις. Σε επιχειρησιακές συνθήκες πλέον, οι παράμετροι παραγωγής δεν θα υπολογίζονται μέσω προσομοίωσης και προκαθορισμένων ή τυχαίων μοντέλων ανάθεσης τιμών αλλά θα λαμβάνονται από υποσυστήματα που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες (π.χ. ενσωματωμένοι αισθητήρες σε μηχανές)

Τα βασικά στάδια υλοποίησης για την αρχική έκδοση της λύσης συνοψίζονται στην Εικόνα 60.



Εικόνα 60: Βασικά στάδια υλοποίησης εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής

Ως προς την αρχιτεκτονική του δικτύου παραγωγής, στην γενική περίπτωση θεωρούμε γραμμές με τυχαίους χρόνους σφάλματος και διόρθωσης κι ακολουθούμε την βασική ιδέα-πλεονέκτημα της προτεινόμενης λύσης πως η συντριπτική πλειοψηφία των δικτύων παραγωγής σε βιομηχανικές συνθήκες δύνανται να μοντελοποιηθούν ως συνδυασμός 3 βασικών υποσυστημάτων, κάθε ένα από τα οποία λειτουργεί ως κατανεμημένος ελεγκτής ασαφούς λογικής που διαχειρίζεται παραμέτρους εισόδου/εξόδου. Ο σκοπός είναι η ικανοποίηση της ζήτησης, κρατώντας παράλληλα το ενδοεπιχειρησιακό απόθεμα στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο, έχοντας τις παρακάτω δύο προσεγγίσεις ως γνώση καθοδήγησης:

- Αν τα επίπεδα αποθέματος είναι ικανοποιητικά τότε προσπαθούμε να αποφύγουμε φαινόμενα αδιεξόδου (starvation ή blocking) αυξάνοντας ή μειώνοντας τον ρυθμό παραγωγής αντίστοιχα.
- Αν τα επίπεδα αποθέματος δεν είναι ικανοποιητικά ώστε να θεωρούνται είτε πολύ μικρά είτε πολύ μεγάλα τότε ορίζουμε τον ρυθμό παραγωγής στην μέγιστη ή ελάχιστη τιμή αντίστοιχα.

Η γενική προσέγγιση της λύσης εξασφαλίζει μια αρθρωτή και ευέλικτη αρχιτεκτονική, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί σε συστήματα παραγωγής διαφορετικής γεωμετρίας/τοπολογίας και μεγέθους, μιμούμενη τον «απλό ανθρώπινο» τρόπο σκέψης για τη ρύθμιση της παραγωγής, ελαχιστοποιώντας τις περιόδους «αδράνειας» του συστήματος (λόγω υπερφόρτωσης ή έλλειψης προϊόντων στους ενδιάμεσους σταθμούς)

αλλά και αποφεύγοντας έντονα επίπεδα φόρτου εργασιών, τα οποία είναι αρκετά ενεργοβόρα κι αυξάνουν το κόστος παραγωγής.

Ως προς τις βασικές θεωρήσεις/παραδοχές για την μοντελοποίηση και προσομοίωση των διαφόρων σεναρίων εφαρμογής, συνοπτικά έχουμε την ακόλουθη γενική καταγραφή:

1. Οι «μηχανές» ($i=1, \dots, N$) παρουσιάζουν βλάβες με τυχαίο ρυθμό (failure rate) p_i .
2. Οι «μηχανές» ($i=1, \dots, N$) επισκευάζονται με τυχαίο ρυθμό (repair rate) rr_i .
3. Μετά από την ολοκλήρωση κάθε επισκευής εκτελείται μια διαδικασία εγκατάστασης/ρύθμισης με ρυθμό sr_i .
4. Οι χρόνοι εκδήλωσης, επισκευής και εγκατάστασης/ρύθμισης της βλάβης (Time to failure, time to repair, setup times) ακολουθούν εκθετική κατανομή
5. Η ζήτηση είναι στοχαστική μεταβλητή με ρυθμό d και ακολουθεί κατανομή Poisson
6. Όλες οι μηχανές λειτουργούν με γνωστό ρυθμό, αλλά όχι απαραίτητα τον ίδιο
7. Οι αρχικές μονάδες αποθήκευσης (buffers) θεωρούνται ως πόροι άπειρης χωρητικότητας πρώτων υλών, επομένως στις πρώτες μηχανές δεν θα παρατηρούνται ποτέ καταστάσεις έλλειψης υλικών
8. Οι αποθηκευτικές μονάδες μεταξύ δύο γειτονικών μηχανών M_i, M_j και η εγκατάσταση αποθήκευσης των «τελειωμένων» προϊόντων (finished items) έχουν πεπερασμένη χωρητικότητα
9. Οι χρόνοι μεταφοράς ενδιάμεσων προϊόντων θεωρούνται αμελητέοι ή ενσωματώνονται στους χρόνους επεξεργασίας

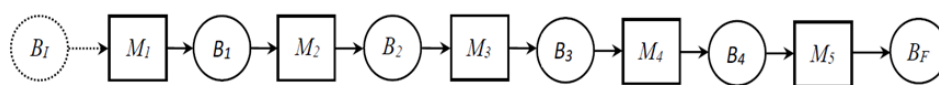
2.8.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Ως ένα παράδειγμα χρήσης για την δοκιμή της αρχικής έκδοσης της τρέχουσας τεχνολογικής λύσης εστιάζουμε σε μια στρατηγική διπλού κριτηρίου (bi-objective) που ελέγχει το ενδοεπιχειρησιακό απόθεμα (WIP) και, ταυτόχρονα, την κατανάλωση ενέργειας. Πέραν των βασικών θεωρήσεων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.8.3, θεωρούμε επιπλέον πως η μηχανή i απαιτεί ένα στιγμιαίο φορτίο li_i ηλεκτρισμού, όπου li είναι ο συντελεστής φορτίου για την μηχανή i . Στην περίπτωση που η μηχανή i είναι υπό συντήρηση/εγκατάσταση/διόρθωση τότε το φορτίο είναι lsu_i .

Η αρχιτεκτονική της γραμμής παραγωγής για το παράδειγμα εφαρμογής που αναλύεται στην παρούσα ενότητα αναπαρίσταται στην Εικόνα 61. Αποτελείται από 5 μηχανές ($N = 5$), οι οποίες παράγουν έναν μόνο τύπο προϊόντος. Οι ρυθμοί παρουσίασης βλάβης, επισκευής και εγκατάστασης είναι ίδιοι και για τις 5 μηχανές και συγκεκριμένα $rr_i = 0.5$, $p_i = 0.1$ και $sr_i = 1$ αντίστοιχα ($i = 1, \dots, 5$). Οι ρυθμοί επεξεργασίας είναι επίσης ίδιοι για όλες τις μηχανές, με τιμή $\mu_i = 2$ ($i = 1, \dots, 5$). Το κόστος $C_E(L)$ κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος ακολουθεί την παρακάτω γραμμική μορφή:

$$C_E(L) = \sum_{i=1}^{j-1} c_i(L_i - L_{i-1}) + c_j(L - L_{j-1}) \quad , \quad L_{j-1} \leq L \leq L_j$$

όπου $j = 1, 2, \dots, K$, $L_0 = 0$, L_K είναι η μέγιστη τιμή φορτίου και c_i είναι το κόστος ενεργειακής κατανάλωσης της κάθε μηχανής/μονάδας i για φορτίου μεταξύ του διαστήματος $(L_{i-1}, L_i]$. Προσομοιώνονται 5 σενάρια προτύπου ενεργειακής κατανάλωσης, οι παράμετροι των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Θεωρούμε επίσης τιμές παραμέτρων $li_i = 0.5$ και $lsu_i = 0.2$ ($i=1, 2, \dots, 5$) για τους συντελεστές φορτίου και 10000 μονάδες χρόνου για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Η προτεινόμενη προσέγγιση ελέγχου παραγωγής με βάση τον καταναμημένο ελεγκτή ασαφούς λογικής (distributed fuzzy control - DFC) συγκρίνεται με την κλασική προσέγγιση παραγωγής (produce at capacity - PC), όπου η παραγωγή προχωράει όσο υπάρχει δυνατότητα (από τις μηχανές και τους buffers).



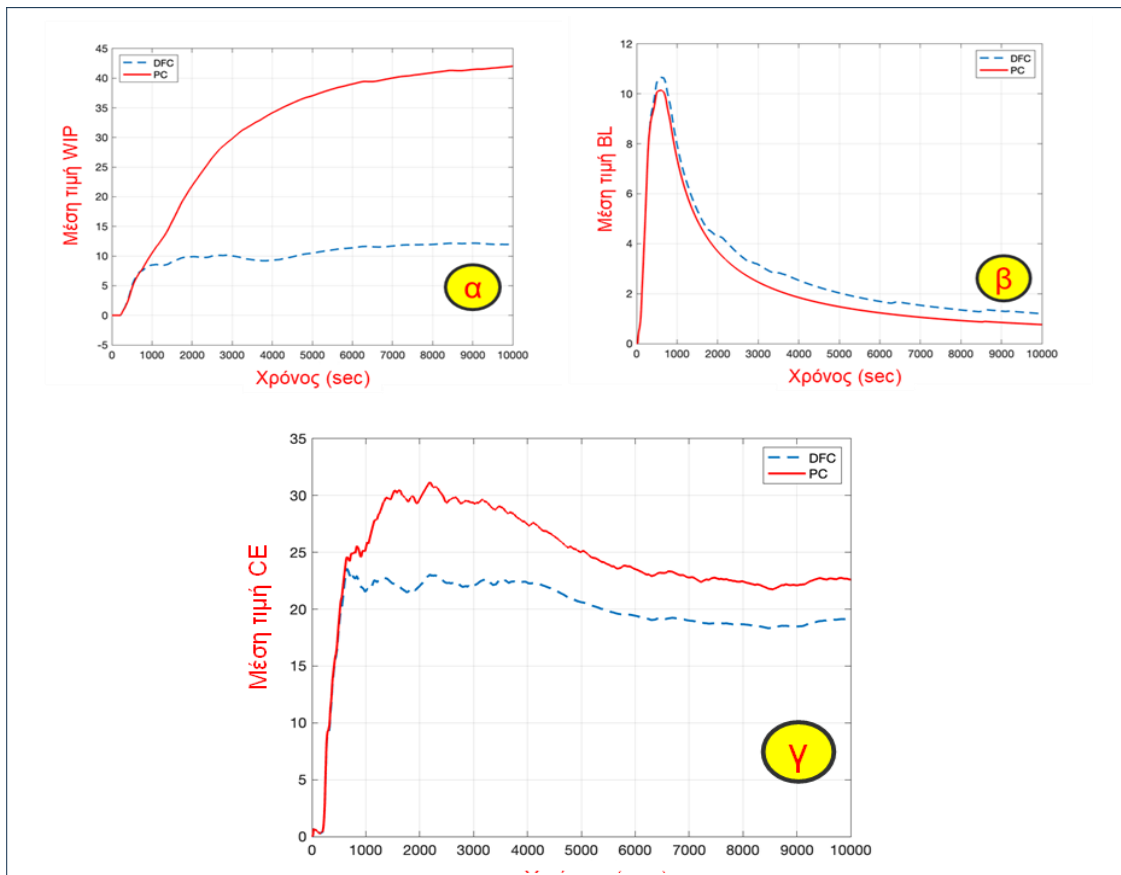
Εικόνα 61: Σχηματική αναπαράσταση γραμμής παραγωγής για το σενάριο προσομοίωσης

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Πίνακας 3: Παράμετροι κόστους για κάθε σενάριο ενεργειακής κατανάλωσης στην υπό ανάλυση προσομοίωση

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
c_1	5	5	5	5
c_2	19	7,5	10	15
c_3	20	10	-	-
L_1	2,5	2,5	3	3
L_2	4	4	5	5
L_3	5	5	-	-

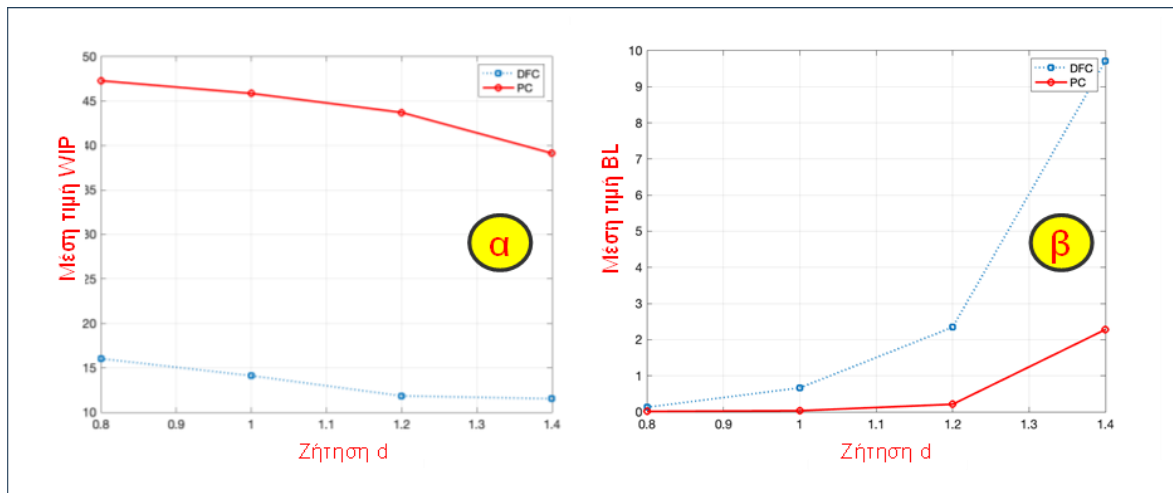
Η διακύμανση του μέσου ενδοεπιχειρησιακού αποθέματος (WIP), του μέσου αποθέματος (backlog BL) και του μέσου κόστους ενέργειας (CE) για τις δύο προσεγγίσεις ελέγχου και σταθερό ρυθμό ζήτησης $d=1,2$ παρουσιάζονται στην Εικόνα 62.



Εικόνα 62: Διακύμανση α) του μέσου ενδοεπιχειρησιακού αποθέματος (WIP), β) του μέσου αποθέματος (backlog BL) και γ) του μέσου κόστους ενέργειας (CE) για δύο προσεγγίσεις ελέγχου και σταθερό ρυθμό ζήτησης $d=1,2$

Η διακύμανση του μέσου ενδοεπιχειρησιακού αποθέματος και του μέσου αποθέματος για διάφορες τιμές της ζήτησης d αναπαρίστανται στην Εικόνα 63, ενώ η αντίστοιχη διακύμανση του κόστους ενέργειας για τα διάφορα σενάρια εκτίμησής του συνοψίζονται στον Πίνακα 4. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης καταδεικνύουν την σημαντική συνεισφορά της χρήσης ελέγχου στον προγραμματισμό παραγωγής σε σχέση με την κλασική προσέγγιση της αδιάλειπτης και σταθερής παραγωγής όσο υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



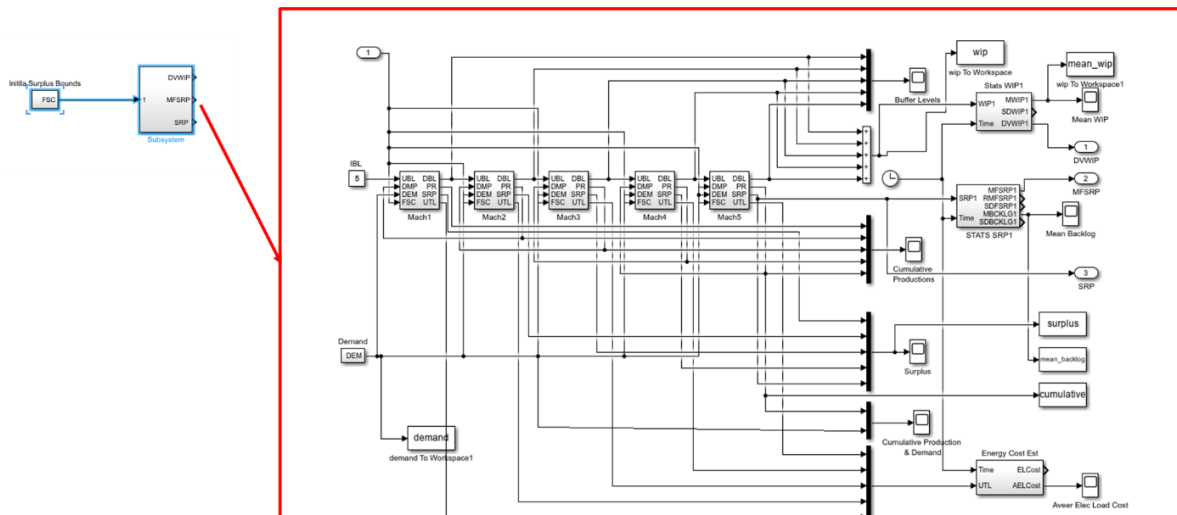
Εικόνα 63: Διακύμανση α) του μέσου ενδοεπιχειρησιακού αποθέματος (WIP) και β) του μέσου αποθέματος (backlog BL) για διαφορετικούς ρυθμούς ζήτησης d

Πίνακας 4: Διακύμανση μέσου κόστους ενεργειακής κατανάλωσης στην υπό ανάλυση προσομοίωση για διαφορετικές τιμές της ζήτησης και διαφορετικό μοντέλο ελέγχου παραγωγής (ασαφούς λογικής (distributed fuzzy control - DFC) και κλασικής προσέγγισης παραγωγής (produce at capacity - PC))

	δ	0,8	1	1,2	1,4
Σενάριο 1	PC	12.473	17.044	21.917	27.391
	DFC	11.039	14.775	19.687	25.998
Σενάριο 2	PC	11.402	14.669	18.103	21.740
	DFC	10.660	13.753	17.281	21.261
Σενάριο 3	PC	11.384	14.760	18.379	22.239
	DFC	10.443	13.543	17.312	21.697
Σενάριο 4	PC	12.456	16.695	21.462	26.753
	DFC	10.596	14.284	19.372	25.697

Το σχέδιο της αρχιτεκτονικής του δικτύου παραγωγής για το ανωτέρω παράδειγμα χρήσης απεικονίζεται στην Εικόνα 64. Εκπονήθηκε σε περιβάλλον Simulink/Matlab και περιλαμβάνει τόσο την αναπαράσταση των υπομονάδων του δικτύου όσο και την διασύνδεση μεταξύ τους.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



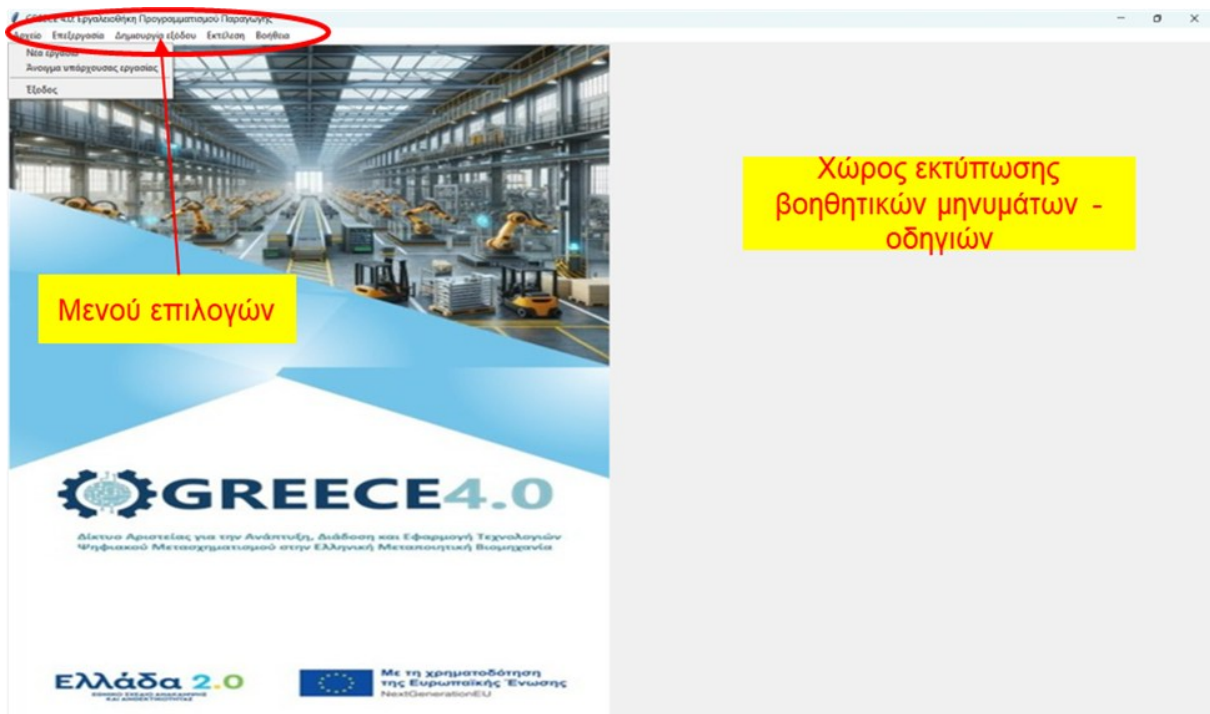
Εικόνα 64: Σχεδίαση αρχιτεκτονικής δικτύου παραγωγής σε περιβάλλον Simulink/Matlab

Η ενδιάμεση έκδοση της υλοποίησης περιλαμβάνει την παροχή λειτουργικότητας για την εκτέλεση προσομοιώσεων και την παρακολούθηση των παραμέτρων ενδιαφέροντος σε ένα δίκτυο παραγωγής μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη που έχει αναπτυχθεί σε προγραμματιστικό περιβάλλον Python. Σε αυτή την φάση ανάπτυξης του λογισμικού, η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του δικτύου εισάγεται χειροκίνητα μέσω των αντίστοιχων αρχείων σε περιβάλλον Simulink/Matlab. Στην τελική έκδοση της λύσης, η τοπολογία της αρχιτεκτονικής και ο καθορισμός των ιδιοτήτων κάθε υπομονάδας θα διαμορφώνεται κι αυτή με χρήση λογισμικού ανοιχτού κώδικα.

Στην Εικόνα 65 απεικονίζεται το γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI – Graphical User Interface), μέσω του οποίου παρέχεται η ακόλουθη βασική λειτουργικότητα:

1. Δημιουργία/Άνοιγμα «εργασίας» προσομοίωσης/παρακολούθησης ροής παραγωγής
2. Επεξεργασία παραμέτρων παραγωγής, οι οποίες σχετίζονται με τις μηχανές, τους αποθηκευτικούς χώρους, τους ελεγκτές, την παραγωγή, την προσομοίωση της ροής παραγωγής, τους ενδιάμεσους κόμβους
3. Εξαγωγή βοηθητικών αρχείων και αρχείων εξόδου για την προσομοίωση της ροής παραγωγής
4. Εκτέλεση της προσομοίωσης και καταγραφή αποτελεσμάτων
5. Πρόσβαση σε εγχειρίδιο χρήσης και πληροφορία για το λογισμικό μέσω ενός υπο-μενού «Βοήθειας»

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

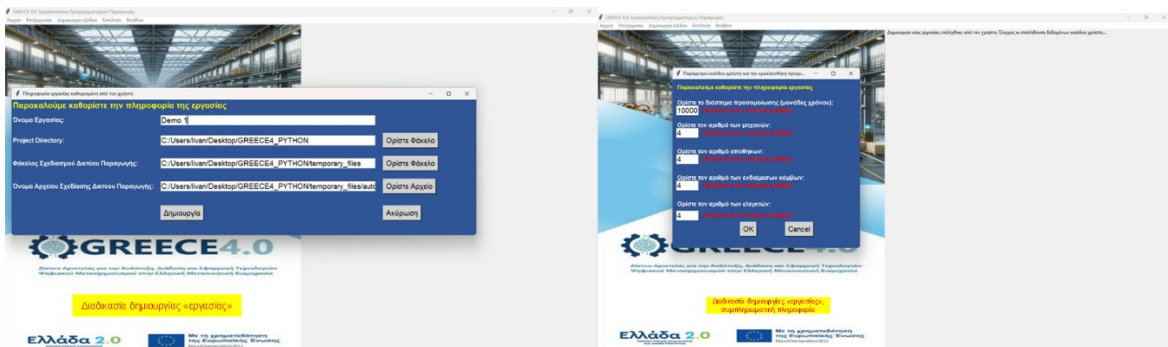


Εικόνα 65: Γραφικό περιβάλλον χρήστη λογισμικού προγραμματισμού ανθεκτικής κι ευέλικτης παραγωγής

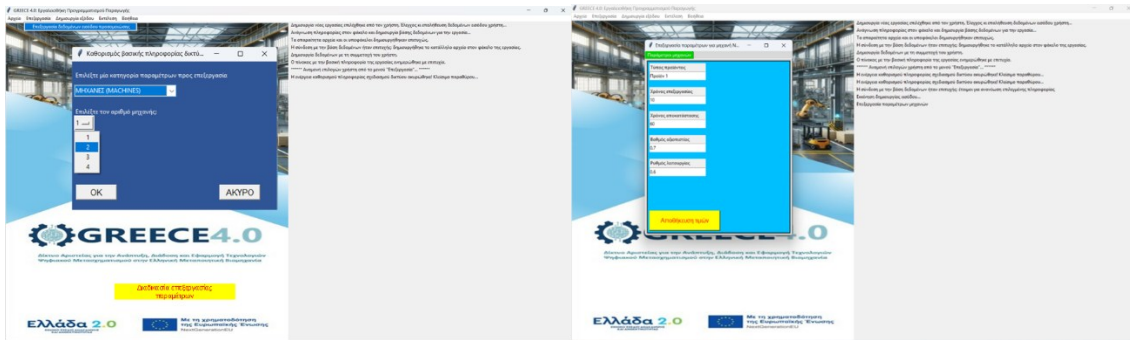
Το περιβάλλον είναι δομημένο με τέτοιο τρόπο ώστε η εισαγωγή και η επεξεργασία της πληροφορίας να γίνεται αρθρωτά και σε σειριακά βήματα/στάδια (το επόμενο βήμα δεν μπορεί να εκτελεστεί αν δεν ολοκληρωθεί πλήρως το προηγούμενο), ελέγχοντας παράλληλα την εγκυρότητα της πληροφορίας, τα οποία έχουν την ακόλουθη δομή:

- Δημιουργία/Άνοιγμα «εργασίας προσομοίωσης» (καθορισμός ονομάτων και φακέλων αποθήκευσης, ορισμός αρχείων που περιέχουν την σχεδίαση της αρχιτεκτονικής)
- Καθορισμός/επεξεργασία παραμέτρων (ορισμός τιμών για κάθε υπομονάδα της αρχιτεκτονικής)
- Δημιουργία απαραίτητων ενδιάμεσων αρχείων και αποθήκευση πληροφορίας τοπικά σε μια βάση δεδομένων («εσωτερική» διαχείριση πληροφορίας και μεταβλητών ελέγχου/καταγραφής)
- Εκτέλεση του καθορισμένου μοντέλου προγραμματισμού παραγωγής

Ενδεικτικά στιγμιότυπα του λογισμικού κατά τις διαφορετικές επιλογές/διαδικασίες του χρήστη παρατίθενται στις Εικόνα 66 και Εικόνα 67.



Εικόνα 66: Στιγμιότυπα λογισμικού προγραμματισμού παραγωγής για την διαδικασία της δημιουργίας "εργασίας"



Εικόνα 67: Στιγμιότυπα λογισμικού προγραμματισμού παραγωγής για την διαδικασία της επεξεργασίας παραμέτρων

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

2.9.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

Η παρούσα λύση εστιάζει στη βέλτιστη διαχείριση των αλυσίδων αξίας, στην αξιολόγησή τους ως προς τη βιωσιμότητα και την κυκλικότητα, και στην αποτελεσματική μετάδοση πληροφοριών για το παραγόμενο προϊόν σε ενδιαφερόμενους φορείς, συνεργάτες και καταναλωτές. Η παρούσα τεχνολογική λύση συνδυάζει ψηφιακά εργαλεία προσομοίωσης (Process modelling and Simulation Tool, PSM), βιώσιμης διαχείρισης και αξιολόγησης (Circular Sustainability Balanced Scorecards), και διαφάνειας-ιχνηλασιμότητας (Digital Product Passports). Συνολικά, η προτεινόμενη λύση αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της οργάνωσης των κυκλικών αλυσίδων αξίας και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των βιομηχανιών με τη δημιουργία προστιθέμενης αξίας στους τομείς της βιωσιμότητας (περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική), της κυκλικής οικονομίας και της ανθεκτικότητας.

Δεδομένου του πλήθους των εργαλείων που αναπτύσσονται στην παρούσα λύση, πολλές εργασίες λαμβάνουν χώρα παράλληλα, διαμορφώνοντας το μέχρι τώρα χρονοδιάγραμμα εργασιών. Οι μέχρι τώρα ολοκληρωμένες εργασίες περιλαμβάνουν:

- Συλλογή δεδομένων, ανασκόπηση βιβλιογραφίας για ανάλυση και εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης στην υπό εξέταση βιομηχανία. (M9-M13)
- Δημιουργία διαγράμματος ροής διεργασιών της αλυσίδας παραγωγής της επιλεγμένης βιομηχανίας για να δημιουργηθεί το ακριβές μοντέλο της αλυσίδας και το ψηφιακό της δίδυμο. Συλλογή πληροφοριών και δεδομένων για αυτό το σκοπό. (M11-M13, , Επίτευξη Οροσήμου 1: αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης και καθορισμός διεργασιών της εφοδιαστικής αλυσίδας)
- Μοντελοποίηση των παραγωγικών διεργασιών και αλυσίδων εφοδιασμού (M11-M16)
- Ανασκόπηση βιβλιογραφίας, συγκέντρωση KPIs για την αξιολόγηση της κυκλικότητας και της βιωσιμότητας της αλυσίδας, επιλογή KPIs για τη συγκεκριμένη αλυσίδα, καθορισμός εξισώσεων και μοντέλου. (M11-M16, Επίτευξη Οροσήμου 2: Καθορισμός τεχνικών και λειτουργικών παραμέτρων, επιλογή KPIs (SBSC) και μοντελοποίηση της αλυσίδας ως επιμέρους σύστημα ψηφιακών διδύμων)

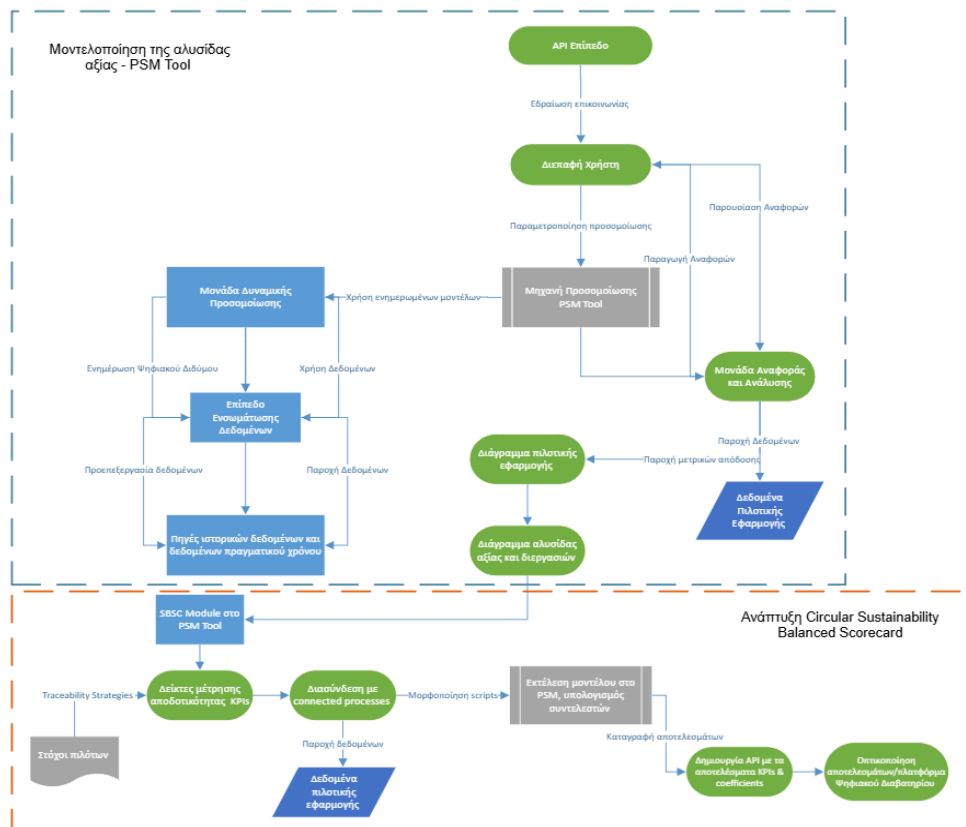
Ενώ παράλληλα, βρίσκονται σε εξέλιξη οι εργασίες που αφορούν την επαλήθευση των μοντέλων και της δημιουργίας του SBSC της βιομηχανικής αλυσίδας και το Ψηφιακό Διαβατήριο του τελικού προϊόντος της βιομηχανίας.

- Έλεγχος και αξιολόγηση μοντέλων μέσω συνθετικών δεδομένων, έλεγχος αποτελεσμάτων (M17-M22, **σε εξέλιξη**, Επίτευξη Οροσήμου 3: Δημιουργία μαθηματικών μοντέλων/εξισώσεων για τον υπολογισμό κάθε επιλεγμένου KPI, έλεγχος και επικύρωση αποτελεσμάτων)
- Διερεύνηση της διασύνδεσης των αποτελεσμάτων από το SBSC, των τεχνολογιών αναγνώρισης, αποθήκευσης δεδομένων και διαλειτουργικότητας. (M19-M22, **σε εξέλιξη**)

- Οριστικοποίηση αρχιτεκτονικής τελικής λύσης και ανάπτυξη των απαιτούμενων τεχνολογικών λύσεων (M20-M22, **σε εξέλιξη**).

2.9.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης της τεχνολογικής λύσης, οι ενέργειες και τα στάδια υλοποίησης εστιάζουν στην αξιοποίηση της πληροφορίας που έχει συλλεχθεί, αλλά και των απαιτήσεων της αλυσίδας, για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησής της μέσω του εργαλείου PSM, και την ανάπτυξη του εργαλείου αξιολόγησης βιωσιμότητας, του Sustainability Balanced Scorecard. Η αρχιτεκτονική της ενδιάμεσης έκδοσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 68.



Εικόνα 68: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης για τις κυκλικές αλυσίδες αξίας

Η αρχιτεκτονική της ενδιάμεσης έκδοσης αποτελείται από δύο κύρια τμήματα, ξεκινώντας από την Μοντελοποίηση της Αλυσίδας Αξίας με τη χρήση του εργαλείου PSM Tool, και προχωρώντας στην αξιολόγηση της κυκλικότητας και της βιωσιμότητας με την ανάπτυξη του Circular Sustainability Balanced Scorecard. Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου της αλυσίδας αξίας, ξεκινώντας με την ενσωμάτωση δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από διάφορες πηγές, ήδη εγκατεστημένες στη βιομηχανία, καθώς και επιτόπου συλλογή δεδομένων, τα οποία έχουν σταλεί για επεξεργασία στην ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης, από τη βιομηχανία. Στη συνέχεια, η Μονάδα Δυναμικής Προσομοίωσης χρησιμοποιεί τα δεδομένα για να δημιουργήσει μία ψηφιακή αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της αλυσίδας. Το εργαλείο PSM, μέσω της διεπαφής χρήστη και API, επιτρέπει την παραμετροποίηση του μοντέλου, τον υπολογισμό όλων ή επιλεγμένων παραμέτρων, και την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Η Μονάδα Αναφοράς και Ανάλυσης παρέχει τους δείκτες/παραμέτρους και τα δεδομένα για την εξεταζόμενη αλυσίδα, ενώ η οπτική απεικόνιση γίνεται μέσω του διαγράμματος ροής (flowchart) και των επιμέρους διεργασιών.

Το δεύτερο τμήμα της αρχιτεκτονικής της ενδιάμεσης λύσης, εστιάζει στην αξιολόγηση της κυκλικότητας και βιωσιμότητας μέσω του Circular Sustainability Balanced Scorecard (C-SBSC). Το C-SBSC αναπτύσσεται ως ενσωματωμένο module στο εργαλείο PSM, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιμέρους διεργασίες και δεδομένα

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

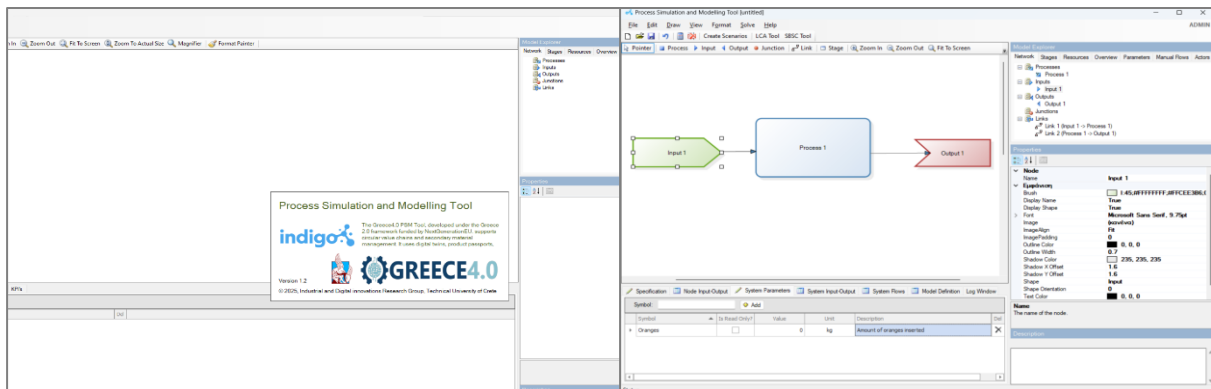
του ψηφιακού διδύμου που έχει προκύψει κατά το πρώτο στάδιο μέσω του PSM. Επιλεγμένοι και συγκεκριμένοι δείκτες μέτρησης αποδοτικότητας έχουν εισαχθεί στο C-SBSC Module, για να μετρηθούν και να αξιολογήσουν τη βιωσιμότητα της αλυσίδας. Το μοντέλο εκτελείται στο PSM, υπολογίζοντας συντελεστές, και τα αποτελέσματα καταγράφονται. Δημιουργείται ένα API με τα αποτελέσματα και τους συντελεστές, το οποίο στη συνέχεια, τροφοδοτεί το Ψηφιακό Διαβατήριο, και οπτικοποιεί τα αποτελέσματα από το C-SBSC μέσα σε αυτό. Η αρχιτεκτονική του Ψηφιακού Διαβατηρίου, καθώς και ο τρόπος ανάπτυξής του, θα αποτελέσουν τμήμα της αρχιτεκτονικής της τελικής λύσης, και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο επόμενο παραδοτέο.

2.9.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

2.9.3.1 Μοντελοποίηση της αλυσίδας αξίας

Το πρώτο βήμα της υλοποίησης της παρούσας τεχνολογικής λύσης, στοχεύει στη μοντελοποίηση της υπό εξέταση αλυσίδας αξίας. Η εφαρμογή για την ανάπτυξη της παρούσας τεχνολογικής λύσης θα υλοποιηθεί σε βιομηχανία παραγωγής χυμών από εσπεριδοειδή, η οποία εδρεύει στην Ελλάδα. Το ακριβές ψηφιακό αντίγραφο της γραμμής παραγωγής της εν λόγω αλυσίδας και της λειτουργικότητάς της, δημιουργήθηκε μέσω του εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης των διεργασιών, PSM – Process Model and Simulation Tool, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα indigo της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου της αλυσίδας ξεκινάει με την εισαγωγή όλων των επιμέρους διεργασιών της γραμμής παραγωγής σε ένα κενό workspace του εργαλείου, τα οποία κατηγοριοποιούνται αρχικά ως input, processes, outputs και οι συνδέσεις τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 69.

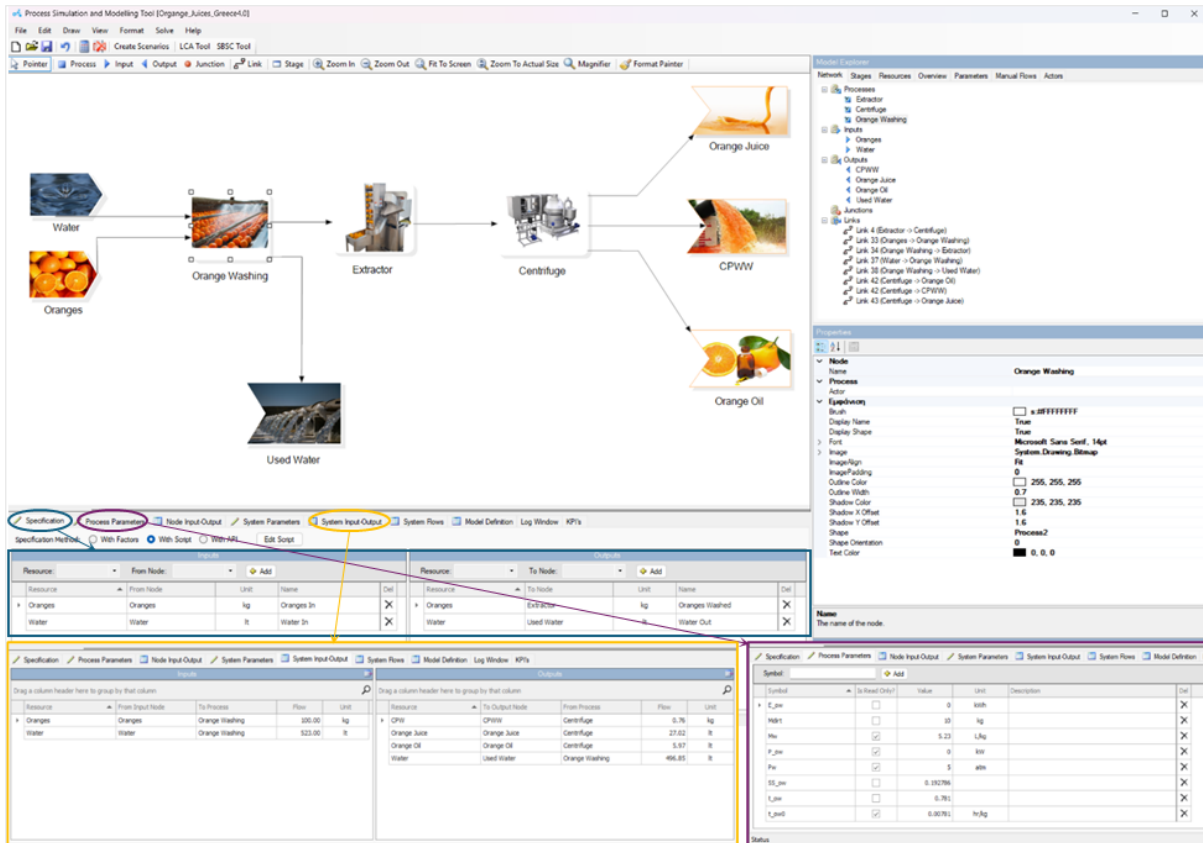


Εικόνα 69: Έναρξη του Εργαλείου PSM (αριστερά) και Διαδικασία ανάπτυξης μοντέλου βιομηχανικής αλυσίδας (δεξιά)

Σε κάθε μία διεργασία, καθορίζονται οι τιμές εισερχόμενων και εξερχόμενων ροών του προϊόντος ή πρώτης ύλης ή του υλικού, καθώς και όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργικότητας των επιμέρους διεργασιών, καθώς και τα μοντέλα/εξισώσεις, που αντικατοπτρίζουν τον τρόπο λειτουργίας κάθε διεργασίας. Βασίζομενοι στις πληροφορίες και λειτουργικά χαρακτηριστικά που δόθηκαν από τη βιομηχανία, ώστε να δημιουργηθεί το διάγραμμα ροής (flowchart) της γραμμής παραγωγής, δημιουργείται το συνολικό μοντέλο της βιομηχανίας παραγωγής χυμών. Το διάγραμμα ροής απεικονίζει όλες τις επιμέρους διεργασίες, τον τρόπο και τη σειρά με την οποία συνδέονται, καθώς και τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Στην υπό εξέταση βιομηχανία, η γραμμή παραγωγής ξεκινά με την είσοδο της πρώτης ύλης (πορτοκάλια), τις επιμέρους διεργασίες που λαμβάνουν χώρα για την παραγωγή χυμού, καθώς και τις επιμέρους διεργασίες για την παραγωγή των παραπροϊόντων (παραγωγή λικέρ, παραγωγή ζωοτροφών, και παραγωγή μελάσσας). Στο πλαίσιο του έργου Greece4.0, θα εστιάσουμε ως κύριο τελικό προϊόν στην παραγωγή του χυμού, για τον οποίο θα γίνει αξιολόγηση της κυκλικότητας και βιωσιμότητας, και θα δημιουργηθεί το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Εστιάζοντας στην Εικόνα 70, παρατηρούμε μία σειρά από δεδομένα και πληροφορίες που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού και αξιόπιστου μοντέλου, μέσω του εργαλείου PSM. Για κάθε μία από τις επιμέρους διεργασίες, είναι απαραίτητο να εισαχθούν τα δεδομένα που αφορούν τις παραμέτρους (process parameters – μωβ περιγράμματα στην Εικόνα 70) της κάθε διεργασίας (όπως παραδείγματος χάρη ποσότητα εισερχόμενου υλικού/προϊόντος, θερμοκρασία, πίεση, κτλ). Πριν από τον καθορισμό των παραμέτρων, έχουν καθοριστεί τα δεδομένα εισόδου και εξόδου για κάθε μία από τις διεργασίες (system input/output – κίτρινα περιγράμματα στην Εικόνα 70). Με την ολοκλήρωση των «συνδέσεων» και εισαγωγής δεδομένων σε κάθε επιμέρους διεργασία, δημιουργείται το συνολικό μοντέλο της βιομηχανίας παραγωγής χυμών. Η δυνατότητα καθορισμού των χαρακτηριστικών του συνολικού συστήματος (system parameters) είναι επίσης εφικτή. Με την εκτέλεση της προσομοίωσης (Solve->Calculate Flows), υπολογίζονται όλες οι επιμέρους ροές και τα ζητούμενα αποτελέσματα (Εικόνα 70).



Εικόνα 70: Δημιουργία μοντέλου στο PSM, καθορισμός παραμέτρων και υπολογισμός

Το PSM, ως αυτόνομο εργαλείο, παρέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (KPIs ή αντικειμενικών συναρτήσεων ή οποιαδήποτε άλλη παράμετρο ή αποτέλεσμα), μέσω API – Application Programming Interface. Αυτή η Διεπαφή χρησιμοποιείται και στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου τα αποτελέσματα του PSM, μεταφέρονται απευθείας στην πλατφόρμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων, η οποία υποστηρίζει παράλληλα και το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος.

2.9.3.2 Σχεδιασμός και Ανάπτυξη του Circular Sustainability Balanced Scorecard

Ολοκληρώνοντας την Ενότητα Εργασίας 1, το πλαίσιο και τα βήματα υλοποίησης του Circular Sustainability Balanced Scorecard είχαν ολοκληρωθεί και παρουσιάστη στο Π1.2, μαζί με την αρχική αρχιτεκτονική της λύσης. Σε αυτή την ενδιάμεση έκδοση της τεχνολογικής λύσης, τα βήματα που υλοποιούνται εστιάζουν στην ανάπτυξη του Circular SBSC ως ένα ενσωματωμένο (embedded) module/εργαλείο στο PSM Tool. Το Circular SBSC λαμβάνει υπόψη τα μοντέλα προσομοίωσης και όλες τις μοντελοποιημένες διεργασίες της αλυσίδας, υπολογίζει μία σειρά από δείκτες βιωσιμότητας (KPIs – Key Performance Indicators), ακολουθώντας τους

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

στόχους και τις επιθυμίες της υπό εξέταση βιομηχανίας. Οι δείκτες επιλέγονται από τη βιομηχανία, μέσα από έναν εκτεταμένο κατάλογο δεικτών, οι οποίοι έχουν επιλεγεί με γνώμονα την αξιολόγηση της βιωσιμότητας (κοινωνία, οικονομία & περιβάλλον) και της κυκλικότητας (επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, σχετικά πρότυπα και τυποποιήσεις), λαμβάνοντας υπόψη και τον πυλώνα της διακυβέρνησης (governance). Δημιουργήθηκε επομένως μία εκτεταμένη λίστα με KPIs, από τα οποία η βιομηχανία επέλεξε αυτά που την ενδιαφέρουν για να υπολογιστούν και συμπεριληφθούν στο Circular SBSC (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Λίστα δεικτών Key Performance Indicators στο Circular SBSC

Όνομασία Δείκτη	Περιγραφή	Μονάδα Μέτρησης	Όνομασία Δείκτη	Περιγραφή	Μονάδα Μέτρησης
Περιβαλλοντικοί Δείκτες			Κοινωνικοί Δείκτες		
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂) [2] [10]	Ποσότητα CO ₂ που εκπέμπεται κατά μήκος της αλυσίδας	kg _{eq}	Υγεία και ασφάλεια [14]	Αξιολόγηση συνθηκών υγείας και ασφάλειας	-*
Μεθάνιο (CH ₄) [16] [17]	Ποσότητα CH ₄ που εκπέμπεται κατά μήκος της αλυσίδας	kg _{eq}	Ισότητα φύλων και συμπερίληψη [14][2]	Αξιολόγηση θεμάτων σχετικά με την ισότητα των φύλων και τη συμπερίληψη στη βιομηχανία	-*
Κατανάλωση νερού [16] [17]	Ποσότητα νερού που καταναλώνεται στις βιομηχανικές διεργασίες	kg	Εκπαίδευση εργαζομένων [14]	Οργάνωση και υλοποίηση εκπαιδευτικών σεμιναρίων για τους εργαζόμενους	-*
Ποσότητα νερού για επαναχρησιμοποίηση [17]	Ποσότητα νερού που επαναχρησιμοποιείται στις βιομηχανικές διεργασίες	kg	Ασφάλεια χημικών υλικών [14] [2]	Η βιομηχανία πληροί τα πρότυπα ασφάλειας για τα χημικά υλικά	-*
Ποσότητα επεξεργασμένου νερού [17]	Ποσότητα νερού που επεξεργάζεται πριν επιστρέψει στη βιομηχανική αλυσίδα	kg	Ασφάλεια και ποιότητα προϊόντος [14] [2]	Η βιομηχανία πληροί τα πρότυπα ασφάλειας και ποιότητας	-*
Κατανάλωση ενέργειας [16]	Ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται κατά μήκος της αλυσίδας	kWh	Ιδιωτικότητα και ασφάλεια δεδομένων [14] [2]	Συμμόρφωση με τους κανονισμούς για ιδιωτικότητα και ασφάλεια των δεδομένων	-*
Ενσωμάτωση ΑΠΕ [1]	Ποσότητα ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ	kWh	Διαφάνεια στην αλυσίδα εφοδιασμού [10]	Επίπεδο διαφάνειας σχετικά με την ποιότητα και την προέλευση	-*
Αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων [5] [17]	Ποσότητα ορυκτών καυσίμων που αντικαθίσταται από RES στο ενεργειακό μίγμα	kg or kWh	Προμήθεια από αμφιλεγόμενες πηγές [14]	Προέλευση υλικών/προϊόντων (από επιβλαβείς ή ανήθικες πρακτικές)	-*
Μεταφορικές διαδικασίες [17]	Καταναλώσεις σχετιζόμενες με μετακινήσεις (π.χ. ενέργεια)	DOC	Ευθύνη εφοδιαστικής αλυσίδας [5]	Νομική ευθύνη της εταιρείας για ενέργειες ή ελλείψεις	-*
Πράσινη εφοδιαστική αλυσίδα [7]	Εκπομπές λόγω logistics (αποθήκη & μετακινήσεις)	kg	Ικανοποίηση πελατών [14]	Επίπεδο ικανοποίησης των πελατών από τη χρήση του προϊόντος	-*
Απόβλητα εφοδιαστικής αλυσίδας [12]	Ποσότητα διανεμημένων πλαστικών	kg	Ικανοποίηση υπαλλήλων [14]	Επίπεδο ικανοποίησης των εργαζομένων στην εταιρεία	-*
Ρυθμός ανακύκλωσης [10]	Ποσότητα πλαστικών που ανακυκλώνεται	kg	Πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας [14] [2]	Επίπεδο πρόσβασης των εργαζομένων σε υγειονομική περίθαλψη	-*
Χρήση βιοαποικοδομήσιμων υλικών	Ποσότητα παραγόμενων ή χρησιμοποιούμενων βιοδιασπώμενων υλικών	kg	Πρόσβαση σε χρηματοδότηση [14] [2]	Επίπεδο πρόσβασης σε εξωτερική χρηματοδότηση	-*
Υλικά και απόβλητα συσκευασιών [1]	Ποσότητα αποβλήτων από υλικά συσκευασίας	kg	Ισορροπία εργασίας-προσωπικού χρόνου [2]	Επίπεδο ισορροπίας μεταξύ εργασίας και προσωπικού χρόνου	-*
Ηλεκτρονικά απόβλητα [2]	Ποσότητα ηλεκτρονικών αποβλήτων	kg			
Υπολείμματα/υλικά προς ανακύκλωση [2]	Ποσότητα υπολειμμάτων/απορριμμάτων	kg			

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Χρήση πόρων [10]	Ποσοστό χρήσης μη ανανεώσιμων πηγών κατά μήκος της αλυσίδας	%			
Κατανάλωση πρώτων υλών [14]	Κατανάλωση (παρθένων) πρώτων υλών	kg			
ISO22400 για τη μεταποιητική βιομηχανία [16]	Πιστοποίηση της βιομηχανίας κατά ISO22400	-			
ISO59020 για τη μέτρηση και αξιολόγηση της κυκλικότητας	Πιστοποίηση της βιομηχανίας κατά ISO59020	-			
Δείκτες Διακυβέρνησης			Δείκτες Παραγωγικότητας και Ανάπτυξης		
Ποικιλομορφία διοικητικού συμβουλίου [2]	Διαφοροποίηση στο υπόβαθρο και τις δεξιότητες του διοικητικού συμβουλίου	-*	Μερίδιο αγοράς [3]	Ποσοστό των πωλήσεων του προϊόντος επί του συνολικού στην αγορά για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα	%
Ανταγωνιστικές πρακτικές [2]	Αριθμός πρακτικών για την απόκτηση πλεονεκτήματος στην αγορά	No	Αξιοποίηση κεφαλαίων ²⁹	Χρήση ιδίων κεφαλαίων για δημιουργία εσόδων	%
Φορολογική διαφάνεια [2]	Συχνότητα φορολογικών πληρωμών με διαφανείς/ανοιχτές διαδικασίες	No	Καθαρές μειώσεις κόστους από κυκλικές δραστηριότητες	Εκτίμηση εξοικονόμησης από κυκλικές δραστηριότητες	€
Επιχειρηματική ηθική [2]	Αριθμός πρακτικών για τη διασφάλιση ηθικών αρχών	No	Απόκτηση πελατών [3]	Αριθμός νέων εισερχόμενων πελατών ανά έτος	No
Έξοδα και πρόστιμα σε/από δικαστικές διαδικασίες ¹⁴	Έξοδα και πρόστιμα που σχετίζονται με αντιανταγωνιστική συμπεριφορά, αντιμονοπωλιακές πρακτικές	€	Διατήρηση πελατών ¹²	Ποσοστό πελατών που διατηρούνται, ανά έτος	%
Πληρωμές λόγω κινδύνων για δικαστικές διενέργειες ¹³	Πληρωμές για την αντιμετώπιση δικαστικών περιστατικών	€	Κερδοφορία πελατών ²⁹	Εκτίμηση καθαρού κέρδους από μεμονωμένους πελάτες	€
Ποσοστό εσόδων σε περιοχές (όπως ορίζεται από την Διεθνή Διαφάνεια) ^{30, 14}	Ποσοστό εσόδων σε περιοχές με διαφθορά	%	Διατήρηση υπαλλήλων ²⁹	Ποσοστό υπαλλήλων που παραμένουν ή αποχωρούν, ανά έτος	No
			Αύξηση παραγωγικότητας ²⁹	Αύξηση παραγωγής ανά μονάδα εισοδήματος, για συγκεκριμένη χρονική περίοδο	%
			Αύξηση εσόδων ²⁹	Αύξηση εσόδων από πωλήσεις, για συγκεκριμένη χρονική περίοδο	%
			Compound Annual Growth Rate (CAGR) ¹⁵	Ρυθμός αύξησης επενδύσεων για περίοδο >1 έτους ¹⁶	%

*No unit, qualitative data from questionnaires/interviews/reports

Σε επόμενο στάδιο, και με βάση τις προτιμήσεις της βιομηχανίας, έγινε η ανάλυση της σύνδεσης των KPIs με τις διεργασίες (connected processes), ο τρόπος υπολογισμού του κάθε KPI, καθώς και ο τύπος του υπολογισμού. Στη συνέχεια καθορίστηκαν οι εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές, καθώς και οι παράμετροι εισόδου και εξόδου για κάθε μία από τις διεργασίες. Στον Πίνακα 6, για λόγους εξοικονόμησης χώρου, παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένοι δείκτες και η ανάλυσή τους.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

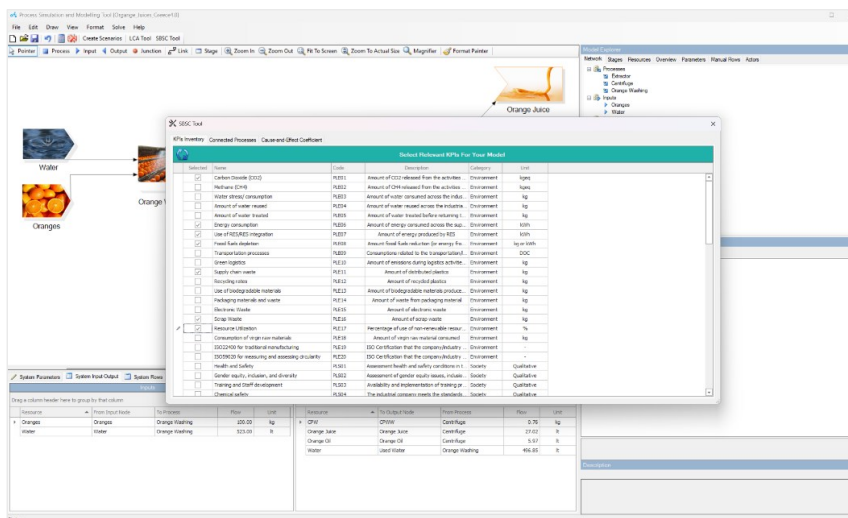
Πίνακας 6: Ανάλυση των KPI ανά διεργασία, καθορισμός μεταβλητών και συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών

Όνομασία Δείκτη	Κατηγορία Δείκτη	Άμεσα επηρεαζόμενοι δείκτες	Άμεσα συνδεδεμένες διεργασίες	Τρόπος υπολογισμού
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	Περιβάλλον	PLE06, PLE11, PLE17, PLES08	Εξαγωγή, Φυγοκέντρηση, Λύματα υπολειμμάτων πορτοκαλιών, Διεργασία παραγωγής λικέρ, Διεργασία παραγωγής μελάσας, Ξήρανση	Από το εργαλείο PSM
Κατανάλωση νερού	Περιβάλλον	PLE03, PLE04, PLE05, PLGR06	Εξαγωγή, Φυγοκέντρηση, Λύματα υπολειμμάτων πορτοκαλιών	Από το εργαλείο PSM
Κατανάλωση ενέργειας	Περιβάλλον	PLE01, PLE02, PLE03, PLE04, PLE05	Εξαγωγή, Φυγοκέντρηση, Λύματα υπολειμμάτων πορτοκαλιών, Διεργασία παραγωγής λικέρ, Διεργασία παραγωγής μελάσας, Ξήρανση	Από το εργαλείο PSM
Υγεία και Ασφάλεια	Κοινωνία	PLE19	Ποιοτικός υπολογισμός από έρευνες/ερωτηματολόγια	Σταθερή τιμή στο PSM (από ερωτηματολόγιο)
Ασφάλεια και ποιότητα προϊόντος	Κοινωνία	PLE19, PLE20	Ποιοτικός υπολογισμός από έρευνες/ερωτηματολόγια	Σταθερή τιμή στο PSM (θέτοντας κατάφλι τιμής)
Ικανοποίηση πελατών	Κοινωνία	PLS03, PLS05, PLS07, PLGR02, PLEG05, PLEG09	Ποιοτικός υπολογισμός από έρευνες/ερωτηματολόγια	Σταθερή τιμή στο PSM (από ερωτηματολόγιο)
Ικανοποίηση υπαλλήλων	Κοινωνία	PLS01, PLS03, PLS14, PLEG09	Ποιοτικός υπολογισμός από έρευνες/ερωτηματολόγια	Σταθερή τιμή στο PSM (από ερωτηματολόγιο)

Το επόμενο βήμα, περιλάμβανε την ανάπτυξη των μοντέλων (καθορισμός μεταβλητών και εξισώσεων), την εισαγωγή τους στο PSM και την εκτέλεση των μοντέλων στο Circular SBSC module, για υπολογισμό των επιλεγμένων KPIs, καθώς και των συντελεστών που απεικονίζουν την επίδραση του κάθε KPI στις επιμέρους διεργασίες, αλλά και στο σύνολο της αλυσίδας. Τα αποτελέσματα της ενδιάμεσης αυτής λύσης, παρουσιάζονται στην ενότητα που ακολουθεί.

2.9.4 Παραδείγματα χρήσης και παρουσίαση υλικού ενδιάμεσης έκδοσης

Σε αυτό το στάδιο της τεχνικής λύσης, οι μοντελοποιήσεις τις αλυσίδας έχουν ολοκληρωθεί και τα αποτελέσματα έχουν εξαχθεί, όπως επίσης η ανάπτυξη του εργαλείου SBSC (Εικόνα 71). Το εργαλείο, όπως αναφέρθηκε στην αρχιτεκτονική της λύσης, είναι ενσωματωμένο στο PSM Tool, και αποτελείται από τρεις αυτόνομες καρτέλες. Η πρώτη αποτελεί το KPI Inventory, όπου παρουσιάζονται σε λίστα όλα τα KPIs από όλες τις κατηγορίες (περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία & διακυβέρνηση). Η επιλογή των δεικτών για υπολογισμό σε αυτό το στάδιο, έγινε μετά από επιλογή της βιομηχανίας.



Εικόνα 71: SBSC Tool & KPI Inventory Tab

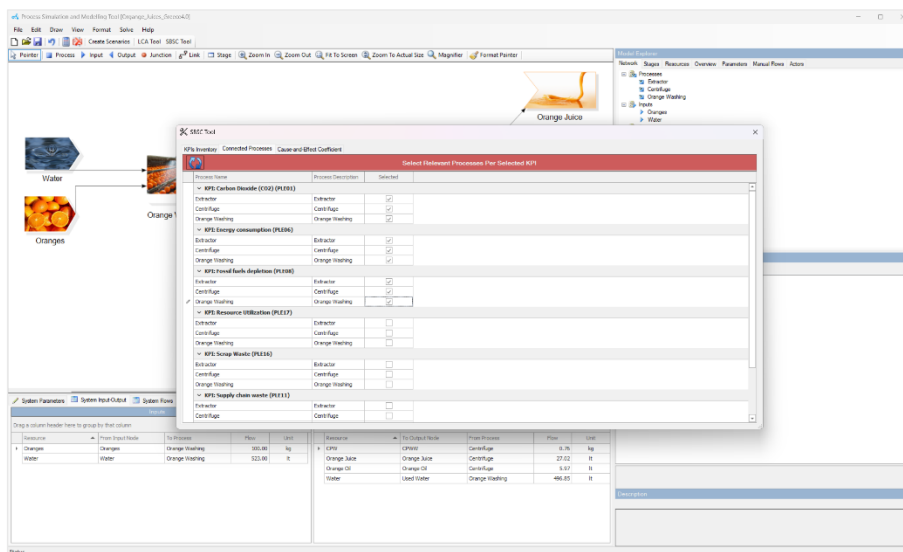
Επόμενο βήμα είναι η διασύνδεση του κάθε KPI ξεχωριστά, με τις επιμέρους διεργασίες της αλυσίδας. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ένα KPI που έχει επιλεχθεί, επιλέγονται όλες οι διεργασίες της αλυσίδας στις οποίες ο

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

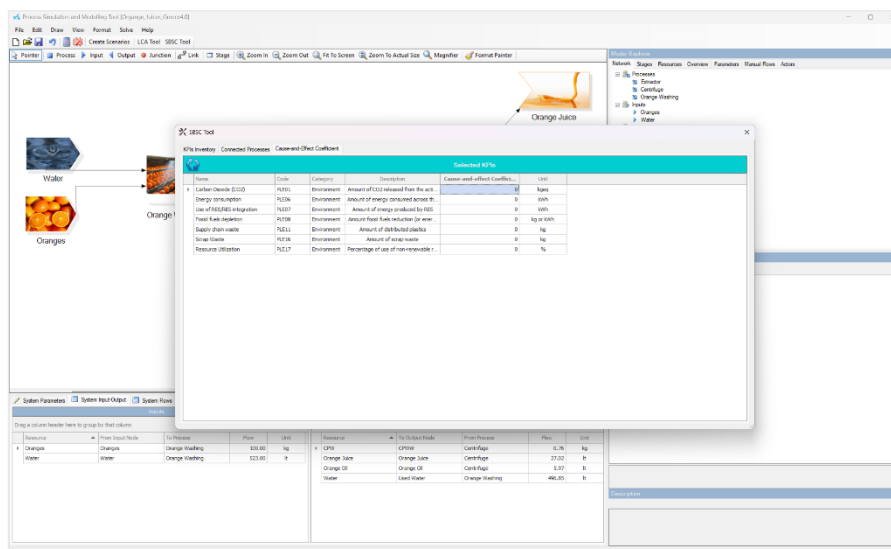
συγκεκριμένος δείκτης υπολογίζεται και επηρεάζει/συμβάλλει στη διεργασία (Εικόνα 72). Μόλις ολοκληρωθεί η διασύνδεση KPIs-processes, και έπειτα από τη διαμόρφωση του μοντέλου (μέσω script) για τον υπολογισμό δεικτών και coefficients, το μοντέλο εκτελείται ξανά, και έτσι στην τελευταία καρτέλα του SBSC module, έχουμε τα αποτελέσματα. Στην Εικόνα 73 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα των KPIs & coefficients, τα αποτελέσματα των οποίων, ωστόσο, θα ελεγχθούν και αναθεωρηθούν για την παρουσίαση της τελικής λύσης.

Το επόμενο στάδιο της ενδιάμεσης αυτής λύσης, αποτελεί την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την παρουσίασή τους με φιλικό προς το χρήστη τρόπο, καθώς και η διερεύνηση της διασύνδεσης του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος, η οποία είναι σε εξέλιξη. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του μοντέλου και του SBSC module, μεταφέρονται μέσω του API του PSM σε web-based χώρο, στον οποίο θα απεικονίζονται τα αποτελέσματα, με άμεσο και ευδιάκριτο τρόπο. Οι μακέτες για την οπτικοποίηση θα παρουσιαστούν στην επόμενη υποενότητα.

Η ανάπτυξη του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος και τα θέματα της αρχιτεκτονικής και διασύνδεσής του με τα εργαλεία που έχουν ήδη αναπτυχθεί, θα αποτελέσει εργασία που θα παρουσιαστεί στην τελική έκδοση της τεχνικής αυτής λύσης.



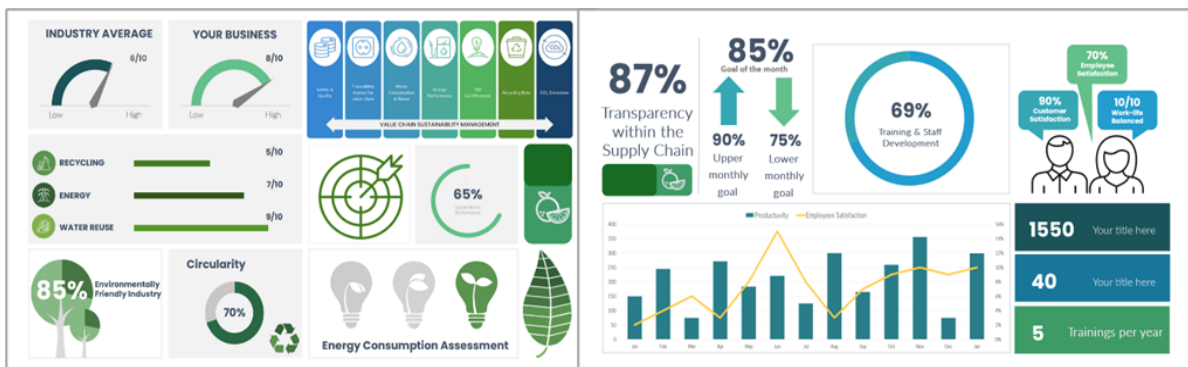
Εικόνα 72: SBSC Tool & Process Per Selected KPI Tab



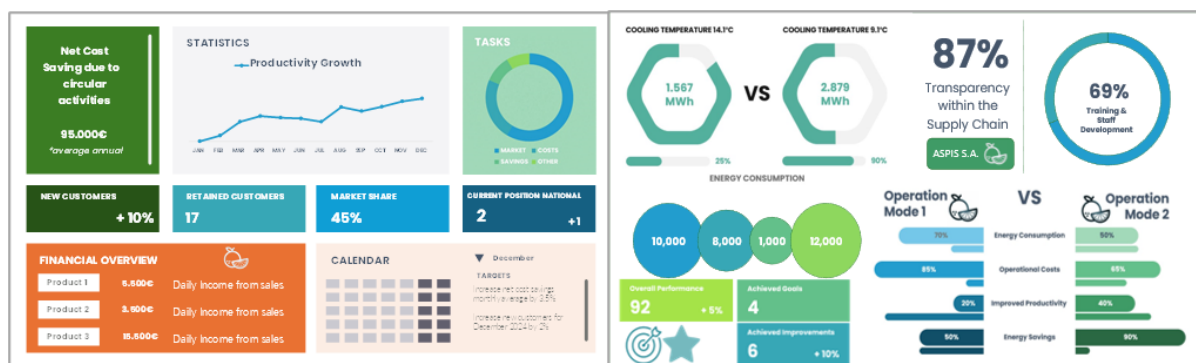
Εικόνα 73: SBSC Tool & Results Tab

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων που αφορούν την αξιολόγηση της αλυσίδας σε περιβαλλοντικό, κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο, καθώς και σε επίπεδο διακυβέρνησης, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.9.4, είναι το τελικό στάδιο της ενδιάμεσης αυτής έκδοσης. Στην Εικόνα 74 και Εικόνα 75, παρουσιάζονται οι «μακέτες» που έχουν ήδη δημιουργηθεί, και θα αποτελούν μέρος του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος. Στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ της εικόνας/απόδοσης της βιομηχανίας/αλυσίδας ως business as usual/as-is, και μετά από τροποποιήσεις σε λειτουργικές παραμέτρους ή ενέργειες της βιομηχανίας ως προς την κυκλικότητα ή/και τη βιωσιμότητα.



Εικόνα 74: Οπτικοποιήσεις αποτελεσμάτων (αρχικές) για περιβαλλοντικούς δείκτες (αριστερά) και κοινωνικούς (δεξιά) στο Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντων



Εικόνα 75: Οπτικοποιήσεις αποτελεσμάτων (αρχικές) για οικονομικούς δείκτες (αριστερά) και συγκριτικό (δεξιά)

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

2.10.a.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

Η ανάπτυξη του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων περιλαμβάνει τις ακόλουθες δραστηριότητες:

Ενσωμάτωση αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης: Η ενσωμάτωση αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης έχει ολοκληρωθεί και παρουσιάζεται στην παρούσα Ενότητα. Οι αλγόριθμοι 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).

Υπηρεσίες ενοποίησης δεδομένων: Οι υπηρεσίες ενοποίησης δεδομένων έχουν ολοκληρωθεί και έχουν ενσωματωθεί στην αρχιτεκτονική του συστήματος, όπως περιγράφεται στην παρούσα Ενότητα. Το σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων υποστηρίζει διάφορους τύπους δεδομένων. Για να υποστηριχθούν οι

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

ανάγκες αποθήκευσης δεδομένων, περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες αποθήκευσης: Αποθήκη Δεδομένων, Βιβλιοθήκη Αλγορίθμων, Βάση Δεδομένων Ανάλυσης και Βάση Μοντέλων.

Αυτοματοποιημένη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων αναλυτικής δεδομένων: Η υλοποίηση της αυτοματοποιημένης οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων αναλυτικής δεδομένων είναι υπό εξέλιξη. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ενδιάμεσα αποτελέσματα από την υλοποίηση της οπτικοποίησης, σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα των αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης.

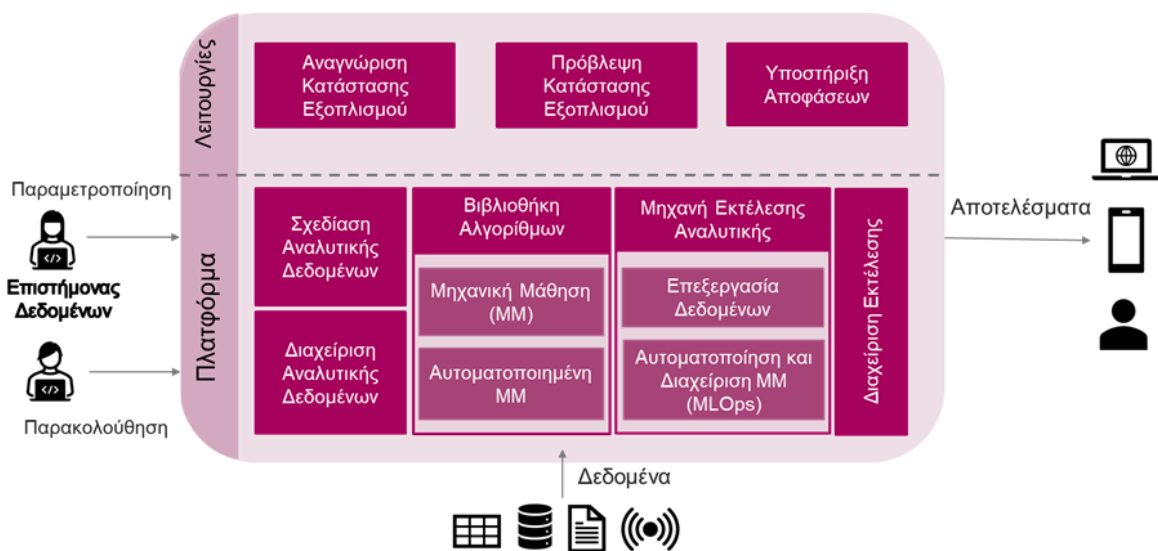
Ενσωμάτωση διαφορετικών μεθόδων AutoML: Η ανάπτυξη και ενσωμάτωση μεθόδων Αυτοματοποιημένης Μηχανικής Μάθησης (Automated Machine Learning – AutoML) είναι σε εξέλιξη. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η τεχνική αρχιτεκτονική που μπορεί να ενσωματώσει την ροή πληροφοριών με βάση τη λογική του AutoML. Στο επόμενο Παραδοτέο, θα παρουσιάσουμε τις μεθόδους και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους.

Υλοποίηση διασύνδεσης με πηγές δεδομένων πραγματικού χρόνου: Η διασύνδεση με πηγές δεδομένων πραγματικού χρόνου είναι σε εξέλιξη. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η τεχνική αρχιτεκτονική που διαθέτει τις διεπαφές και τα δομικά στοιχεία για την διασύνδεση και επεξεργασία δεδομένων πραγματικού χρόνου. Στο επόμενο Παραδοτέο θα παρουσιάσουμε την υλοποίηση και τα αποτελέσματα από την επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Ενισχυτική Μάθηση για πρόβλεψη φθοράς εξοπλισμού: Η δραστηριότητα αυτή αφορά την εφαρμογή των αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης της πλατφόρμας σε περιπτώσεις χρήσης φθοράς εξοπλισμού. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα από την εφαρμογή.

Αναλυτική δεδομένων από αισθητήρες δόνησης για πρόβλεψη βλαβών με AutoML: Η εφαρμογή μεθόδων AutoML για προβλέψεις βλαβών είναι σε εξέλιξη και τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στο επόμενο Παραδοτέο.

2.10.a.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης



Εικόνα 76: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει την αρχιτεκτονική του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τα εξής υποσυστήματα:

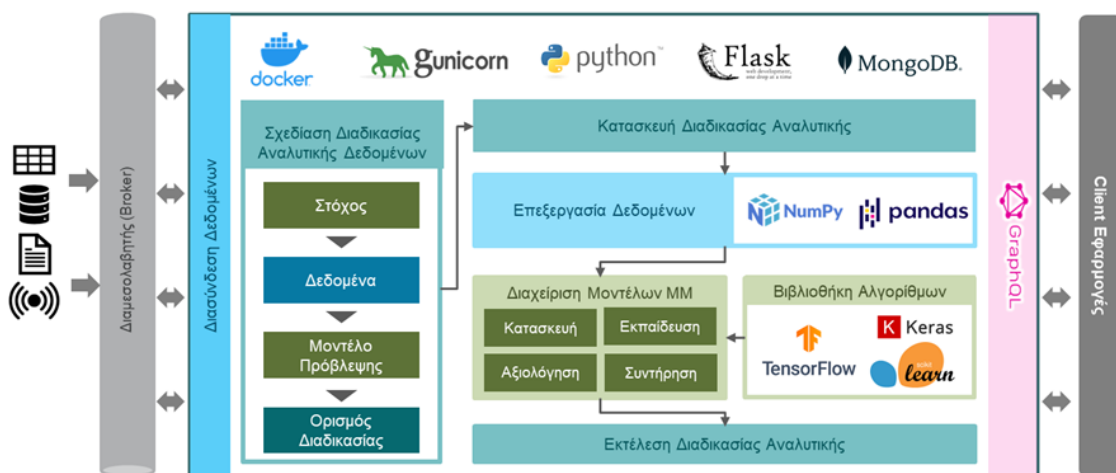
- Σχεδίαση Αναλυτικής Δεδομένων: ο αναλυτής δεδομένων σχεδιάζει και διαμορφώνει την ανάλυση.

- 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: Αποθήκη Δεδομένων, Βιβλιοθήκη Αλγορίθμων, Βάση Δεδομένων Ανάλυσης και Βάση Μοντέλων.

2.10.a.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε συνοπτικά την υλοποίηση της προτεινόμενης προσέγγισης με τη μορφή μιας αυτόνομης διαδικτυακής εφαρμογής, ακολουθώντας την τεχνική αρχιτεκτονική που απεικονίζεται στην εικόνα παρακάτω. Αυτή η αρχιτεκτονική υποστηρίζει την υλοποίηση πολλών και 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 77: 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.

2.10.a.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Σε αυτή την διάταξη, ο πρωταρχικός στόχος είναι η πρόβλεψη της φθοράς, η οποία 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 αλγορίθμους Ενισχυτικής Μάθησης (Reinforcement Learning – 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 υπο βέλτιστες 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.

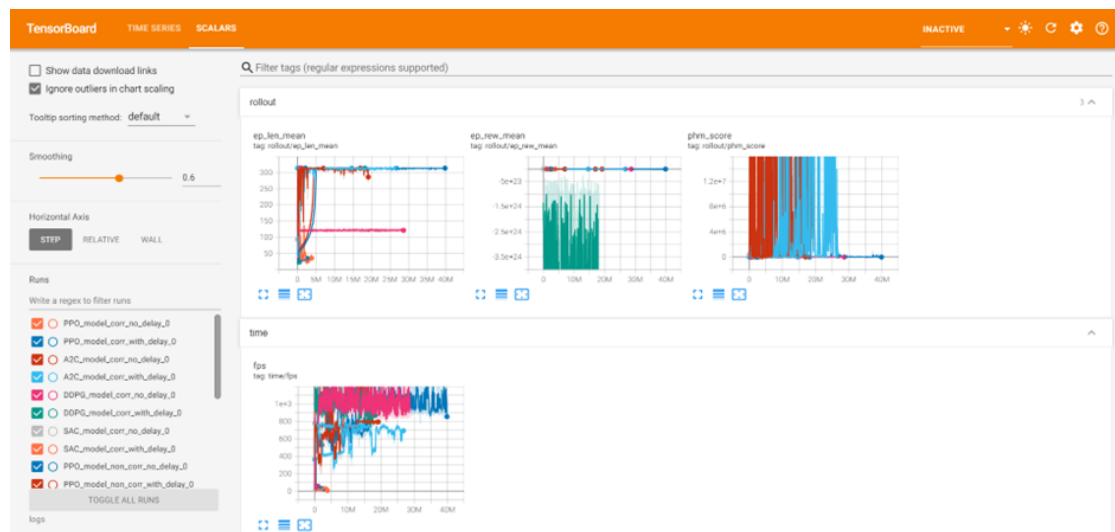
Το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των μοντέλων, προέρχεται από μια φρέζα υψηλής ταχύτητας Computer Numerical Control (CNC) και αφορά την φθορά των κοπτικών εργαλείων από βολφραμικό καρβίδιο της φρέζας. Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει έξι αρχεία κοπτικών εργαλείων, από c1 (cutter 1) έως c6. Κάθε αρχείο εκπαίδευσης περιέχει ένα αρχείο "wear" που καταγράφει τη φθορά μετά από κάθε κοπή σε χιλιοστά (10^{-3} m) και ένα φάκελο με 315 αρχεία δεδομένων από τους αισθητήρες, το καθένα για κάθε κοπή. Οι παράμετροι των κοπτικών εργαλείων ήταν: ταχύτητα ατράκτου 10400 RPM, ταχύτητα προώθησης 1555 mm/min, βάθος κοπής Y (ακτινικό) 0.125 mm και βάθος κοπής Z (αξονικό) 0.2 mm. Τα δεδομένα αποκτήθηκαν με συχνότητα 50 KHz ανά κανάλι. Τα αρχεία δεδομένων κοπής περιέχουν επτά στήλες που αντιστοιχούν σε:

1. Δύναμη (N) στη διάσταση X
2. Δύναμη (N) στη διάσταση Y
3. Δύναμη (N) στη διάσταση Z
4. Δόνηση (g) στη διάσταση X
5. Δόνηση (g) στη διάσταση Y
6. Δόνηση (g) στη διάσταση Z
7. AE-RMS (V)

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

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

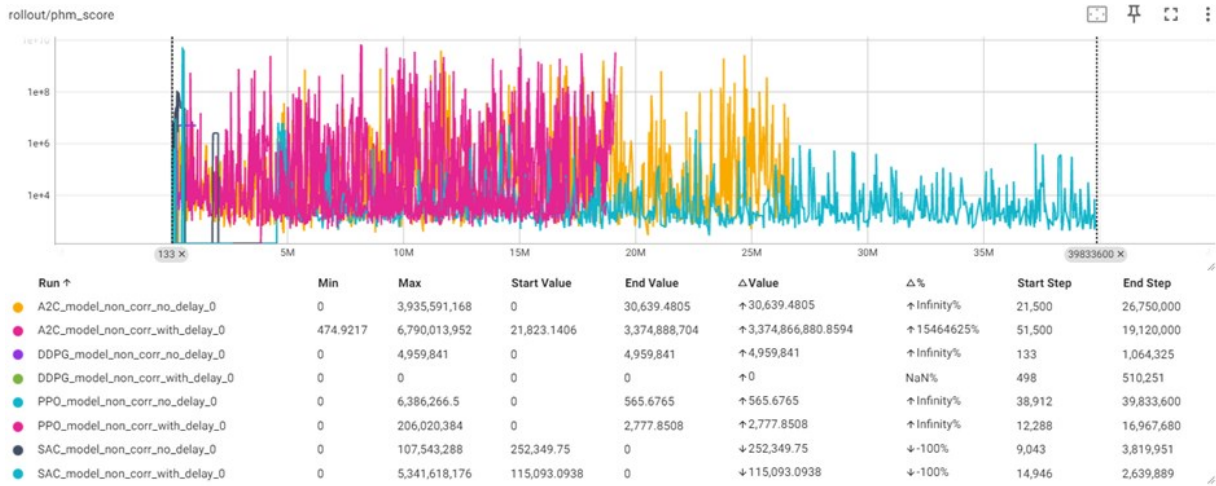
καθορισμένο αριθμό χρονικών βημάτων. Η υλοποιημένη λύση εφαρμόζει δύο μεθόδους πρόβλεψης: (α) Διορθωτική Πρόβλεψη: Οι προβλέψεις του παράγοντα διορθώνονται βάσει των πραγματικών τιμών φθοράς, (β) Μη Διορθωτική Πρόβλεψη: Οι προβλέψεις ενημερώνονται σταδιακά βάσει των προηγούμενων προβλέψεων. Επίσης, εφαρμόζει 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. 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 παρακάτω εικόνα.



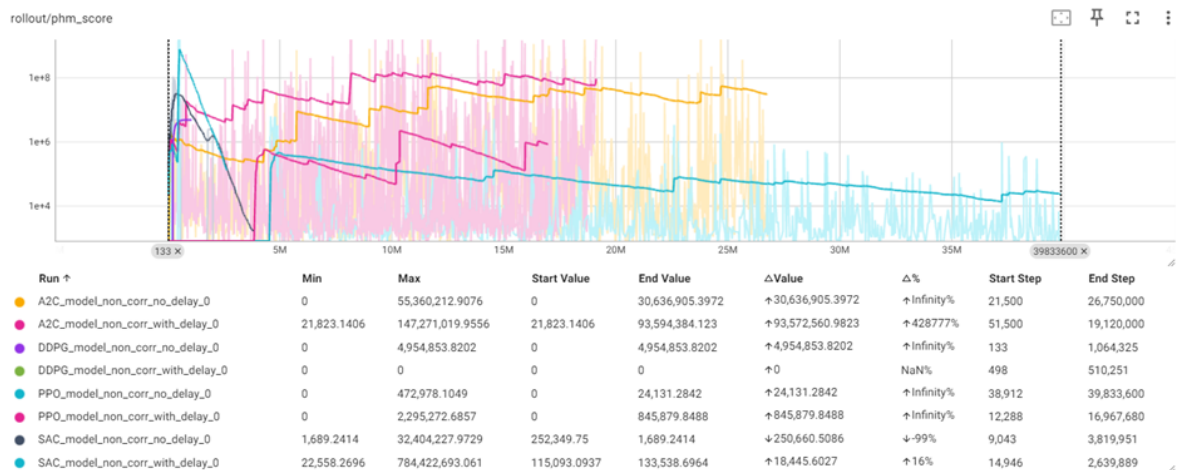
Εικόνα 78: Προεπισκόπηση της διεπαφής χρήστη του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

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. 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 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.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 79: Αξιολόγηση απόδοσης των RL αλγορίθμων για προβλεπτική αναλυτική δεδομένων ανά timestep.



Εικόνα 80: 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 υπερικχύει 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.

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

2.10.b.1 Στάδια υλοποίησης

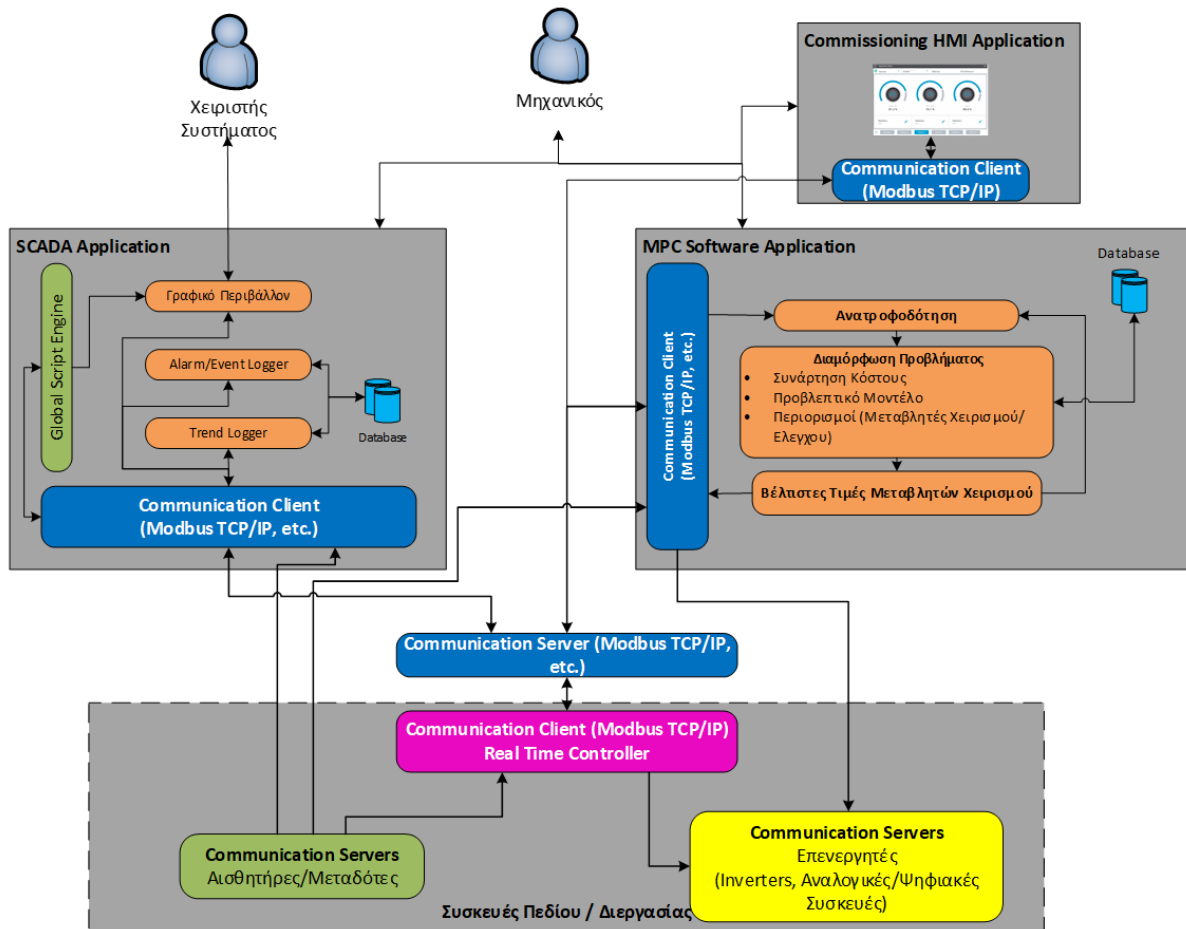
Η ανάπτυξη της εν λόγω λύσης επιμερίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια:

1. Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης με δεδομένα από το πεδίο: Στο στάδιο αυτό που έχει ολοκληρωθεί, έγινε χρήση τεχνολογιών μηχανικής μάθησης με στόχο την αξιοποίηση δεδομένων που συλλέγονται από το πεδίο για την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων που μπορούν να περιγράψουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος προς μελέτη.
2. Ενσωμάτωση μη γραμμικών μοντέλων στον αλγόριθμο MPC: Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου βασίζεται στην τεχνολογία προβλεπτικού ελέγχου (MPC, Model Predictive Control) στην οποία ο ελεγκτής χρησιμοποιεί ένα εσωτερικό μοντέλο για προβλέψει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος στη διάρκεια ενός κυλιόμενου ορίζοντα πρόβλεψης. Στο στάδιο αυτό, διαμορφώθηκε κατάλληλος κώδικας για την λειτουργία του συστήματος ώστε να μπορεί να ενσωματώσει μη γραμμικά προβλεπτικά μοντέλα αλλά και να βρίσκεται σε θέση να διαχειριστεί σύνθετους περιορισμούς των μεταβλητών εισόδου και εξόδου 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 διάυλο επικοινωνίας ο οποίος 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 διάυλος επικοινωνίας θα χρησιμοποιείται και για τη διασύνδεση του ελεγκτή με την εφαρμογή εποπτικού ελέγχου HMI.
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).

2.10.b.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης 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 81 όπου εντοπίζουμε τα επιμέρους υποσυστήματα:

- Εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή (MPC, ολοκληρώθηκε)
- Δικτυακός εξυπηρετητής για την επικοινωνία με συσκευές πεδίου & την εφαρμογή εποπτικού ελέγχου HMI (ολοκληρώθηκε)
- Εφαρμογή εποπτικού ελέγχου (Commissioning HMI) (σε εξέλιξη)
- Εφαρμογή κεντρικού εποπτικού ελέγχου (SCADA) (θα αναπτυχθεί στην τελική έκδοση της λύσης)



Εικόνα 81: Αρχιτεκτονική του συστήματος

2.10.b.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

1. Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου:

Στα πλαίσια της συνολικής διαμόρφωσης του σχήματος ελέγχου, η συγκεκριμένη λύση προτείνει την αξιοποίηση νευρωνικών δικτύων ακτινικής βάσης (δίκτυα radial basis functions, RBF) στο ρόλο των προβλεπτικών μοντέλων που ενσωματώνουν οι ρυθμιστές MPC. Τα δίκτυα RBF, λόγω της απλής δομής και της ευελιξίας τους, προσφέρονται προς χρήση σε πλήθος εφαρμογών που αφορούν, μεταξύ άλλων, προσεγγίσεις συναρτήσεων, προβλέψεις χρονοσειρών, ταξινόμηση και παλινδρόμηση.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από εικονικό περιβάλλον στο MATLAB όπου ένα λεπτομερές δυναμικό μοντέλο προσομοιώνει την συμπεριφορά ενός συστήματος παραγωγής νανοσωματιδίων Ag μέσα από μια σειρά 5 αντιδραστήρων εμβολικής ροής PFR (Plug Flow Reactor). Για το σύνολο εκπαίδευσης χρησιμοποιείται το 60% του αρχικού συνόλου των δεδομένων και το υπόλοιπο 40% μοιράζεται εξίσου στα σύνολα επικύρωσης κι ελέγχου.

2. Ενσωμάτωση μη γραμμικών μοντέλων στον αλγόριθμο MPC:

Για τη διαμόρφωση του σχήματος ελέγχου, η προτεινόμενη λύση αξιοποιεί ρυθμιστές της κατηγορίας προβλεπτικού ελέγχου MPC. Αναλυτικότερα, ένας ρυθμιστής MPC χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο του συστήματος για να κάνει προβλέψεις σχετικά με τη μελλοντική συμπεριφορά του, λαμβάνοντας υπόψη τη γνώση από το παρελθόν (π.χ. προηγούμενες τιμές εισόδων u και εξόδων y). Βασισμένος σε αυτές τις πληροφορίες, υπολογίζει τη βέλτιστη ακολουθία ενεργειών για έναν προκαθορισμένο ορίζοντα πρόβλεψης, N_p κι έναν ορίζοντα ρύθμισης, N_c . Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον υπολογισμό των βέλτιστων ενεργειών κατά μήκος των οριζόντων λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς και στόχους. Τελικά, εφαρμόζεται μόνο

η πρώτη ενέργεια και η διαδικασία επαναλαμβάνεται δυναμικά σε κάθε χρονική στιγμή. Στα πλαίσια της εν λόγω λύσης, τη θέση του εσωτερικού μοντέλου παίρνει ένα νευρωνικό δίκτυο RBF. Έχοντας διαθέσιμο το προβλεπτικό μοντέλο, αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος του ρυθμιστή, αρχικά σε περιβάλλον MATLAB, με τη 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. Η αρχική διαμόρφωση του ρυθμιστή έγινε στο περιβάλλον του MATLAB με στόχο την αξιοποίηση του διαθέσιμου εικονικού συστήματος παραγωγής νανοσωματιδίων (plant). Στη συνέχεια, έγινε μεταφορά του αλγορίθμου στο περιβάλλον της ανοικτής γλώσσας προγραμματισμού, Python.

3. Διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων:

Για την ομαλή λειτουργία του συστήματος ελέγχου απαιτείται να υπάρχει διαρκής και απρόσκοπτη επικοινωνία του προβλεπτικού ελεγκτή καταρχήν με τις συσκευές του πεδίου όπως είναι οι αισθητήρες/μεταδότες, τελικοί επενεργητές του συστήματος ελέγχου αλλά και με τους προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC) της υφιστάμενης υποδομής ελέγχου.

Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε εφαρμογή η οποία βρίσκεται ενδιάμεσα από τα επιμέρους υποσυστήματα και η οποία 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 και με αυτόν τον τρόπο μπορούν να ανταλλάσσουν τις απαραίτητες πληροφορίες μεταξύ τους. Στη βασική του δομή το σύστημα εξυπηρετεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus TCP/IP, καθώς αποτελεί το πλέον διαδεδομένο στο χώρο της βιομηχανίας και του αυτοματισμού. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ωστόσο, μπορεί να υποστηρίξει και επιπλέον πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Η ύπαρξη του 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, χωρίς αυτή η διασύνδεση να είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του ίδιου του ελεγκτή. 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. 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.).

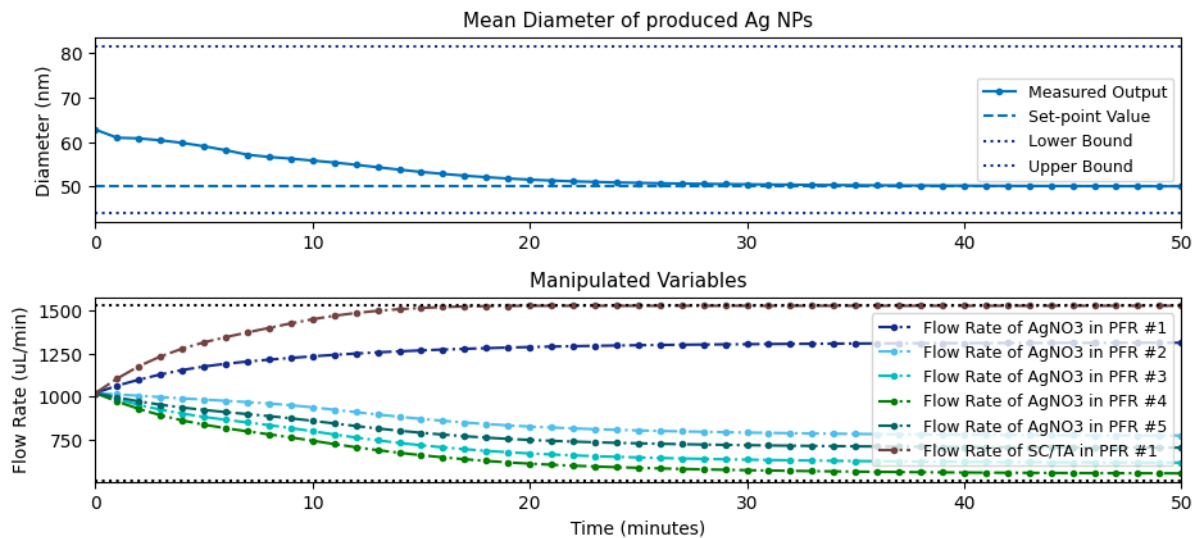
2.10.b.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Παρουσιάζεται η εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή MPC σε σύστημα παραγωγής νανοσωματιδίων. Το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από πέντε αντιδραστήρες εμβολικής ροής (plug flow reactor, PFR) σε σειρά, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση νανοσωματιδίων αργύρου (Ag). Συγκεκριμένα, 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. Στόχος της διεργασίας είναι η παραγωγή νανοσωματιδίων με συγκεκριμένες προδιαγραφές ποιότητας, που ορίζονται από την επιθυμητή μέση διάμετρο των παραγόμενων νανοσωματιδίων. Ως προβλεπτικό μοντέλο στη μεθοδολογία MPC χρησιμοποιήθηκε το νευρωνικό δίκτυο RBF με τους περισσότερους νευρώνες που προέκυψε από τη διαδικασία εκπαίδευσης. Οι

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

ροές τροφοδοσίας των εισερχόμενων διαλυμάτων στους πέντε αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές εκ χειρισμού.

Η εφαρμογή του MPC στη συγκεκριμένη διάταξη διασφαλίζει τον αποτελεσματικό έλεγχο της μέσης διαμέτρου των παραγόμενων νανοσωματιδίων. Στη γραφική παράσταση της Εικόνα 82 παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος σε περίπτωση αλλαγής της επιθυμητής τιμής (set-point tracking). Φαίνεται ότι επιτυγχάνεται ο στόχος της οδήγησης της μέσης διαμέτρου των παραγόμενων νανοσωματιδίων στην επιθυμητή τιμή-στόχο που ορίζει ο χρήστης. Η διαμόρφωση του προβλήματος χρειάζεται περίπου 30 δευτερόλεπτα σε περιβάλλον Google Colab ενώ η επίλυση για η προσομοίωση 50 λεπτών πραγματικού χρόνου απαιτεί λιγότερο από 50 δευτερόλεπτα υπολογιστικού χρόνου.



Εικόνα 82: 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 εγκαταστήσει στον Η/Υ που φιλοξενεί το μοντέλο προσομοίωσης μία ελεύθερη εφαρμογή που δημιουργεί έναν Modbus server στο μηχάνημα που αυτή εγκαθίσταται. Αυτός ο Modbus server είναι διαφορετικός από τον δικτυακό εξυπηρετητή, ο οποίος άλλωστε αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του λογικού ελεγκτή. 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 MPC.

Σε έναν άλλον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος θα πρέπει να βρίσκεται στο ίδιο τοπικό δίκτυο (φυσική ύπαρξη) 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 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 που ακολουθεί (Εικόνα 83) φαίνεται ένα στιγμιότυπο από τον Modbus server όπου φαίνονται και οι τιμές από την επίλυση του MPC, όπως αυτά εγγράφονται σε αυτόν.

#	Holding Registers		Inputs		Input Registers																
	Signed	Unsigned	Float		16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
400030	0	0	00000000		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400031	17571	17571	1311.54675292969		1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
400032	-3713	61823	7FF1A344		1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
400033	17486	17486	824.05419921875		0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
400034	888	888	78034E44		0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
400035	17445	17445	662.77001953125		1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
400036	-20152	45384	48812544		0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
400037	17429	17429	599.820007324219		1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
400038	-2949	62587	7BF41544		1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
400039	17464	17464	737.746337890625		0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
400040	28612	28612	C46F3844		0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
400041	17599	17599	1530.00793457031		1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
400042	16449	16449	4140BF44		1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
400043	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400044	0	0	00000000		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400045	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400046	0	0	00000000		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400047	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400048	0	0	00000000		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400049	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400050	0	0	00000000		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400051	16968	16968	50.2116317749023		0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
400052	-10058	55478	86D84842		0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0

Εικόνα 83: Στιγμιότυπο από τον Modbus Server με την εκτέλεση του MPC

2.11 Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής

Η παρούσα λύση εισάγει την έννοια των ψηφιακών διδύμων στον χώρο των intralogistics, προσφέροντας καινοτομία μέσω του συνδυασμού τους με μια πλατφόρμα στο νέφος για την ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων. Αυτή η λύση είναι προσιτή και υιοθετήσιμη, στοχεύοντας στην υποστήριξη των ελληνικών ΜΜΕ στον ψηφιακό τους μετασχηματισμό την επόμενη δεκαετία.

2.11.1 Στάδια υλοποίησης λύσης

Η λύση δομείται σε 3 κύρια στάδια υλοποίησης, τα οποία περιλαμβάνουν τις εξής 10 εργασίες:

Ψηφιακό δίδυμο:

- **Ολοκλήρωση και επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης.** Η εργασία αυτή περιλαμβάνει την καταγραφή και αποτύπωση της αποθηκευτικής διάταξης που βασίζεται σε αυτοματισμό Intralogistics, τη μοντελοποίηση της με εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης, καθώς και την επαλήθευση της ακρίβειας του μοντέλου.
- **Σύνδεση φυσικού και ψηφιακού συστήματος.** Αφορά την ανάπτυξη των απαραίτητων διασυνδέσεων για τη ψηφιακή διδυμοποίηση 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 συστήματος.
- **Εργαστηριακές δοκιμές λειτουργίας.** Σε αυτή την εργασία θα γίνουν δοκιμές σε εργαστηριακό περιβάλλον για την αξιολόγηση της απόδοσης και της ορθής λειτουργίας του ψηφιακού διδύμου.

Διαδικτυακή πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων:

- **Ανάπτυξη υποδομής της cloud-based πλατφόρμας.** Εμπεριέχει τη δημιουργία της απαραίτητης υποδομής για τη φιλοξενία των δυναμικών διαγραμμάτων (dashboards), τον μηχανισμό εισαγωγής δεδομένων, καθώς και την ανάπτυξη των αρχικών δυναμικών διαγραμμάτων.
- **Προσθήκη νέων Dashboard.** Αφορά τη δημιουργία επιπλέον δυναμικών διαγραμμάτων (Dashboard), για την ανάλυση και οπτικοποίηση των δεδομένων, προσφέροντας βελτιωμένη διαχείριση και εποπτεία των λειτουργιών.

- **Δημιουργία διασυνδέσεων για αυτοματοποιημένη είσοδο δεδομένων.** Σε αυτή την εργασία αναπτύσσονται οι διασυνδέσεις που επιτρέπουν την αυτόματη ροή δεδομένων από το αποθηκευτικό σύστημα προς την πλατφόρμα.
- **Ανάπτυξη μηχανισμού αποστολής ειδοποιήσεων.** Περιλαμβάνει την ανάπτυξη μηχανισμού ειδοποιήσεων που ενημερώνει τους υπεύθυνους για σφάλματα ή αποκλίσεις στη λειτουργία, παρέχοντας οδηγίες επίλυσης.

Σύνδεση ψηφιακού διδύμου με την πλατφόρμα:

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

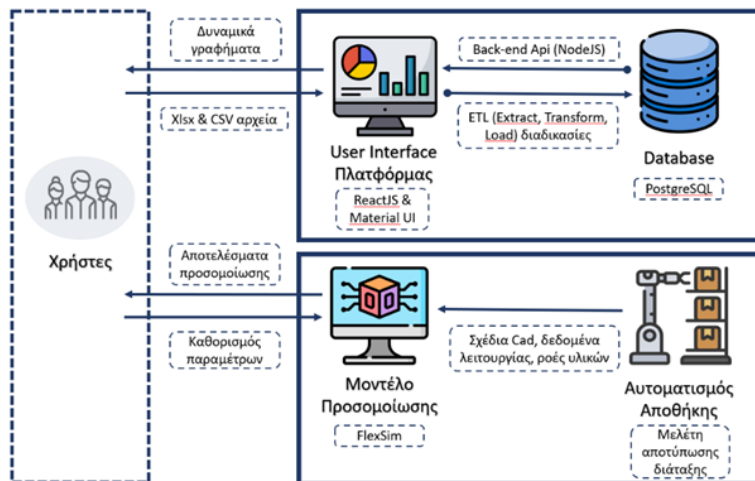
Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα παραδοτέα η συγκεκριμένη τεχνολογική λύση χωρίζεται σε δύο υποσυστήματα, το ψηφιακό δίδυμο και τη Πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων. Στους πρώτους 7 μήνες της ΕΕ2, η ανάπτυξη της λύσης επικεντρώθηκε, αφενός, στην απαιτητική εργασία της δημιουργίας προσομοιωτικού μοντέλου, που είναι το πρώτο και απαραίτητο βήμα για τη υλοποίηση της έννοιας του ψηφιακού διδύμου, και αφετέρου, στη δημιουργία υποδομής για την διαδικτυακή πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων. Στο δεύτερο ήμισυ της ΕΕ2, θα βελτιωθούν τα υπάρχοντα υποσυστήματα, καθώς και θα δημιουργηθούν οι διασυνδέσεις των υποσυστημάτων μεταξύ τους, καθώς και με τη συνολική λειτουργία της αποθηκευτικής διάταξης.

2.11.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της ενδιάμεσης έκδοσης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 84, αποτελείται από τρία κύρια μέρη:

- ο **Μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων:** Αυτό το μοντέλο μιμείται τη λειτουργία της αποθηκευτικής διάταξης, περιλαμβάνοντας αυτοματισμούς για την υποστήριξη των διαδικασιών intralogistics.
- ο **Cloud-based πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων:** Η πλατφόρμα αυτή επιτρέπει τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων από τις λειτουργίες της αποθήκης.
- ο **Τελικοί χρήστες:** Τα στελέχη της αποθήκης αλληλοεπιδρούν με τα δύο παραπάνω συστήματα, καθορίζοντας τις παραμέτρους της προσομοίωσης και λαμβάνοντας τα αποτελέσματα αυτής. Μέσω δυναμικών διαγραμμάτων, οι χρήστες μπορούν να αποκτούν πληροφορίες για τη λειτουργία της αποθήκης, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της απόδοσης και στη λήψη καλύτερων αποφάσεων.

Η αρχιτεκτονική της ενδιάμεσης έκδοσης θέτει τα θεμέλια για την εξέλιξή της προς την τελική της μορφή, καθώς περιλαμβάνει τα βασικά υποσυστήματα που θα διασυνδεθούν με την αποθηκευτική διάταξη και πιο συγκεκριμένα, με το εγκατεστημένο σύστημα διαχείρισης αποθήκης (WMS). Αυτό εξασφαλίζει την αυτοματοποιημένη ροή δεδομένων από το πραγματικό σύστημα προς τα ψηφιακά υποσυστήματα της λύσης.



Εικόνα 84: Αρχιτεκτονική Ενδιάμεσης Έκδοσης της Λύσης

2.11.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

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. Μετά την αρχική ανάπτυξη, το μοντέλο προσομοίωσης υποβλήθηκε σε διαδικασία επαλήθευσης για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης ανταποκρίνονται με ακρίβεια στις πραγματικές συνθήκες της αποθηκευτικής διάταξης. Επίσης, αναπτύχθηκαν κατάλληλες μέθοδοι στο λογισμικό που επιτρέπουν στους χρήστες να ορίζουν εύκολα τις παραμέτρους και δεδομένα λειτουργίας του συστήματος, όπως τον αριθμό παραλαβών και αποστολών, και να λαμβάνουν προσομοιωμένα αποτελέσματα λειτουργίας με βάση τις συνθήκες που έχουν ορίσει.

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 δεδομένων από αρχεία XLSX και CSV μέσω του πρωτοκόλλου HTTP, επιτρέποντας στους χρήστες να φορτώνουν δεδομένα εύκολα και γρήγορα. 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.

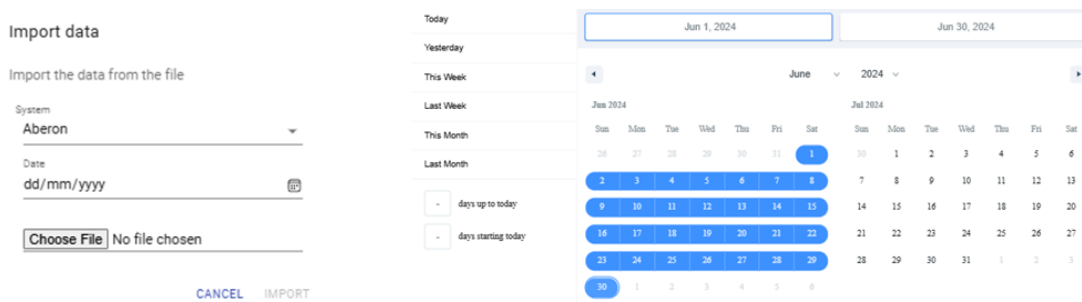
2.11.4 Ενδιάμεση έκδοση λύσης και αποτελέσματα

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης της διαδικτυακής πλατφόρμας και του μοντέλου προσομοίωσης, αναδεικνύοντας τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της ανάπτυξης της λύσης. Αρχικά, παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής και ανάλυσης δεδομένων στην πλατφόρμα, μέσω της οποίας τα οι χρήστες μπορούν να προσαρμόσουν την απεικόνιση και να εφαρμόσουν συγκεκριμένα φίλτρα για στοχευμένη παρακολούθηση των διαδικασιών. Στη συνέχεια, παρατίθεται η διαδικασία αλληλεπίδρασης με το μοντέλο προσομοίωσης μέσω του λογισμικού FlexSim, όπου ο χρήστης εισάγει τις επιθυμητές παραμέτρους λειτουργίας

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

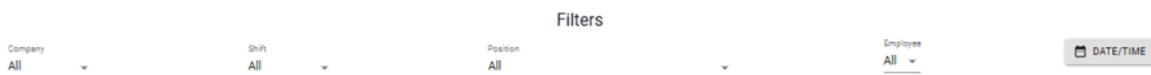
και ελέγχει τη ροή των λειτουργιών της αποθήκης σε εικονικό περιβάλλον. Τα παρακάτω στιγμιότυπα οθόνης παρέχουν μια συνολική εικόνα των λειτουργιών και των εργαλείων ανάλυσης της πλατφόρμας και του μοντέλου προσομοίωσης, προσφέροντας μια οπτική αναπαράσταση της τρέχουσας φάσης ανάπτυξης του συστήματος.

Αρχικά, η εισαγωγή δεδομένων στην πλατφόρμα πραγματοποιείται 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 85α). Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη ενσωμάτωση των δεδομένων στην πλατφόρμα για περαιτέρω ανάλυση. Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το χρονικό εύρος που τον ενδιαφέρει μέσω σχετικής επιλογής (Εικόνα 85β). Οι διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνουν προκαθορισμένα διαστήματα, όπως "Χθές", και τη δυνατότητα καθορισμού συγκεκριμένης περιόδου μέσω του ημερολογίου.



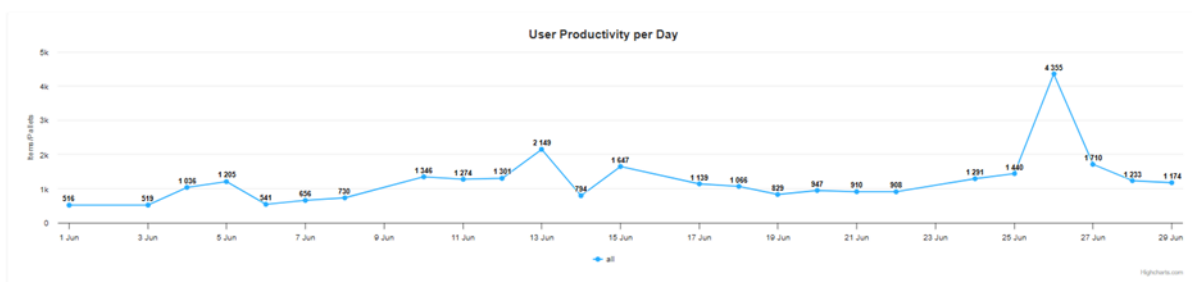
Εικόνα 85: Εισαγωγή Δεδομένων στην πλατφόρμα (α); Επιλογή Χρονικού Εύρους Δεδομένων (β)

Στη συνέχεια, τα δεδομένα μπορούν να φιλτραριστούν σύμφωνα με διαφορετικά κριτήρια, όπως η **εταιρεία ανάθεσης**, η **βάρδια**, η **θέση εργασίας** και ο **υπάλληλος**. Ο χρήστης έχει επίσης τη δυνατότητα να ορίσει συγκεκριμένο εύρος **ημερομηνιών/ωρών** προς απεικόνιση μέσω σχετικής επιλογής (Εικόνα 86). Αυτά τα φίλτρα επιτρέπουν την εξατομίκευση της προβολής των δεδομένων και την ευκολότερη εξαγωγή συμπερασμάτων.



Εικόνα 86: Διαθέσιμα Φίλτρα της πλατφόρμας

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 87, 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.

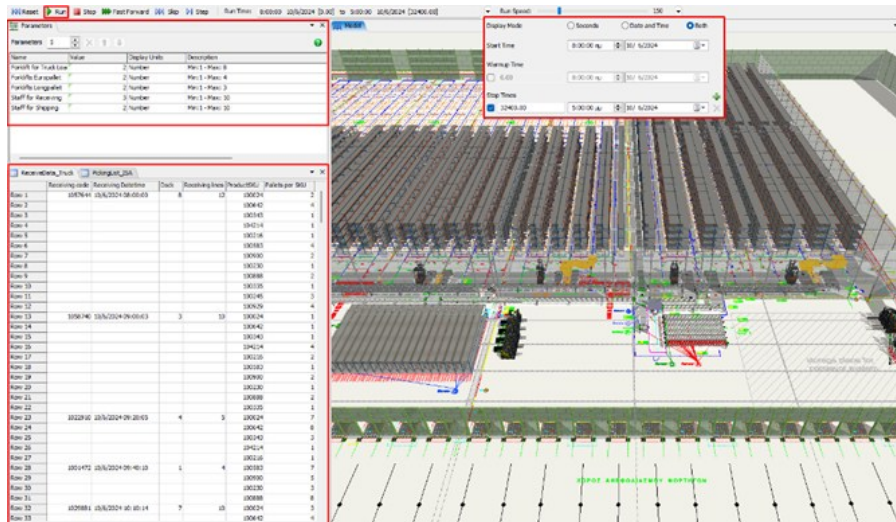


Εικόνα 87: Ημερήσια Παραγωγικότητα Εργαζομένων (Pick & Pack Data)

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

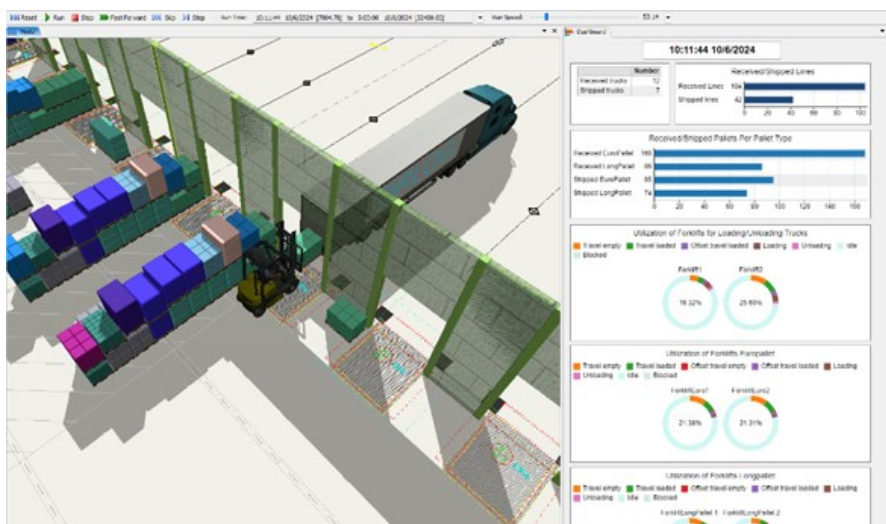
Στην τρέχουσα φάση ανάπτυξης, ο χρήστης αλληλοεπιδρά με το μοντέλο προσομοίωσης μέσω του λογισμικού **FlexSim**. Αρχικά, ανοίγει το μοντέλο στο FlexSim και εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα λειτουργίας, όπως τους πίνακες με τις προγραμματισμένες παραλαβές και αποστολές της αποθήκης. Επιπλέον, καθορίζει τις παραμέτρους λειτουργίας, οι οποίες προς το παρόν περιλαμβάνουν το πλήθος των περνοφόρων και τον αριθμό του προσωπικού που εργάζεται στη συγκεκριμένη αποθηκευτική διάταξη.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο χρήστης ορίζει το χρονικό διάστημα για το οποίο επιθυμεί να εκτελεστεί η προσομοίωση, επιλέγοντας την έναρξη και τη λήξη της περιόδου. Μόλις ολοκληρωθεί ο καθορισμός των παραμέτρων, δίνει εντολή για την έναρξη της προσομοίωσης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη διεπαφή του χρήστη στο FlexSim, με τις περιοχές εισαγωγής δεδομένων, ρύθμισης των παραμέτρων και καθορισμού του χρονικού πλαισίου.



Εικόνα 88: Εισαγωγή Δεδομένων και Καθορισμός Παραμέτρων Μοντέλου

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τη λειτουργία του μοντέλου της αποθήκης μέσω του ενσωματωμένου dashboard, το οποίο προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την αποδοτικότητα του συστήματος και τη χρήση των πόρων της αποθήκης. Στην Εικόνα 89 παρουσιάζεται το μοντέλο σε λειτουργία, όπου πραγματοποιείται η διαδικασία παραλαβής ενός φορτηγού, ενώ τα γραφήματα εμφανίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το καθορισμένο χρονικό διάστημα.

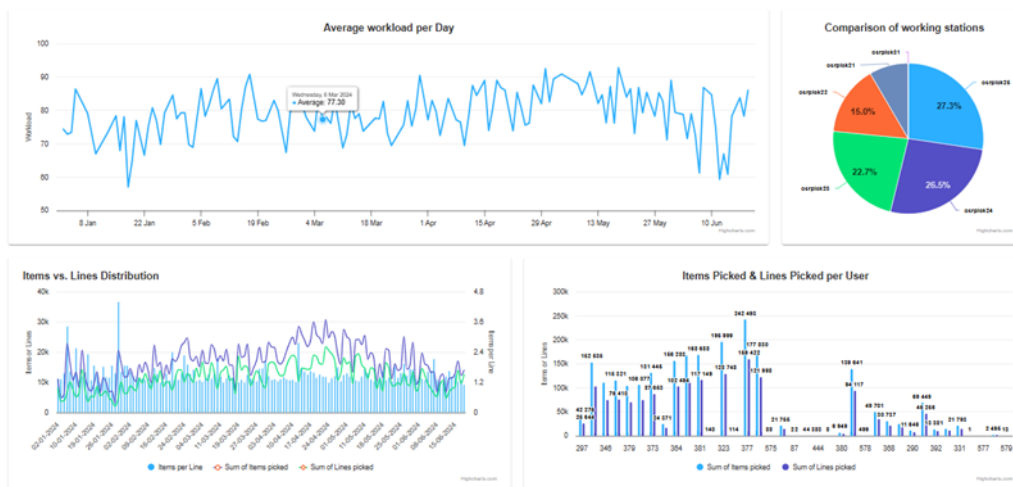


Εικόνα 89: Λειτουργία Μοντέλου και Αποτύπωση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Παρακάτω παρουσιάζεται επιπλέον υλικό και ενδιάμεσα αποτελέσματα από τη διαδικτυακή πλατφόρμα και το μοντέλο προσομοίωσης. Περιλαμβάνονται στιγμιότυπα οθόνης από τα διαθέσιμα dashboards που καταγράφουν την απόδοση της αποθήκης, καθώς και από τη λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης.

Όσον αφορά την πλατφόρμα, στην παρούσα φάση, έχουν δημιουργηθεί dashboards που αφορούν τα δεδομένα απόδοσης χειροκίνητων διαδικασιών εντός του αποθηκευτικού κέντρου. Με τη χρήση φίλτρων, τα οι χρήστες είναι σε θέση να λαμβάνουν εύκολα και γρήγορα μια ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας της αποθήκης. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 90, 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).



Εικόνα 90: Ημερήσια Δεδομένα Συλλογής (Daily Picking Data)

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 91, 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).

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 91: Δεδομένα Συλλογής & Συσκευασίας (Pick & Pack Data)

Τέλος, 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 x 0,8m) και τις Long (2m x 0,8m), και αποτελείται από ράφια παλετών, ραουλόδρομους, περιστρεφόμενα τραπέζια, βαγόνια μεταφοράς, ράουλα βαρύτητας καθώς και μη επανδρωμένα περονοφόρα στενού διαδρόμου (AGVs).



Εικόνα 92: Επισκόπηση Μοντέλου Προσομοίωσης Αποθηκευτικής Διάταξης

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

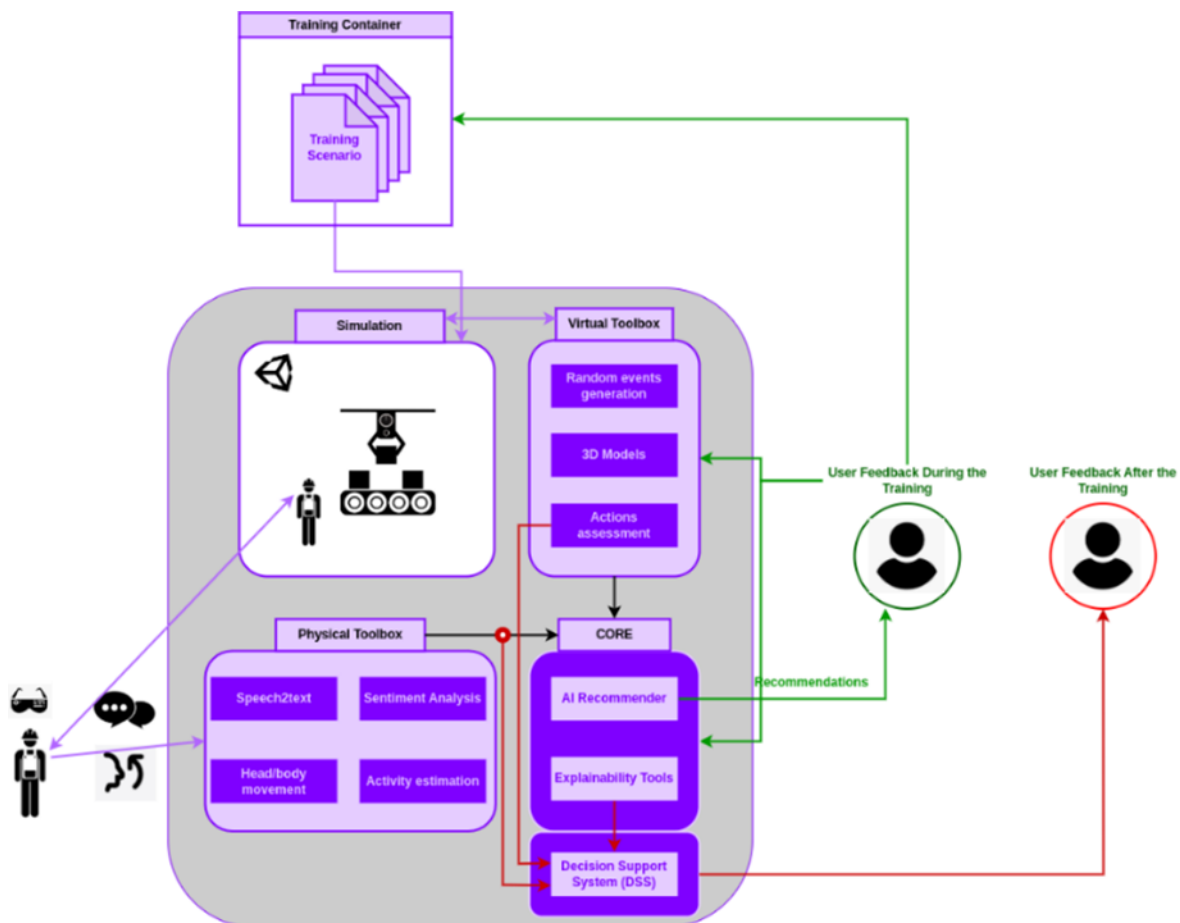
2.12.1 Στάδια υλοποίησης

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

- **Συλλογή και διατύπωση σεναρίου προσομοίωσης:** περιλαμβάνει τον καθορισμό των ενεργειών που θα ενσωματωθούν στον εικονικό κόσμο του μετασύμπαντος 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 μετασύμπαντος 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.

2.12.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η αρχιτεκτονική του συστήματος, όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 93.



Εικόνα 93: Αρχιτεκτονική του Συστήματος για την Εκπαίδευση του Προσωπικού σε Βιομηχανικό Μετά-Σύμπαν

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.

2.12.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Συλλογή Πρόθεση Χρήσης και Σχεδιασμός Συσκευών Εικονικής Πραγματικότητας

Βασικό εργαλείο για την διασύνδεση του εκάστοτε χρήστη με το περιβάλλον προσομοίωσης του μετασύμπαντος αποτελεί η χρήση γυαλιών εικονικής πραγματικότητας (VR). Για το λόγο αυτό, η διαδικασία ανάπτυξης εκκίνησε με την εκπόνηση ενός ερωτηματολογίου για την διερεύνηση της πρόθεσης χρήσης παρόμοιων φορητών συσκευών και συσκευών VR στην σύγχρονη ελληνική βιομηχανία. Ως γνωστόν, το ερωτηματολόγιο είναι ένα ερευνητικό εργαλείο που αποτελείται από ένα σύνολο ερωτήσεων και στοχεύει στην απόκτηση νέας γνώσης και στην κατανόηση συμπεριφορών μετά τη συλλογή και ανάλυση των απαντήσεων των ερωτηθέντων. Μια τέτοια συμπεριφορά αποτελεί και η πρόθεση ενός εργαζομένου να χρησιμοποιήσει φορητές συσκευές και να παραχωρήσει προσωπικά δεδομένα σε αυτές κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσής του στο εργασιακό περιβάλλον. Μελετώντας τη βιβλιογραφία έγινε αντιληπτό ότι δεν υπάρχει ικανός αριθμός ερευνών για τον εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τους χρήστες στη υιοθέτηση φορητών συσκευών. Επίσης, η ανάγκη διερεύνησης αυτών των παραγόντων επιβεβαιώνεται και από τη συνεχή, αυξητική τάση χρήσης φορητών συσκευών σε χώρες του εξωτερικού (το 2014 πουλήθηκαν 22 εκατομμύρια φορητές τεχνολογίες και το 2018 πάνω από 250 εκατομμύρια). Τα παραπάνω αποτελούν πρωταρχικά ζητήματα στον σχεδιασμό των λειτουργιών των συσκευών στο παρόν έργο, στο οποίο ο τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη ενός προηγμένου συστήματος εκπαίδευσης εργαζομένων με συσκευή χρήσης να αποτελούν τα γυαλιά εικονικής πραγματικότητας (VR).

Το ερωτηματολόγιο που δημιουργήθηκε αποτελείται από 53 ερωτήσεις με πενταβάθμια Likert κλίμακα και ως πληθυσμό στόχο έχει τους δημόσιους και τους ιδιωτικούς εργαζομένους στην Ελλάδα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από δημογραφικές ερωτήσεις και ερωτήσεις για την εργασιακή εμπειρία, ενώ το δεύτερο μέρος έχει τις ερωτήσεις σχετικά με τους παράγοντες που βασίζονται στη Θεωρία Λογισμού Απορρήτου (Privacy Calculus Theory). Παράγοντες του μοντέλου αποτελούν τα αντιληπτά οφέλη, οι αντιληπτοί κίνδυνοι, οι ανησυχίες για την ιδιωτικότητα, ο έλεγχος της ιδιωτικότητας, η αντιληπτή αποτελεσματικότητα της πολιτικής απορρήτου και η πρόθεση χρήσης. Με αυτόν τον τρόπο θα μετρηθεί η πρόθεση των εργαζομένων να χρησιμοποιήσουν τα VR γυαλιά κατά τη διάρκεια της εργασίας τους (χωρίς απαραίτητα να τα έχουν χρησιμοποιήσει προηγουμένως για να απαντήσουν στις ερωτήσεις). Ως απώτερο σκοπό έχουμε, μέσα από τα στατιστικά αποτελέσματα, να ενισχύσουμε την αποδοχή του τελικού προϊόντος από τους εργαζομένους.

Καθώς δεν έχει ξαναγίνει στην Ελλάδα παρόμοια έρευνα, στόχος είναι η συμμετοχή όσο περισσότερων εργαζομένων της χώρας, φυσικά σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Η προσέλκυση των υποψηφίων συμμετεχόντων πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Από μέσα κοινωνικής δικτύωσης στέλνοντας τον σύνδεσμο που οδηγεί στο ερωτηματολόγιο, αλλά και με QR codes που μοιράζονται ώστε να μπορούν οι εργαζόμενοι να σκανάρουν και να συμμετέχουν στην έρευνα. Μέχρι σήμερα έχουν συλλεχθεί 500 απαντήσεις από εργαζομένους σε διάστημα σχεδόν τριών μηνών. Παρακάτω φαίνεται η μορφή του ερωτηματολογίου και κάποια παραδείγματα ερωτήσεων που υπάρχουν σε αυτό.

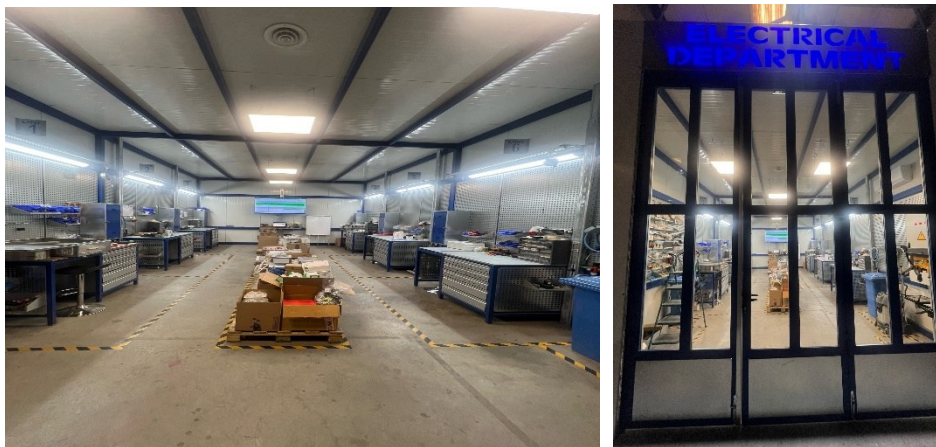
Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

Διαφωνώ απόλυτα	Διαφωνώ	Ούτε συμφωνώ, ούτε διαφωνώ	Συμφωνώ	Συμφωνώ απόλυτα
ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE				
Ερωτηματολόγιο <small>Το ερωτηματολόγιο με τίτλο «Πράξεις που επηρεάζουν τη πρόθεση χρήσης των Φορητών Συσκευών από Εργαζόμενους» διατίθεται στο πλαίσιο εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής της υποψήφιας Διδάκτορα κ. Μαρίας Βασιλάκου. Η Διδακτορική Διατριβή τέλεται υπό την επιστημονική επίβλεψη του Επισκόπου Καθηγητή Διαπολιτισμικής Ανασφάλου και του εργαστηρίου Πληροφορικών Συστημάτων του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης. Η ερευνητική προσπάθεια εντάσσεται στο πλαίσιο του έργου «Greece4.0 - Δίκτυο Αριστείας για την Ανάπτυξη, Διάδοση και Εφαρμογή Τεχνολογιών Ψηφιακού Μετασχηματισμού στην Ελλάδα» Μετασχηματιστική Βιομηχανία. Το ερωτηματολόγιο είναι ΑΝΩΔΕΤΟ. Η συμπλήρωσή του διαρκεί περίπου 5 λεπτά. Θα χρειαστεί να εισάγετε κλάσματα προσωπικές πληροφορίες καθώς και κλάσματα πληροφορίες για την επιχείρησή στην οποία εργάζεστε. Αν δεν επιθυμείτε να απαντήσετε σε κάποιες από τις σχετικές ερωτήσεις, μπορείτε να τις αφήσετε κενές. Έως εφ'όσον υπάρχει εκ των προτέρων για την παύση της συμμετοχής σας και για τον χρόνο που με διαθέσετε. Σε περίπτωση που θέλετε οποιαδήποτε διευκρίνιση, παρακαλούμε επικοινωνήστε με τη κ. Μαρία Βασιλάκου, mvasil@dmte.duth.gr.</small>				
Οι συνάδελφοί μου θα με κοιτάζουν περίεργα αν με δουν να χρησιμοποιώ Φορητές Συσκευές.				
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ντρέπομαι να φορέσω Φ.Σ.				
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Οι συνάδελφοί μου θα γελούσαν εάν χρησιμοποιούσα Φ.Σ.				
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Εικόνα 94: Μορφή ερωτηματολογίου πρόθεσης χρήσης φορητών συσκευών εικονικής πραγματικότητας

Διατύπωση Σεναρίου Εκπαίδευσης

Έπειτα από συζητήσεις και επισκέψεις σε ενδιαφερόμενους τελικούς χρήστες, το σενάριο χρήσης που επιλέχθηκε για την εκπαίδευση εργαζομένων στο χώρο της βιομηχανίας είναι αυτό της συναρμολόγησης και συνδεσμολογίας ενός εξατομικευμένου ηλεκτρολογικού πίνακα για βιομηχανική χρήση. Σύμφωνα με αυτό, ο εργαζόμενος λαμβάνει από την αποθήκη μία κούτα με τα απαραίτητα στοιχεία του υπό συναρμολόγηση πίνακα τα οποία και αρχικά πρέπει να ελέγξει ως προς την πληρότητά τους αλλά και την ορθή τους διαστασιολόγηση. Έπειτα, ακολουθεί η ρουτίνα συναρμολόγησης και σύνδεσης αυτών με κατάλληλα εργαλεία και καλώδια, ενώ ολοκληρώνει με την ποιοτικό έλεγχο του πίνακα με δοκιμαστική τροφοδότηση. Στην Εικόνα 95 απεικονίζεται το περιβάλλον από το οποίο καθορίστηκαν οι απαιτήσεις για την ανάπτυξη και διατύπωση του εν λόγω σεναρίου εκπαίδευσης εργαζομένων.



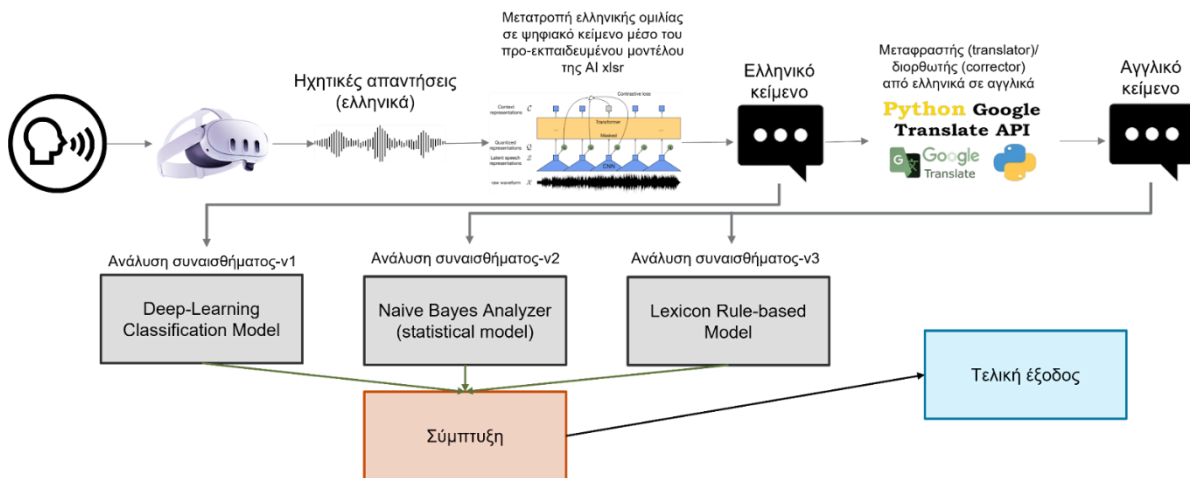
Εικόνα 95: Εγκατάσταση όπου βασίστηκε η διαμόρφωση του εικονικού σεναρίου

2.12.3.1 Φυσική εργαλειοθήκη

Ομιλία σε κείμενο

Οι εφαρμογές μετατροπής ομιλίας σε κείμενο (speech2text) και ανάλυσης συναισθήματος (sentiment analysis) περιλαμβάνονται στο υποσύστημα της φυσικής εργαλειοθήκης (physical toolbox) και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της εμπειρίας που είχε ο χρήστης κατά τη διαδικασία της ψηφιακής εκπαίδευσης. Μετά το περιβάλλον εκπαίδευσης ο χρήστης εισέρχεται σε ένα ψηφιακό δωμάτιο στο οποίο απαντάει σε συγκεκριμένες ερωτήσεις σχετικά με την εφαρμογή, ενώ του ζητείται επίσης να εκφραστεί ως προς την διαδικασία. Σε αυτό το σημείο, όπου το σύστημα λαμβάνει την ανατροφοδότηση του χρήστη, οι απαντήσεις τμηματοποιούνται και τα ηχητικά σήματα στέλνονται σε μοντέλο μετατροπής ομιλίας σε κείμενο. Στη συνέχεια το παραγόμενο κείμενο

μεταφράζεται στα αγγλικά, και εισάγεται ως είσοδο σε αλγορίθμους ανάλυσης συναισθήματος, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 96. Οι διάφορες μετρήσεις καταγράφονται και στέλνονται στο υποσύστημα του πυρήνα (core) για την τελική ανάλυση και την εξαγωγή της αναφοράς (report) στην οποία περιλαμβάνονται μετρήσεις και στοιχεία σχετικά με την εκπαίδευση που πραγματοποίησε ο εργαζόμενος.



Εικόνα 96: Αρχιτεκτονική του υπό-συστήματος μετατροπής ομιλίας σε ψηφιακό κείμενο και ανάλυσης συναισθήματος.

Ανάλυση Συναισθήματος

Αρχικά, για την εκτίμηση συναισθήματος τα ηχητικά σήματα που έχουν καταγραφεί από το μικρόφωνο των γυαλιών AR/VR meta Quest 3 στέλνονται στο προ-εκπαιδευμένο μοντέλο της Facebook AI xlsr, το οποίο αποτελεί αρχιτεκτονική Transformer, και μετατρέπει ηχητικά δεδομένα σε ψηφιακό κείμενο. Το συγκεκριμένο δίκτυο έχει εκπαιδευτεί επιπλέον σε ελληνικές ηχογραφήσεις (Common Voice και CSS10 Greek: Single Speaker Speech Dataset) και μπορεί να εξάγει κείμενο στα ελληνικά, που είναι και η γλώσσα η οποία θα χρησιμοποιείται από τους χρήστες. Επιπλέον, μέσω APIs εφαρμόζεται εργαλείο μετάφρασης της Google για την μετατροπή του ελληνικού παραγόμενου κειμένου στα αγγλικά.

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τρεις αλγόριθμοι ανάλυσης συναισθήματος, δύο από τους οποίους εφαρμόζονται στο μεταφρασμένο αγγλικό κείμενο και ένας στο αρχικό ελληνικό. Συγκεκριμένα, μοντέλο transformer εκπαιδευμένο σε ελληνικές κριτικές από διαδικτυακές σελίδες ταξινομεί την είσοδο (ελληνικό κείμενο) μεταξύ δύο κλάσεων, θετικό ή αρνητικό συναίσθημα. Επιπλέον, για το αγγλικό κείμενο χρησιμοποιείται αλγόριθμος ανάλυσης μοτίβου (PatternAnalyzer) βασισμένος σε προσέγγιση λεξικού (lexicon-based approach), όπου διάφορες λέξεις και εκφράσεις έχουν προηγουμένως οριστεί με συγκεκριμένο σκορ συναισθήματος. Η έξοδος λαμβάνει εύρος τιμών από -1 (αρνητικό συναίσθημα) έως +1 (θετικό συναίσθημα), ανάλογα με τις λέξεις που περιλαμβάνονται και τα σκορ συναισθήματος που έχουν δοθεί σε αυτές. Τέλος, ο τρίτος αλγόριθμος ανάλυσης συναισθήματος βασίζεται πάλι σε προσέγγιση λεξικού, ο οποίος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε απλή καθημερινή ομιλία, ακόμη και σε αργκό. Στην έξοδο δίνεται ένα σκορ από -1 έως +1 για κάθε μία από τις τρεις κλάσεις, θετική, αρνητική και ουδέτερη, καθώς και μία συνολική μέτρηση από -1 έως +1 όπως προηγουμένως.

Οι παραπάνω υλοποιήσεις έχουν πραγματοποιηθεί σε λειτουργικό Windows 10, εφαρμόζοντας την γλώσσα προγραμματισμού python μέσω του περιβάλλοντος anaconda. Επιπλέον χρησιμοποιούνται οι βιβλιοθήκες torch και torchaudio της PyTorch για μετατροπή ομιλίας σε κείμενο, transformers της Hugging Face για μετατροπή ομιλίας σε κείμενο και ανάλυση συναισθήματος, numpry, deep_translator για μετάφραση, textblob και Vader για ανάλυση συναισθήματος.

2.12.3.2 Ψηφιακή εργαλειοθήκη

Εγκατάσταση και Διασύνδεση Γυαλιών VR

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 και των διαδικασιών του. Αυτή η εφαρμογή θα συνεισφέρει τόσο στο τρέχον όσο και στο νέο προσωπικό το οποίο θα εκπαιδευτεί σε διάφορους ρόλους, καθήκοντα και σενάρια έκτακτης ανάγκης, ενισχύοντας σημαντικά την ασφάλειά τους και ετοιμότητα του σε πραγματικές καταστάσεις. 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 Engine⁴. 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 αλληλεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο με τη ψηφιακή εφαρμογή, μέσω γυαλιών και χειριστηρίων VR Meta Quest 3 ή φυσικών χειρών με αναγνώρισή τους. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, είναι απαραίτητη η σωστή ρύθμιση, εγκατάσταση και σύνδεση ορισμένων λογισμικών. Συγκεκριμένα, θα εγκατασταθεί στον υπολογιστή η εφαρμογή Meta Quest Link, καθώς και η πλατφόρμα Unity 3D Engine. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις ελάχιστες απαιτήσεις συστήματος⁵. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες, η εφαρμογή Meta Quest Link θα πρέπει να συνδεθεί με τα γυαλιά και τα χειριστήρια. Παρόλο που η χρήση κινητού αντί για υπολογιστή μπορεί να είναι χρήσιμη, δεν είναι απαραίτητη. Μετά τη διασύνδεση του εξοπλισμού με την εφαρμογή, θα πρέπει να ακολουθήσει η σύνδεση με τη μηχανή Unity, μέσω του πακέτου ανοιχτού κώδικα Meta OpenXR SDK, και η ενσωμάτωση του με τη μηχανή.

Μοντέλα 3D

Ο εκπαιδευόμενος εργαζόμενος έχει τη δυνατότητα να αλληλεπιδράσει με διαφορετικά αντικείμενα που υπάρχουν στο περιβάλλον της εφαρμογής εικονικής πραγματικότητας. Συγκεκριμένα, στο σενάριο συναρμολόγησης ενός ηλεκτρολογικού πίνακα ο χρήστης καλείται να χρησιμοποιήσει εικονικά εργαλεία για να τοποθετήσει και να συνδέσει σωστά τα στοιχεία στον πίνακα.

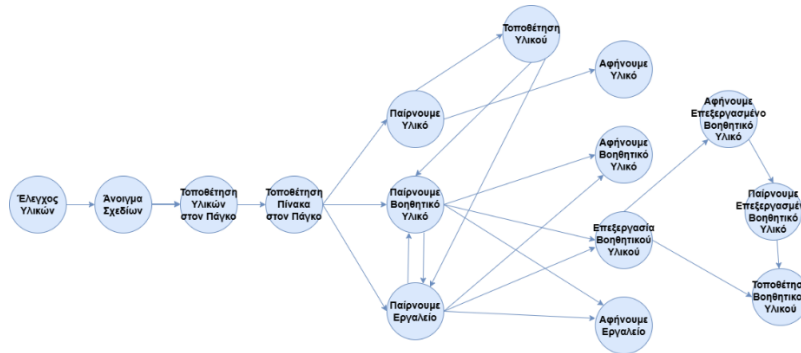
Τα μοντέλα των αντικειμένων που εισάγονται στη μηχανή τρισδιάστατων γραφικών Unity είναι σε μορφή αρχείων τρισδιάστατων σχεδίων, όπως τα αρχεία .blend της εφαρμογής ανοιχτού λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης Blender. Στο πλαίσιο της δημιουργίας του τρισδιάστατου περιβάλλοντος, συλλέχθηκαν έτοιμα ελεύθερα τρισδιάστατα μοντέλα των αντικειμένων, όπου υπήρχαν διαθέσιμα. Συγκεκριμένα κατεβάστηκαν τρισδιάστατα μοντέλα από τις ιστοσελίδες Sketchfab, Grabcad και 3Dfindit. Όλα τα αρχεία μετατράπηκαν σε τύπο συμβατό με την εφαρμογή Blender, όπου σχεδιάστηκαν τα υπόλοιπα αντικείμενα και έγινε επεξεργασία των έτοιμων σχεδίων. Συγκεκριμένα για το συγκεκριμένο σενάριο έγινε συλλογή ή σχεδίαση των αντικειμένων που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7: Υπόμνημα αντικειμένων στο τρισδιάστατο περιβάλλον του σεναρίου συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα

Ηλεκτρολογικά στοιχεία	Εργαλεία και εξαρτήματα	Σκελετός πίνακα
Θερμομαγνητικός διακόπτης προστασίας κινητήρα	Κατσαβίδι	Κουτί
	Πένσα	Ράγες
	Απογυμνωτής καλωδίων	Κανάλια
Επαφείας	Αυτορυθμιζόμενη πρέσα	
Επιτηρητής στάθμης αγωγίμων υγρών	Καλώδια	
	Πλαστικά πώματα	
Μπλοκ ακροδεκτών	Καρούλια	

2.12.3.3 Πυρήνας

Το υποσύστημα πυρήνα (core) λαμβάνει τα δεδομένα από το περιβάλλον προσομοίωσης και τα επεξεργάζεται για να παράγει τελικά την αναφορά. Όσον αφορά την αξιολόγηση του εργαζόμενου στην εργασία συναρμολόγησης ηλεκτρολογικού πίνακα το υποσύστημα πυρήνα εξετάζει ποιες ενέργειες έγιναν από τον εργαζόμενο καθώς και τη σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν. Για το σκοπό αυτό καταγράφηκε μια λίστα με τις απαραίτητες ενέργειες για τη συγκεκριμένη εργασία, και εξετάστηκε η σειρά με την οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν οι συγκεκριμένες ενέργειες.



Εικόνα 97: Αναπαράσταση γράφου ενεργειών του χρήστη που δημιουργείται στον πυρήνα

Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένας διάγραμμα ροής με την αναμενόμενη αλληλουχία των απαραίτητων ενεργειών. Επιπλέον δημιουργήθηκε ένας πίνακας για την δημιουργία ενός γράφου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 97: Αναπαράσταση γράφου ενεργειών του χρήστη που δημιουργείται στον πυρήνα, στον οποίο για κάθε ενέργεια σημειώνονται οι υπόλοιπες ως πιθανές ή αποκλειόμενες ακόλουθες ενέργειες. Η υλοποίηση του γράφου πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση της βιβλιοθήκης ανοιχτού κώδικα *networkx* της *Python*. Για παράδειγμα, ο εργαζόμενος δε μπορεί να βιδώσει αν έχει αφήσει το κατσαβίδι. Άρα μετά την ενέργεια “Αφήνω κατσαβίδι” μπορεί να αποκλειστεί η ενέργεια “Βιδώνω στοιχείο ηλεκτρολογικού πίνακα”.

Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αναγνωριστούν από το υποσύστημα οι περιττές ή λανθασμένες ενέργειες και οι απαραίτητες ενέργειες που παραλήφθηκαν. Στην αναφορά που θα παράγει το υποσύστημα επισημαίνονται στον εργαζόμενο τα λάθη και οι παραλήψεις και βαθμολογείται η επίδοσή του.

2.12.4 Παραδείγματα χρήσης - ενδιάμεσα αποτελέσματα

Στον Πίνακα 8 Πίνακας 1 παρουσιάζονται παραδείγματα από την μετάφραση του ελληνικού κειμένου στα αγγλικά, μέσω του μεταφραστή της Google, καθώς και οι έξοδοι των αλγορίθμων ανάλυσης συναισθήματος. Τα αρχικά κείμενα (στα ελληνικά) δεν αποτελούν έξοδο του μοντέλου ομιλίας σε κείμενο αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του μεταφραστή και των μοντέλων πρόβλεψης συναισθήματος.

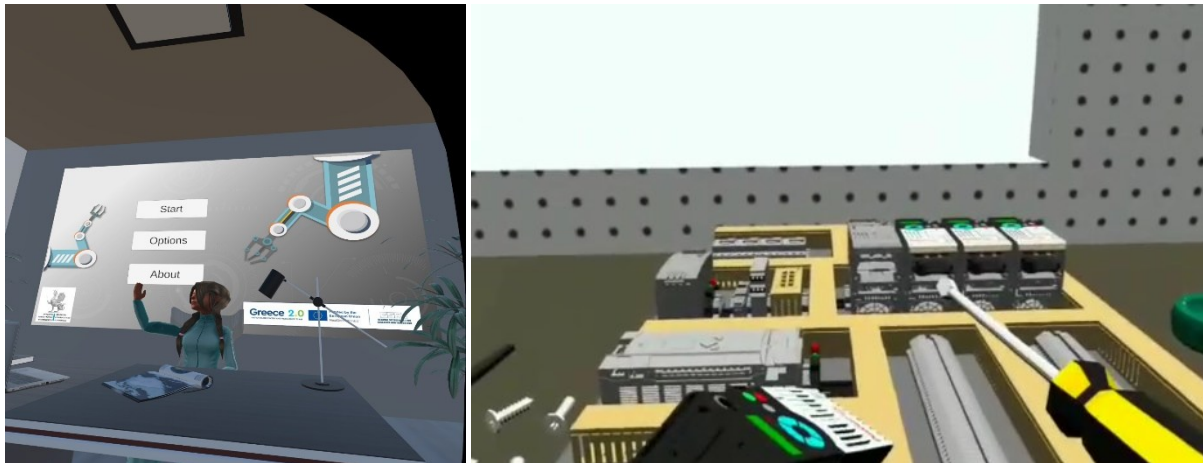
Πίνακας 8: Παραδείγματα από μετάφρασης από το ελληνικό στο αγγλικό κείμενο και εφαρμογής των τριών αλγορίθμων ανάλυσης συναισθήματος.

Κείμενο στα ελληνικά	Μετάφρασμένο κείμενο στα αγγλικά με εργαλείο της Google	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)
Θετικ ές Προτ άσεις	1 Αυτή η εμπειρία ήταν εκπληκτική και πολύ εκπαιδευτική! Ένιωσα ότι μάθαινα γρήγορα και αποτελεσματικά μέσω της εικονικής πραγματικότητας. 2 Η εικονική πραγματικότητα έκανε τη μάθηση πραγματικά διασκεδαστική. Ήταν σαν να συμμετείχα σε ένα παιχνίδι ενώ ταυτόχρονα μάθαινα πολύτιμες δεξιότητες. 3 Ένιωσα ότι κατανοούσα πλήρως τη διαδικασία συναρμολόγησης του ηλεκτρικού πίνακα χάρη στις λεπτομερείς οδηγίες και τα ρεαλιστικά γραφικά.	0.63125 0.24166 0.42777	{'neg': 0.0, 'neu': 0.628, 'pos': 0.372, 'compound': 0.8588} {'neg': 0.0, 'neu': 0.674, 'pos': 0.326, 'compound': 0.8479} {'neg': 0.0, 'neu': 0.779, 'pos': 0.221, 'compound': 0.6597}	1 1 0

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

	4	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 the virtual reality glasses made the training more interactive and interesting, enabling me to practice in real conditions without risk.	0.43333	{'neg': 0.0, 'neu': 0.647, 'pos': 0.353, 'compound': 0.8979}	1
Ουδέτ ερες Προτ άσεις	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.	0.35833	{'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
	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
Αρνητ ικές Προτ άσεις	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.	0.33333	{'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.	0.61333	{'neg': 0.202, 'neu': 0.673, 'pos': 0.125, 'compound': -0.1513}	0
	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 καλά εξηγημένη και μπερδευτική, 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': 0.153, 'neu': 0.847, 'pos': 0.0, 'compound': -0.4019}	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 the VR technology didn't work as it should.	0.55	{'neg': 0.116, 'neu': 0.884, 'pos': 0.0, 'compound': -0.4404}	0

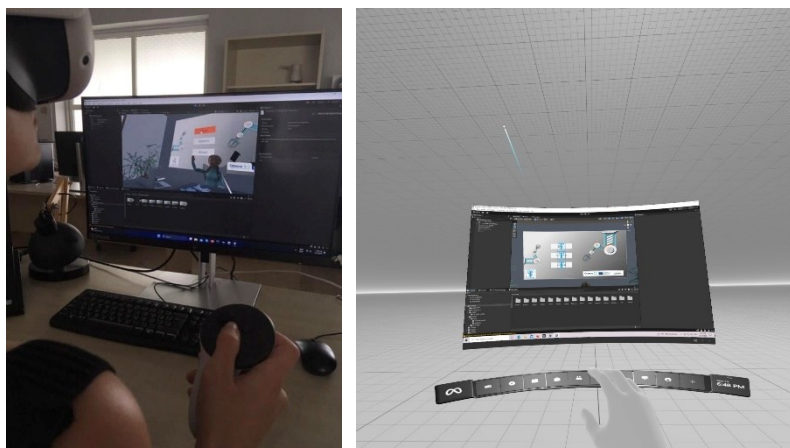
Όπως ειπώθηκε παραπάνω, η αλληλεπίδραση του χρήστη με την εφαρμογή πραγματοποιείται μέσω των γυαλιών Meta Quest 3, ο οποίος περιλαμβάνει γυαλιά εικονικής πραγματικότητας και χειριστήρια. Μέσω των ειδικών γυαλιών, ο χρήστης μπορεί να παρατηρεί πλήρως το ψηφιακό περιβάλλον. Οι κινήσεις του κεφαλιού του μεταφέρονται άμεσα στο εικονικό περιβάλλον, προσφέροντας μια ρεαλιστική εμπειρία. Έτσι, ο χρήστης αισθάνεται ενσωματωμένος στο ψηφιακό περιβάλλον, με ελευθερία φυσικών κινήσεων.



Εικόνα 98: Πρότυπο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας

Ταυτόχρονα, η αλληλεπίδραση με τρισδιάστατα αντικείμενα γίνεται είτε μέσω των χειριστηρίων είτε μέσω της αναγνώρισης των φυσικών του χεριών, προσφέροντας μεγαλύτερη ελευθερία και φυσικότητα. Αυτή η δυνατότητα ολοκληρώνει την ψηφιακή εμπειρία, επιτρέποντας στο χρήστη να κινεί το σώμα του ελεύθερα, με εξαίρεση τη μετακίνηση με τα πόδια, καθώς το σενάριο μελέτης εκπαιδευτικής προσομοίωσης απαιτεί την παραμονή του εκπαιδευόμενου σε σταθερή θέση μπροστά από έναν πάγκο εργασίας. Σύμφωνα με το εκπαιδευτικό σενάριο, όπως φαίνεται και στις εικόνες, ο χρήστης καλείται να κατασκευάσει πίνακες ελέγχου ακολουθώντας συγκεκριμένες οδηγίες, ολοκληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο την εκπαιδευτική του διαδικασία. Τέλος, κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης θα καταγράφονται δεδομένα για την αξιολόγηση της εκπαίδευσης, ενώ παράλληλα θα παρέχονται κατευθυντήριες οδηγίες στον εκπαιδευόμενο.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η φορητή συσκευή που αξιοποιείται και θα χρησιμοποιηθεί από τους εργαζομένους σύμφωνα με την παρούσα λύση, είναι τα γυαλιά εικονικής πραγματικότητας (VR). Πιο συγκεκριμένα, ο εξοπλισμός που αξιοποιείται, αποτελείται από ένα αυτόνομο VR Meta Quest 3 με δύο χειριστήρια που χρησιμοποιούνται από τον χρήστη όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία:



Εικόνα 99: Εξοπλισμός και Point of View του χρήστη

Φορώντας τα γυαλιά εικονικής πραγματικότητας, ο χρήστης έχει πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες του υπολογιστή του. Κάτω από την κεντρική οθόνη, παραμένει ένα μενού βασικών επιλογών, όπως τεχνικές ρυθμίσεις, ή κέντρο ειδοποιήσεων, τις οποίες μπορεί ο χρήστης να επιλέξει, είτε με τα χειριστήρια, είτε με κινήσεις του χεριού του. Ο χρήστης μπορεί βέβαια να χειριστεί το λογισμικό Unity 3D Engine, στο οποίο έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί το ψηφιακό περιβάλλον αναπαράστασης τμήματος της βιομηχανίας, που έχει δημιουργηθεί για την παρούσα λύση.

Στο βίντεο που παρατίθεται, ο χρήστης περιηγείται στο διαμορφωμένο περιβάλλον, μέσα από το λογισμικό Unity 3D Engine [\[Link\]](#).

2.13 Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες

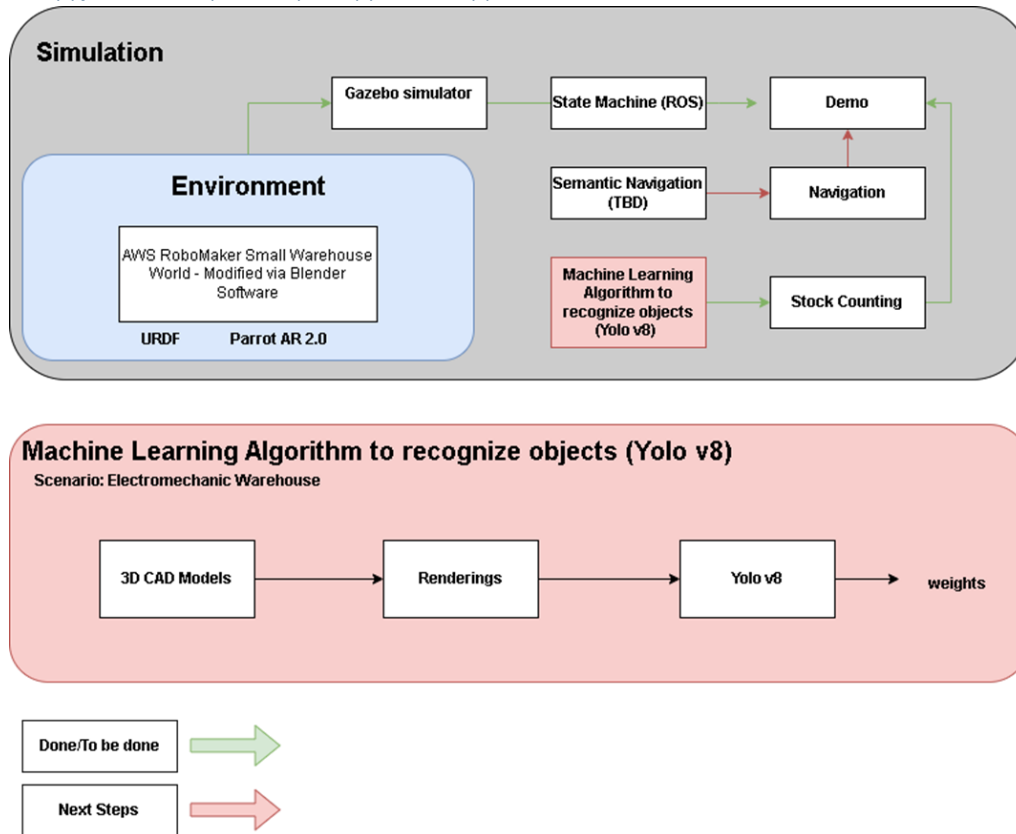
2.13.1 Στάδια υλοποίησης

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.
- 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.

Την παρούσα χρονική περίοδο, οριστικοποιείται η ανάπτυξη μοντέλων αναγνώρισης αντικειμένων καθώς και η ανάπτυξη του συστήματος καταμέτρησης τα οποία και θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω. Η ενσωμάτωση έξυπνων αλγορίθμων στο περιβάλλον είναι εν εξελίξει και έχει ολοκληρωθεί η οριστικοποίηση των προδιαγραφών αυτού του μέρους.

2.13.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης



Εικόνα 100: Γενική αρχιτεκτονική λύσης

Παραπάνω στην Εικόνα 100, παρουσιάζεται η αρχική έκδοση της αρχιτεκτονικής, η οποία τροποποιήθηκε για την περαιτέρω βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος. Έχει προστεθεί ο κλάδος της καταμέτρησης των αποθεμάτων, όπου με την χρήση αλγορίθμου, οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα της καταμέτρησης σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας ένα HMI (Human Machine Interface) το οποίο είναι αρκετά εύκολο στην χρήση ώστε οι εμπλεκόμενοι στην καταμέτρηση να βλέπουν σε πραγματικό χρόνο τα καταμετρημένα προϊόντα. Η Αρχιτεκτονική διαμορφώνεται ως εξής:

Διαμορφώθηκε ένα περιβάλλον το οποίο προσομοιάζει ένα αντίγραφο μίας αποθήκης, όπου χρησιμοποιείται μία κινητή πλατφόρμα (Parrot AR 2.0) 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 (Robot Operating System), 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 προς το παρόν γίνεται με την χρήση προδιαγεγραμμένων διαδρομών, με συγκεκριμένη πορεία. Προς το παρόν δεν λαμβάνεται υπόψιν η δυναμική αποφυγή εμποδίων και η πλοήγηση

σε δυναμικό περιβάλλον γενικότερα. Εξετάζεται το ενδεχόμενο σημασιολογικής πλοήγησης σε συνεργασία με ένα λειτουργικό SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), το οποίο είναι υπό έρευνα. Το παραπάνω πέρα από την παραδοσιακή διαδικασία του Slam, θα ενσωματωθεί η σημασιολογική κατάτμηση του χώρου, επιτρέποντας στο ρομπότ να κατανοεί διαφορετικά τμήματα της αποθήκης, όπως συγκεκριμένα ράφια (π.χ. τα ράφια με ηλεκτρικούς κινητήρες) ή ακόμη και εγενείς τομείς (π.χ. τομέας ηλεκτρονικών).

Stock Counting (καταμέτρηση αποθέματος): Ένα από τα σημαντικότερα μέρη της λύσης είναι η καταμέτρηση αποθέματος. Προς το παρόν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Yolov8, όπου έχει εκπαιδευτεί για τον εντοπισμό διαφορετικών ηλεκτρομηχανολογικών εξαρτημάτων (π.χ. Μπαταρίες, μπλοκ κινητήρα, ηλεκτρική μηχανή κ.α.).

2.13.3 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 (Robot Operating System) 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, γίνεται έρευνα με το μεν πρώτο για την ανάπτυξη συστήματος αποφυγής εμποδίων. Η πλοήγηση προς το παρόν γίνεται με προδιαγεγραμμένες διαδρομές μπροστά από τα ράφια με τα αντικείμενα.

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

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΔΟΚΙΜΗ	TOTAL(CLASS)
OVERFLOW-TANK	814	97	54	965
RADIATOR-HOSE	797	100	53	950
RADIATOR-CAP	666	85	50	801

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

<i>ENGINE-BLOCK</i>	627	82	42	751
<i>RADIATOR</i>	624	76	40	740
<i>RADIATOR-FAN</i>	602	70	36	708
<i>WATER-PUMP</i>	440	51	24	515
TOTAL (SPLIT)	4570	561	299	5430

Οι παραπάνω εικόνες προήλθαν από ένα πλήθος άλλων πηγών σχετικών συνόλων δεδομένων, τα οποία απαρτίζονται από εικόνες πραγματικών δεδομένων. Μερικές εικόνες από το εν λόγω σύνολο δεδομένων είναι οι παρακάτω:



Εικόνα 101: Ενδεικτικές εικόνες από το σύνολο εκπαίδευσης του αλγορίθμου εντοπισμού δεδομένων

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

Πίνακας 10: 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	dfc	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-pano. 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 γολον8η (nano), απέδωσε πιο ολοκληρωμένη απόδοση, έναντι μεταγενέστερων εκδόσεων, ελαφριών πάλι μοντέλων (γολον9t, γολον9s). 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

2.13.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

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

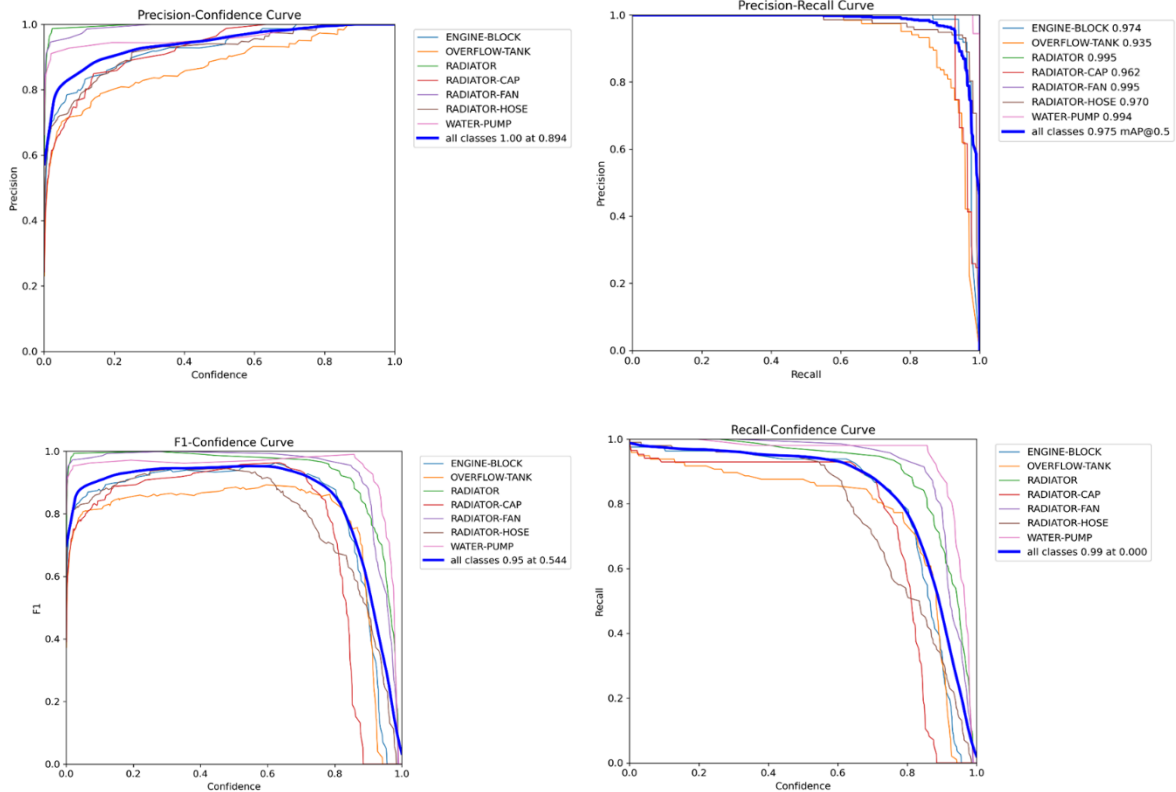
Για τη καμπύλη Precision (Ακρίβειας)-Recall (Ανάκλησης) παρατηρείται ότι οι περισσότερες κλάσεις παραμένουν κοντά στην επάνω δεξιά γωνία του διαγράμματος, κάτι που υποδηλώνει καλή απόδοση και ισοροπία μεταξύ ανάκλησης και ακρίβειας. Η παχιά μπλε γραμμή, απεικονίζει όλες τις κλάσεις μαζί και διατηρεί 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.

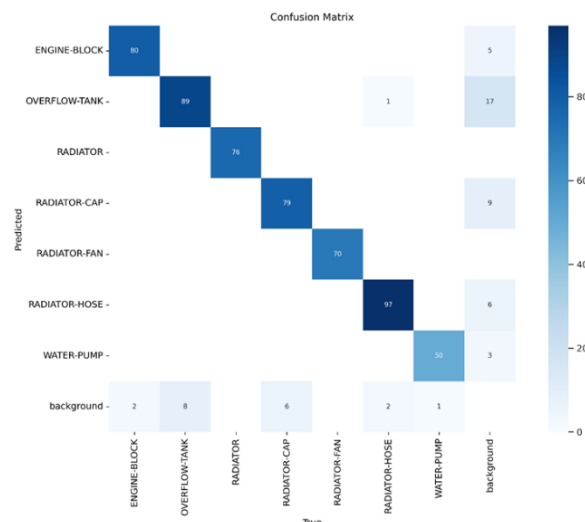
Η καμπύλη F1-Confidence (Εμπιστοσύνης) δείχνει ότι το μοντέλο επιτυγχάνει απόδοση, με F1 score που φτάνει το 0.95 όταν η εμπιστοσύνη είναι 0.544 για όλες τις κλάσεις. Δηλαδή επιτυγχάνεται καλή ισοροπία μεταξύ ακρίβειας και ανάκλησης, για ένα αρκετά ευρύτερο φάσμα τιμών εμπιστοσύνης. Οι περισσότερες κατηγορίες 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.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 103: Ενδεικτικά 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 104: 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 105: Ενδεικτικές εικόνες για την περαιτέρω εκπαίδευση του μοντέλου αναγνώρισης αντικειμένων

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



Εικόνα 106: Ενδεικτικά αποτελέσματα αναγνώρισης αντικειμένων από το περιβάλλον προσομοίωσης

Αναφορικά με την παρουσίαση υλικού ενδιάμεσης 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://youtu.be/f0kqSF0c_5E

2.14 Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής

2.14.1 Στάδια υλοποίησης

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

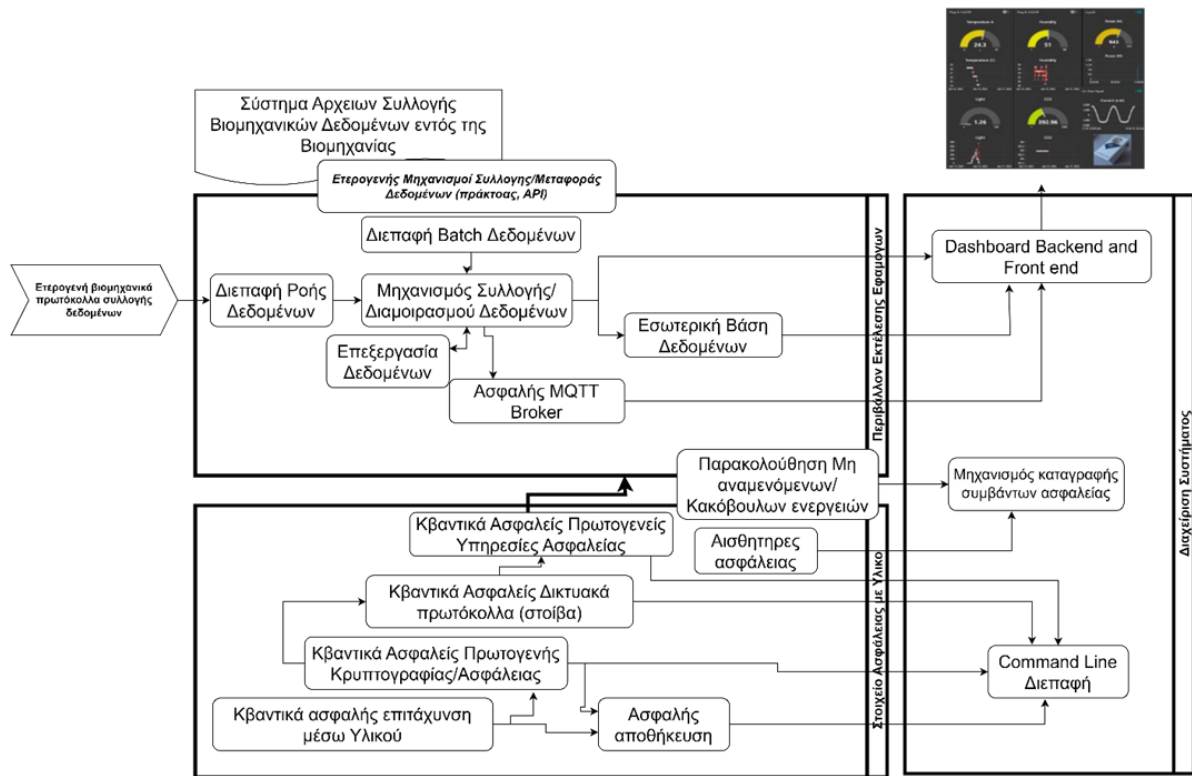
- Βασικοί μηχανισμοί συλλογής δεδομένων με πολλαπλά βιομηχανικά πρωτόκολλα
- Σχεδιασμός και υλοποίηση Dashboard και UI

- 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 ασφάλειας
- 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

Αρχικά, όλοι οι μηχανισμοί συλλογής δεδομένων από διαφορετικά βιομηχανικά συστήματα υλοποιούνται. Αυτό το στάδιο έχει ολοκληρωθεί και οι μηχανισμοί συλλογής δεδομένων έχουν ενσωματωθεί στην ενδιάμεση έκδοση της αρχιτεκτονικής. Παράλληλα η διεπαφή με το χρήστη υλοποιείται ώστε να εμφανίζονται με εύληπτο τρόπο τα συλλεγόμενα δεδομένα αλλά και όλα τα στοιχεία επικοινωνίας του συστήματος. Αυτό το στάδιο βρίσκεται κοντά στην ολοκλήρωση του και αναμένεται η ολοκλήρωση των επόμενων σταδίων ώστε να οπτικοποιηθούν όλα τα παραγόμενα αποτελέσματα από το σύστημα. Επίσης, έχει πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των διαφόρων πρωτογενών στοιχείων ασφάλειας με έμφαση στην μετακβαντική κρυπτογραφία συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών γέννησης και διαχείρισης κλειδιών και πιστοποιητικών. Το στάδιο αυτό έχει ολοκληρωθεί και έχουν ενσωματωθεί αντίστοιχες βιβλιοθήκες λογισμικού που παρέχουν την αναμενόμενη λειτουργικότητα. Το κομμάτι των πρωτόγενών που αναφέρεται σε μετακβαντική κρυπτογραφία έχει ολοκληρωθεί σε πρώτη φάση παρέχοντας βασικά σχήματα κρυπτογράφησης και ψηφιακών υπογραφών. Στην επόμενη φάση υλοποίησης περισσότερα σχήματα πρόκειται να ενσωματωθούν στη σχετική βιβλιοθήκη λογισμικού. Ακόμα, τα στάδια υλοποίησης ανίχνευσης ανωμαλιών και του μηχανισμού καταγραφής και δημοσιοποίησης δεδομένων ασφάλειας και συμβάντων ασφάλειας βρίσκεται σε εξέλιξη με το σκέλος που αφορά την καταγραφή δεδομένων ασφάλειας να έχει ήδη υλοποιηθεί πλήρως. Τέλος, η υλοποίηση των μηχανισμών δημιουργίας και διαχείρισης μοναδικής ταυτότητας του κόμβου είναι σε εξέλιξη.

2.14.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σαν σημείο αναφοράς η αρχιτεκτονική του συστήματος. Οπότε έχει αναφερθεί και στο παραδοτέο Π1.2 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.



Εικόνα 107 Αρχιτεκτονική Μηχανισμών Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής

2.14.2.1 Περιβάλλον Εκτέλεσης Εφαρμογών

Σε αυτό το τμήμα και τα τρία στοιχεία του βρίσκονται σε διαδικασία μερικής είτε πλήρους υλοποίησης. Πιο συγκεκριμένα το Dashboard (διεπαφή χρήστη) τόσο το frontend όσο και το Backend έχουν μια πρωταρχική υλοποίηση βασισμένη στο NODE-RED framework η οποία μέσω του σχεδιασμού και υλοποίησης κατάλληλων API με το μηχανισμό συλλογής δεδομένων εμφανίζει προς το χρήστη όλες τις συλλεγόμενες από το βιομηχανικό περιβάλλον τιμές. Σε επόμενη φάση θα ολοκληρωθεί και η απεικόνιση συμβάντων ασφαλείας.

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 ασφαλείας όπως η γέννηση και διαχείριση κλειδιών και πιστοποιητικών ασφαλείας καθώς και η κρυπτογράφηση ή ψηφιακή υπογραφή μηνυμάτων ή δεδομένων γενικότερα. Το σύστημα αυτό έχει υλοποιηθεί πλήρως για τις τρέχουσες λειτουργίες του Στοιχείου Ασφάλειας με Υποστήριξη Υλικού και επεκτείνεται καθώς νέες δυνατότητες ενσωματώνονται στο στοιχείο αυτό στο μέλλον

2.14.2.2 Υποσύστημα Στοιχείων Ασφάλειας με Υποστήριξη Υλικού

Σε αυτό το υποσύστημα στα πλαίσια της ενδιάμεσης υλοποίησης σημαντική προσπάθεια έχει επενδυθεί στο σχεδιασμό και υλοποίηση της κβαντικά ασφαλούς στοίβας του συστήματος η οποία περιλαμβάνει κβαντικά ασφαλείς πρωτογενείς λειτουργίες κρυπτογραφίας, δικτυακά πρωτόκολλα και υπηρεσίες. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η στοίβα ενσωματώνει διάφορες υπάρχουσες βιβλιοθήκες ασφαλείας για μετακβαντική κρυπτογραφία όπως η liboqs, rpm4 κάπως από την ομπρέλα που παρέχει η στοίβα της βιβλιοθήκης WolfSSL/Wolfcrypt. Πάνω σε αυτές τις βιβλιοθήκες έχουν υλοποιηθεί 2 δημοφιλή πρωτόκολλα δικτυακής ασφαλείας, 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 με τις παραπάνω δράσεις, 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.

2.14.2.2.1 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. Στα πλαίσια της ενδιάμεσης λύσης όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην αρχιτεκτονική της λύσης έχουν υλοποιηθεί κατά κάποιο ποσοστό χωρίς να έχουν ολοκληρωθεί πλήρως με εξαίρεση τον μηχανισμό συλλογής και διαμοιρασμού δεδομένων που χρησιμοποιεί το στοιχείο MQTT Broker για να κάνει διαθέσιμα τα συλλεγόμενα από το βιομηχανικό περιβάλλον δεδομένα. Επίσης, η ενδιάμεση βάση δεδομένων όπου βιομηχανικά δεδομένα αποθηκεύονται παροδικά μέχρι να καταναλωθούν από κάποιο άλλο υποσύστημα έχει υλοποιηθεί πλήρως και είναι πλήρως λειτουργική. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι έχει σχεδιαστεί και έχει μερικώς υλοποιηθεί 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).

2.14.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται πιο αναλυτικά, ενδεικτικά, μια από τις διάφορες τεχνολογίες (Κβαντική Ασφαλείς EDHOC i.e PQ EDHOC) που έχουν σχεδιαστεί, αναπτυχθεί και υλοποιηθεί στα πλαίσια της λύσης στην ενδιάμεση έκδοσή της.

2.14.3.1 PQ-EDHOC

Στην ενδιάμεση έκδοση της λύσης έχουμε επεκτείνει το πρωτόκολλο Ephemeral Diffie-Hellman Over COSE (EDHOC) (IETF RFC9528)⁶ ώστε να υποστηρίζει κρυπτογραφικούς αλγόριθμους ανθεκτικούς σε κβαντικές επιθέσεις. Η υλοποίηση υποστηρίζει Μετα-Κβαντικούς Μηχανισμούς Εγκλεισμού Κλειδιού (PQC KEMs) για παραγωγή κλειδιών και Μετα-Κβαντικές Ψηφιακές Υπογραφές (PQC Signatures) για αυθεντικοποίηση, σύμφωνα με τη διαδικασία τυποποίησης PQC του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST)⁷, 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 κλειδιών 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 μετα-κβαντικής κρυπτογραφίας (PQC).

2.14.3.1.1 Μηχανισμός Ανταλλαγής Κλειδιών (KEM):

Το EDHOC έχει καθοριστεί μέχρι στιγμής για χρήση μόνο με αλγόριθμους ανταλλαγής κλειδιών που βασίζονται σε ελλειπτικές καμπύλες ECDH, αλλά μπορεί να υποστηρίξει οποιονδήποτε KEM, συμπεριλαμβανομένων των μετα-κβαντικών PQC KEMs. Για την προσαρμογή του πρωτοκόλλου στο μετα-κβαντικό περιβάλλον, ο μηχανισμός ανταλλαγής κλειδιών του EDHOC μετατρέπεται σε ένα σχήμα KEM μέσω αρχιτεκτονικής προσαρμογής. Αυτή η αλλαγή περιλαμβάνει την αντικατάσταση των κλασικών δημόσιων κλειδιών Diffie-Hellman (DH) με εφήμερα μετα-κβαντικά δημόσια κλειδιά, καθώς και την ενθυλάκωση του κλειδιού κατά την ανταλλαγή μηνυμάτων. Αυτό επιτρέπει και στα δύο μέρη να υπολογίζουν το κοινό μυστικό χρησιμοποιώντας PQC KEM αντί για ECDH

Αυθεντικοποίηση:

Η μέθοδος αυθεντικοποίησης 0 του EDHOC χρησιμοποιεί αυθεντικοποίηση βασισμένη σε ψηφιακές υπογραφές και βασίζεται στο COSE για την αναγνώριση των διαπιστευτηρίων, υποστηρίζοντας ένα ευρύ φάσμα

αλγορίθμων υπογραφής και τύπων διαπιστευτηρίων. Το πρωτόκολλο EDHOC έχει προσαρμοστεί ώστε να λειτουργεί με πιστοποιητικά PQ-X.509, σύμφωνα με το RFC 9360⁸, το οποίο καθορίζει τη δομή COSE για πιστοποιητικά X.509. Εξετάζονται δύο σενάρια:

- Όπου τα πιστοποιητικά αναγνωρίζονται μέσω τιμής κατακερματισμού (hash) χρησιμοποιώντας την παράμετρο x5t του COSE.
- Όπου και τα δύο μέρη ανταλλάσσουν ένα μοναδικό πιστοποιητικό PQ-X.509, χρησιμοποιώντας την παράμετρο x5chain του COSE.

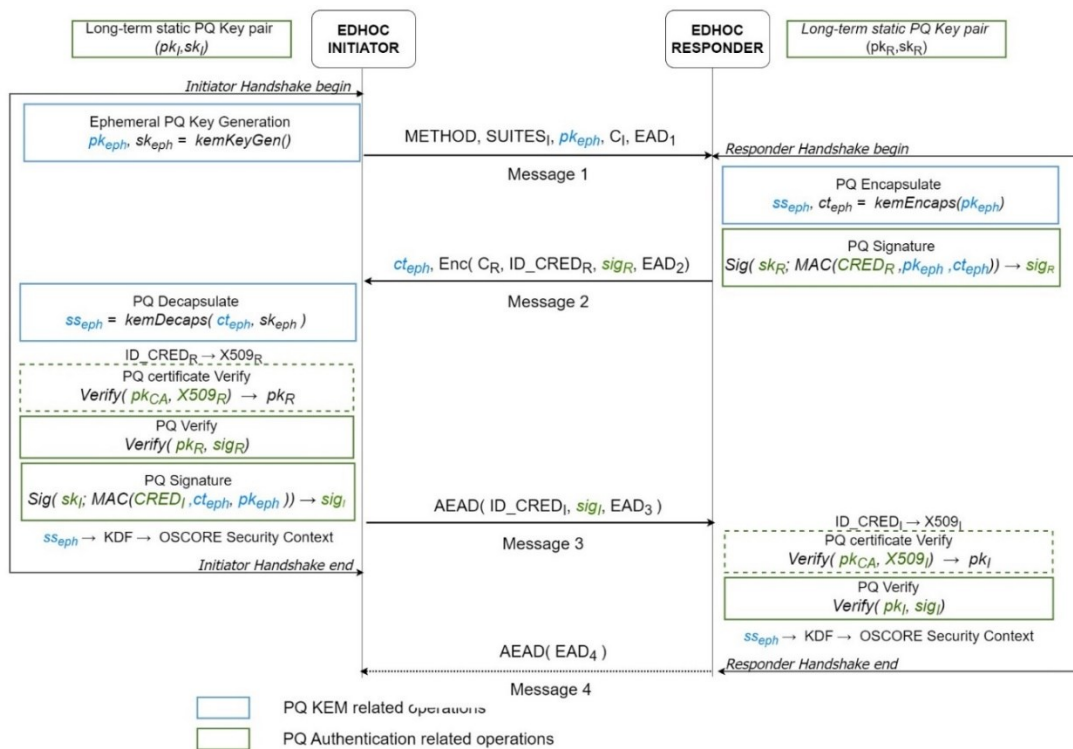
2.14.3.1.2 Βασική λειτουργία των πρωτοκόλλων PQ-EDHOC

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει την ανταλλαγή μηνυμάτων του PQ-EDHOC και επισημαίνει τις PQ λειτουργίες που εκτελούνται σε κάθε φάση. Οι λειτουργίες που σχετίζονται με το PQC KEM εμφανίζονται με μπλε, ενώ οι λειτουργίες των PQC ψηφιακών υπογραφών εμφανίζονται με πράσινο.

Η επικοινωνία μεταξύ των δύο μερών στο PQ-EDHOC ξεκινά με τον *Initiator* να δημιουργεί ένα ζεύγος μετακβαντικών κλειδιών και να στέλνει το εφήμερο δημόσιο κλειδί στον *Responder*. Ο *Responder* ενθυλακώνει το κλειδί, δημιουργεί ένα ciphertext (κρυπτοκείμενο), το οποίο στέλνει πίσω στον *Initiator*, και παράγει ένα κοινό μυστικό, το οποίο διατηρεί. Μετά την παραλαβή του μηνύματος, ο *Initiator* αποκωδικοποιεί το ciphertext και εξαγάγει το ίδιο κοινό μυστικό.

Στη συνέχεια, και τα δύο μέρη παράγουν ένα ψευδοτυχαίο κλειδί (PRK) από το κοινό μυστικό για ασφαλή επικοινωνία. Ο *Initiator* αποκρυπτογραφεί το μήνυμα, επικυρώνει το πιστοποιητικό PQ-X.509 του *Responder* και επαληθεύει την PQC υπογραφή πριν στείλει το υπογεγραμμένο και κρυπτογραφημένο μήνυμα MSG3. Ο *Responder* αποκρυπτογραφεί το MSG3, επαληθεύει την αυθεντικοποίηση του *Initiator* και ολοκληρώνει το πρωτόκολλο.

Αυτή η διαδικασία αντικαθιστά το ECDH και το ECDSA με PQC KEM και μετα-κβαντικές ψηφιακές υπογραφές, εξασφαλίζοντας ασφάλεια ανθεκτική σε κβαντικές επιθέσεις.



Εικόνα 108 Ανταλλαγή Μηνυμάτων στο PQ-EDHOC

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

Η υλοποίησή μας περιλαμβάνει αρκετούς PQC KEMs και ψηφιακές υπογραφές. Για τους KEMs, χρησιμοποιούμε το ML-KEM βασισμένο στο CRYSTALS-Kyber⁹, με παραμέτρους για τα επίπεδα ασφάλειας του NIST 1 (ML-KEM-512) και 3 (ML-KEM-768), και επίσης εξετάζουμε τους υποψήφιους του NIST PQC για τον 4ο γύρο¹⁰, HQC και BIKE, με παραμέτρους για το επίπεδο ασφάλειας του NIST 1 (HQC1 και BIKE1). Για τις ψηφιακές υπογραφές, περιλαμβάνεται το ML-DSA (βασισμένο στο CRYSTALS-Dilithium)¹¹ με παραμέτρους για το επίπεδο ασφάλειας του NIST 2 (ML-DSA-44), μαζί με το FALCON¹² με παραμέτρους για το επίπεδο ασφάλειας του NIST 1 (FALCON1).

Για να προσθέσουμε περισσότερη ποικιλία στις ψηφιακές υπογραφές PQC που δοκιμάζονται στο πρωτόκολλο EDHOC, λάβαμε υπόψη υποψήφιους αλγόριθμους από τον πρόσθετο γύρο του NIST PQC. Εστίασαμε σε πιο συμπαγείς αλγόριθμους κατάλληλους για IoT συσκευές με περιορισμένους πόρους. Επιλέξαμε τους HAWK και HAETAΕ επειδή είναι πιο συμπαγείς από τον ML-DSA και μπορούν να εκτελεστούν στη συσκευή μας με περιορισμένους πόρους. Ο HAWK δοκιμάζεται με ρυθμίσεις επιπέδου ασφάλειας 1 του NIST (HAWK1), ενώ ο HAETAΕ δοκιμάζεται με ρυθμίσεις επιπέδου ασφάλειας 2 (HAETAΕ2).

Ένα σύνολο κρυπτογραφικών αλγορίθμων EDHOC (EDHOC cipher suite) αποτελείται από αλγόριθμους που επιλέγονται από το μητρώο IANA COSE¹³ και αναγνωρίζονται με έναν προκαθορισμένο αριθμό στο μητρώο IANA EDHOC¹⁴. Δεδομένου ότι οι αλγόριθμοι της μετα-κβαντικής κρυπτογραφίας (PQC) δεν έχουν καταχωρηθεί ακόμη στο COSE της IANA, οι νέοι αλγόριθμοι πρέπει να λάβουν τιμές καταχώρησης. Επιπλέον, κάθε συνδυασμός PQC KEM και αλγόριθμου υπογραφής απαιτεί ένα νέο σύνολο κρυπτογραφικών αλγορίθμων στο μητρώο EDHOC της IANA. Τα πρόσθετα PQC σύνολα κρυπτογραφικών αλγορίθμων για το PQ-EDHOC εμφανίζονται στην Εικόνα 109. Αυτά τα σύνολα περιλαμβάνουν τους PQC KEMs και την PQC Ψηφιακή Υπογραφή, και για κάθε συνδυασμό, χρησιμοποιούνται το ίδιο AES-CCM με ρύθμιση 16-62-128, SHA-256 για κατακερματισμό και μήκος MAC 8 byte.

Suit	Algorithms
8	AES-CCM-16-64-128, SHA-256, 8, ML-KEM-512, FALCON1, AES-CCM-16-64-128, SHA-256
9	AES-CCM-16-64-128, SHA-256, 8, ML-KEM-768, FALCON1, AES-CCM-16-64-128, SHA-256
10	AES-CCM-16-64-128, SHA-256, 8, HQC1, FALCON1, AES-CCM-16-64-128, SHA-256
11	AES-CCM-16-64-128, SHA-256, 8, BIKE1, FALCON1, AES-CCM-16-64-128, SHA-256
12	AES-CCM-16-64-128, SHA-256, 8, ML-KEM-512, ML-DSA-44, AES-CCM-16-64-128, SHA-256
14	AES-CCM-16-64-128, SHA-256, 8, ML-KEM-512, HAWK1, AES-CCM-16-64-128, SHA-256
15	AES-CCM-16-64-128, SHA-256, 8, ML-KEM-512, HAETAΕ2, AES-CCM-16-64-128, SHA-256

Εικόνα 109 Σύνολα Κρυπτογραφικών Αλγορίθμων PQC

2.14.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

2.14.4.1 Εφαρμογή PQ-EDHOC

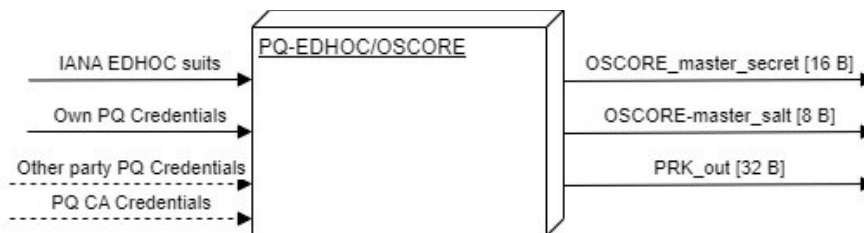
Η ανοιχτού κώδικα υλοποίηση του PQ-EDHOC πρόκειται σύντομα να είναι διαθέσιμη στο GitHub, συμπεριλαμβανομένων του κώδικα και της τεκμηρίωσης. Η υλοποίηση βασίζεται στη βιβλιοθήκη uOSCORE-uEDHOC¹⁵, μια ελαφριά βιβλιοθήκη C για EDHOC και OSCORE, ανεξάρτητη από το λειτουργικό σύστημα, σχεδιασμένη για μικροελεγκτές 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 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 liboqs¹⁶ και η mupq¹⁷ για συστήματα βασισμένα σε Linux με μη περιορισμένους πόρους, ενώ τα rpm4¹⁸ και PQClean¹⁹ χρησιμοποιούνται στο Zephyr OS²⁰ 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 Transfer²¹. 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 (Εικόνα 110) 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.



Εικόνα 110 Μονάδα PQ-EDHOC

2.15 Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα

2.15.1 Στάδια υλοποίησης

Στην παρούσα έκδοση έχει ολοκληρωθεί η εγκατάσταση, παραμετροποίηση και δοκιμαστική λειτουργία των επιμέρους υποσυστημάτων του ολοκληρωμένου συστήματος ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού με τις προσθήκες που προβλέφθηκαν στον αρχικό σχεδιασμό όπως η συλλογή και ανάλυση

Στην παρούσα ενδιάμεση έκδοση έχουν ολοκληρωθεί οι παρακάτω εργασίες.

1. Συλλογή και αξιολόγηση 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. Σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής των 3^{ων} επιμέρους υποσυστημάτων
3. Σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής της ενοποιημένης πλατφόρμας όπως και του deployment plan
4. Εγκατάσταση και παραμετροποίηση των εργαλείων για κάθε ένα από τα 3 υποσύστημα
5. Δοκιμαστική λειτουργία των επιμέρους 3^{ων} υποσυστημάτων

Οι εργασίες οι οποίες είναι εν εξελίξει και θα ολοκληρωθούν στην επόμενη, και τελική έκδοση, είναι οι εξής

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

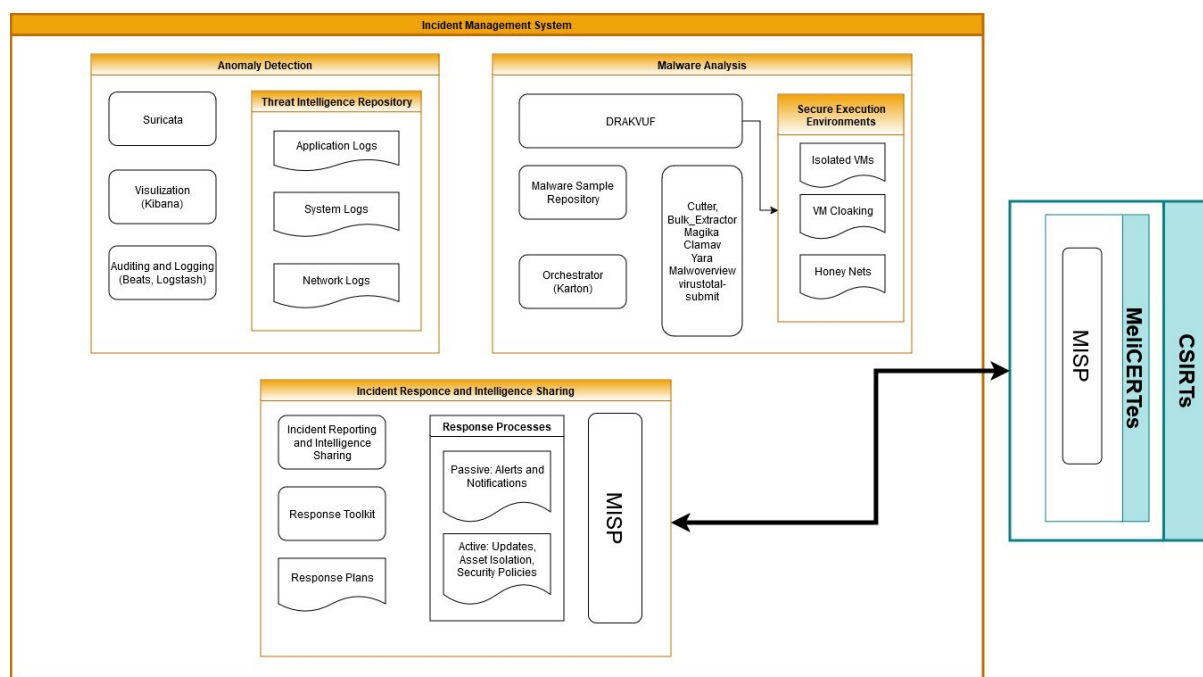
1. Ολοκλήρωση των εργαλείων στατικής ανάλυσης με τη βοήθεια του Karton orchestrator
2. Αυτόματη καταγραφή συμβάντων μετά την στατική και δυναμική ανάλυση κακόβουλου λογισμικού
3. Εγκατάσταση και δοκιμαστική λειτουργία των agents συλλογής δεδομένων του υποσυστήματος αναγνώρισης ανωμαλιών
4. Ολοκλήρωση των εργασιών ολοκλήρωσης των δύο υποσυστημάτων με το υποσύστημα αντιμετώπισης συμβάντων
5. Δοκιμαστική λειτουργία της ενοποιημένης λύσης

2.15.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

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



Εικόνα 111: Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης συστήματος

Τα βασικά υποσυστήματα της ολοκληρωμένης πλατφόρμας, όπως περιγράφονται και στο παραδοτέο Π1.2, επιτελούν τις ακόλουθες εργασίες

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 κακόβουλα ή όχι.

Το υποσύστημα cyber threat intelligence και καταγραφής και αναγνώρισης ανωμαλιών καταγράφει και αναλύει ανωμαλίες στην λειτουργία και συμπεριφορά των συσκευών και του δικτύου 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 LogStash και Beats.

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

2.15.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Το αρχικό βήμα ήταν να δημιουργηθεί 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 φυσικό μηχάνημα στον οποίο εγκαταστάθηκε το λογισμικό Proxmox. Το Proxmox είναι ανοιχτό λογισμικό βασισμένο σε Linux Debian που επιτρέπει στους χρήστες να διαχειρίζονται εικονικές μηχανές, όπως επίσης και τους αποθηκευτικούς χώρους τους. Για το συγκεκριμένο project δημιουργήθηκαν οι παρακάτω εικονικές μηχανές.

2.15.3.1 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 με πρόσβαση σε δύο διαφορετικά δίκτυα. Η μία κάρτα επικοινωνεί με το ιδιωτικό δίκτυο του project έχοντας επικοινωνία με την προεπιλεγμένη πύλη και το διαδίκτυο, και η άλλη κάρτα επικοινωνεί με το εσωτερικό δίκτυο της φάρμας των εικονικών μηχανών. Με αυτό τον τρόπο προστίθεται ασφάλεια στο συνολικό περιβάλλον, εφόσον δεν εκτίθενται όλες οι εικονικές μηχανές προς το διαδίκτυο, παρά μόνο ο VPN server και αυτός στις απαιτούμενες θύρες του ώστε να μπορεί να προσφέρει την υπηρεσία του. Οι υπηρεσίες VPN στηρίχθηκαν στο πρωτόκολλο ανοιχτού κώδικα Wireguard. Για την επικοινωνία ανταλλάσσονται κλειδιά κρυπτογράφησης μεταξύ του client και του server με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα ασφαλές tunnel επικοινωνίας μεταξύ τους. Όλη η πληροφορία που περνά μέσα από αυτό το tunnel είναι κρυπτογραφημένη, το οποίο καθιστά την υποκλοπή δεδομένων σχεδόν ανέφικτη. Η κάθε τερματική συσκευή που χρειάζεται να συνδεθεί με τον VPN-server θα πρέπει να έχει εγκατεστημένη στο λειτουργικό της σύστημα κάποιο λογισμικό για VPN υπηρεσίες το οποίο όμως θα πρέπει να υποστηρίζει το πρωτόκολλο Wireguard.

2.15.3.2 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 ένα δίκτυο και να ειδοποιεί τον διαχειριστή όταν συναντήσει οτιδήποτε κακόβουλο. Πραγματοποιεί ανάλυση πακέτων του δικτύου με βάση κάποιες βιβλιοθήκες που διατηρεί και επιπρόσθετα συγκρίνει την ροή της κίνησης με συγκεκριμένα μοτίβα ροών 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.

2.15.3.3 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 σάς επιτρέπει να αποθηκεύετε, να αναζητάτε και να αναλύετε τεράστιους όγκους δεδομένων γρήγορα και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και να δίνετε απαντήσεις σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Είναι σε θέση να επιτύχει γρήγορες απαντήσεις αναζήτησης επειδή αντί να αναζητά απευθείας το κείμενο, αναζητά ένα ευρετήριο. 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 στα δεδομένα που διαβάζει από το elastic search. 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 και να οπτικοποιήσετε τα αποτελέσματα.

2.15.3.4 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.

Στον διακομιστή αυτόν είναι εγκατεστημένο το λειτουργικό σύστημα Ubuntu και πάνω σε αυτό έχουν εγκατασταθεί λογισμικά όπως τα:

- 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 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.

2.15.3.5 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 δρουν 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 επιθεωρεί 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 το κακόβουλο λογισμικό πως 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 ήταν εφικτή η εκκίνηση της εικονικής μηχανής του Drakvuf εφόσον ο Hypervisor του ήταν στημένος και αυτός σε εικονική μηχανή. Έπειτα από πολλές προσπάθειες, πραγματοποιήθηκε η αναγκαστική εγκατάσταση του σε φυσικό διακομιστή όπου λειτούργησε χωρίς κανένα απολύτως πρόβλημα.

2.15.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Παρακάτω φαίνονται παραδείγματα χρήσης των εργαλείων του έργου συνοδευόμενα από εικόνες.

Αναγνώριση Ανωμαλιών. Σε αυτό το παράδειγμα ο διαχειριστής έχει συλλέξει δικτυακή κίνηση σε μορφή αρχείου .pcap και την έχει ανεβάσει στο suricata προς ανάλυση. Η ανάλυση γίνεται με βάση ένα σύνολο κανόνων που έχουν δημιουργηθεί από τον διαχειριστή. Ο κανόνας σε αυτήν την περίπτωση αναφέρει πως θα στέλνει ειδοποίηση όταν μία σύνδεση που φεύγει από το ιδιωτικό δίκτυο προς τα εξωτερικά δημόσια δίκτυα επιστρέφει απάντηση GET του HTTP πρωτοκόλλου.

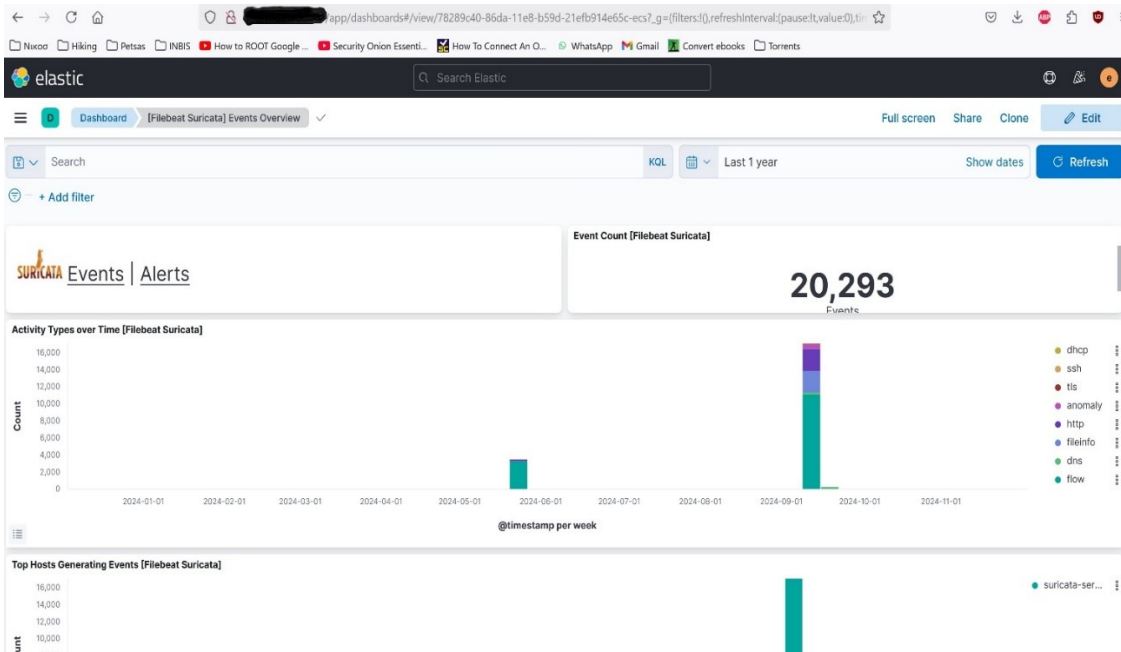
Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

```
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-misc.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-mobile_malware.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-nethios.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-p2p.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-policy.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-pop3.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-rpc.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-scan.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-smtp.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-smtp.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-sql.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-telnet.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-tftp.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-trojan.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-user_agents.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-voip.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-web_client.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-web_server.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/e
merging-worm.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Warning> - [ERRCODE: SC_ERR_NO_RULES(42)] - No rule files match the pattern /etc/suricata/rules/t
or.rules
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Notice> - all 2 packet processing threads, 4 management threads initialized, engine started.
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Notice> - Signal Received. Stopping engine.
11/7/2023 -- 00:57:35 - <Notice> - Pcap-file module read 1 files, 200 packets, 54238 bytes
analyst@f05708ca8256:~$ ls -l
```

Εικόνα 112: Παράδειγμα ανάλυσης δικτυακής κίνησης και αναγνώρισης ανωμαλιών (εργαλείο suricata)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δύο πακέτα πληρούσαν τα κριτήρια των προσαρμοσμένων κανόνων από 200 συνολικά πακέτα στο αρχείο .rcap

Καταγραφή και Ανάλυση Συμβάντων (Event Logging and Visualization). Στο παράδειγμα αυτό έχουν συλλεχθεί αρχεία καταγραφής, έχουν αποσταλεί στην βάση δεδομένων και παρουσιάζονται με γραφικά στην πλατφόρμα Kibana. Οι γραφικές αναπαραστάσεις αναπτύσσονται με βάση κριτήρια από τους διαχειριστές της πλατφόρμας. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα γράφημα που έχει λάβει ως είσοδο την ροή δεδομένων και την έχει κατηγοριοποιήσει με βάση τον τύπο της κίνησης και τον χρόνο λήψης της.



Εικόνα 113: Παράδειγμα γραφικής παρουσίασης αρχείων καταγραφής και συμβάντων

Στατική Ανάλυση Κακόβουλου Λογισμικού. Στην κατηγορία της στατικής ανάλυσης δεδομένων επιλέχθηκε το εργαλείο του malwareview. Σαν είσοδο έχει δοθεί το URL www.in.gr και το Malwareview ελέγχει την διεύθυνση βασιζόμενο τους δικούς του μηχανισμούς, καθώς επίσης κάνοντας χρήση διαφορετικών εργαλείων όπως το Dr.Web, Sophos κ.ά. Στην κορυφή των αποτελεσμάτων απεικονίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά διαφορετικό εργαλείο που έχει χρησιμοποιηθεί.

```
remnux@remnux:~$ malwoverview -v 5 -V https://www.in.gr

Last Final URL:           https://www.in.gr/
Harmless:                 68
Malicious:                0
Undetected:               28
Suspicious:               0

Last SHA256 Content:      5c20b353f6e127232c793f7fa5a0a1529a89b59b87911dfa3bbdc9f2b5e6e00b
Last HTTP Response Code: 200
Last Analysis Date:       2024-12-03 08:18:53
Times Submitted:         153
Reputation:               0

Threat Names:

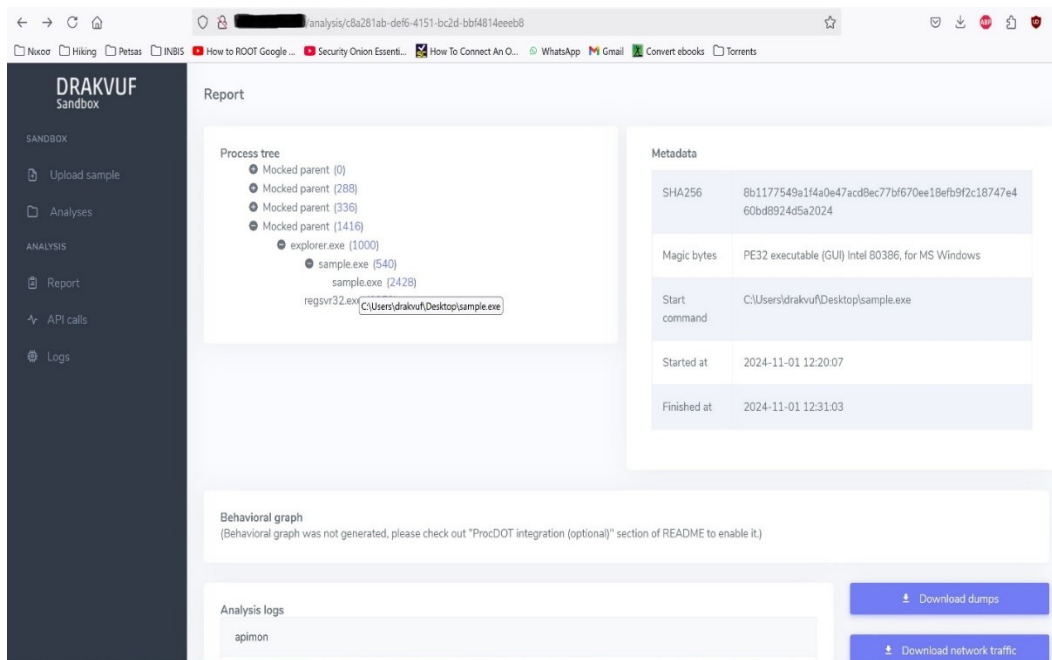
Redirection Chain:
                        https://www.in.gr/

AV Report:
AlienVault:             clean
BitDefender:            clean
CyRadar:                 clean
Dr.Web:                  clean
Emsisoft:                clean
ESET:                    clean
Forcepoint:             clean
Fortinet:                clean
G-Data:                  clean
Google:                  clean
Kaspersky:               clean
MalwarePatrol:           clean
OpenPhish:               clean
PhishLabs:               unrated
Phishtank:               clean
Sophos:                  clean
Sucuri:                  clean
Trustwave:               clean
URLhaus:                 clean
VX Vault:                clean
Webroot:                 clean
```

Εικόνα 114: Παράδειγμα στατικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού (εργαλείο malwareview)

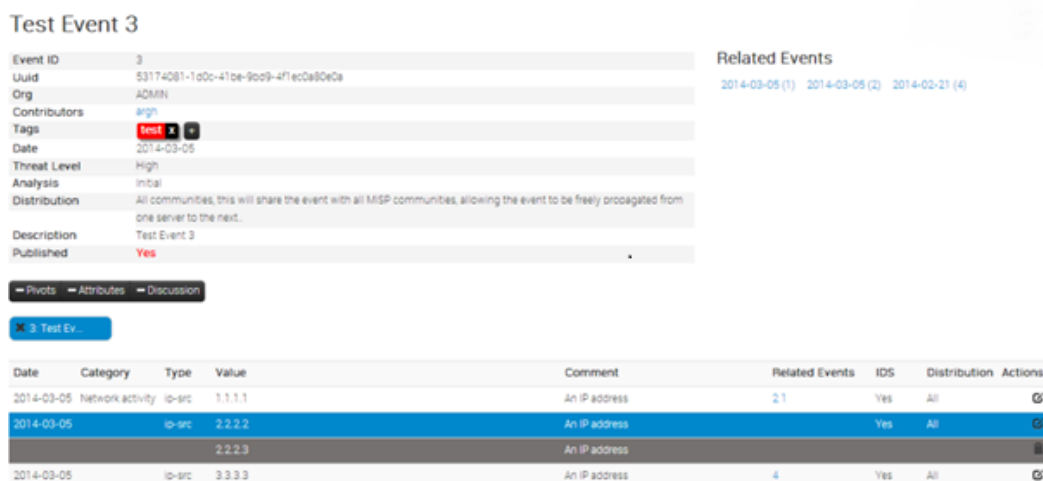
Δυναμική Ανάλυση Κακόβουλου Λογισμικού. Στο σενάριο αυτό οι διαχειριστές συνδέονται στην γραφική διεπαφή της πλατφόρμας και ανεβάζουν ένα εκτελέσιμο αρχείο για ανάλυση συμπεριφοράς.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 115: Παράδειγμα δυναμικής ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού (εργαλείο drakvuf)

Καταγραφή και Διαχείριση Συμβάντων (Incident Management). Για λόγους testing του εργαλείου, δημιουργήθηκε ένα συμβάν στην πλατφόρμα που ονομάστηκε test event και χαρακτηρίστηκε ως δικτυακή κίνηση. Η τιμή που κάνει το συμβάν μοναδικό είναι η IP διεύθυνση προέλευσης του πακέτου. Στην κεντρική σελίδα παρουσιάζεται συνοπτικά η πληροφορία του συμβάντος, δεξιά μία λίστα από συσχετιζόμενα συμβάντα και στο κάτω μέρος ίδια συμβάντα που εμφανίστηκαν στο παρελθόν.



Εικόνα 116: Παράδειγμα καταγραφής και διαχείρισης συμβάντων (εργαλείο MISP)

2.16 Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ

2.16.1 Στάδια υλοποίησης

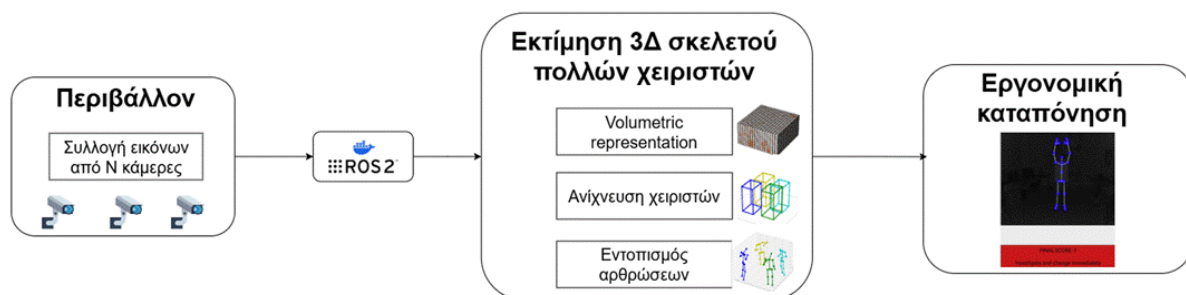
Οι επιμέρους εργασίες της λύσης ασφαλούς αλληλεπίδρασης ανθρώπου ρομπότ απαριθμούνται στην επόμενη λίστα, ενώ τα αποτελέσματα των σταδίων ανάπτυξης που έχουν ολοκληρωθεί περιγράφονται στις ακόλουθες υπο-ενότητες.

- Δημιουργία περιβάλλοντος ταυτόχρονης παρακολούθησης πολλών χειριστών
- Συλλογή δεδομένων εικόνων
- Δημιουργία νευρωνικού μοντέλου για σύντηξη δεδομένων
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης 3D πόζας
- Ανάπτυξη νευρωνικού μοντέλου εκτίμησης 3D πόζας
- Ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης εργονομικής καταπόνησης
- Ενσωμάτωση επιπλέον αλγορίθμων σύντηξης δεδομένων
- Τελική υλοποίηση και αξιολόγηση συστήματος

Την παρούσα χρονική περίοδο, οριστικοποιείται η ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης 3D σκελετού πολλών χειριστών και ο υπολογισμός της εργονομικής καταπόνησης των χειριστών τα οποία και θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω. Η ενσωμάτωση επιπλέον αλγορίθμων βελτιστοποίησης για σύντηξη δεδομένων στο περιβάλλον είναι εν εξελίξει και έχει ολοκληρωθεί η οριστικοποίηση των προδιαγραφών αυτού του μέρους.

2.16.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η Εικόνα 117 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική της ενδιάμεσης έκδοσης της προτεινόμενης λύσης. Πιο συγκεκριμένα, στο **Περιβάλλον** υλοποίησης συλλέγονται τα απαραίτητα δεδομένα εικόνες πολλών χειριστών, τα οποία επεξεργάζονται καταλλήλως για την **Εκτίμηση 3D σκελετού πολλών χειριστών**. Στη συνέχεια, οι 3D σκελετοί, και πιο συγκεκριμένα οι 3D αρθρώσεις θα αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό της **Εργονομικής καταπόνησης** κάθε χειριστή μέσω της μετρικής RULA.



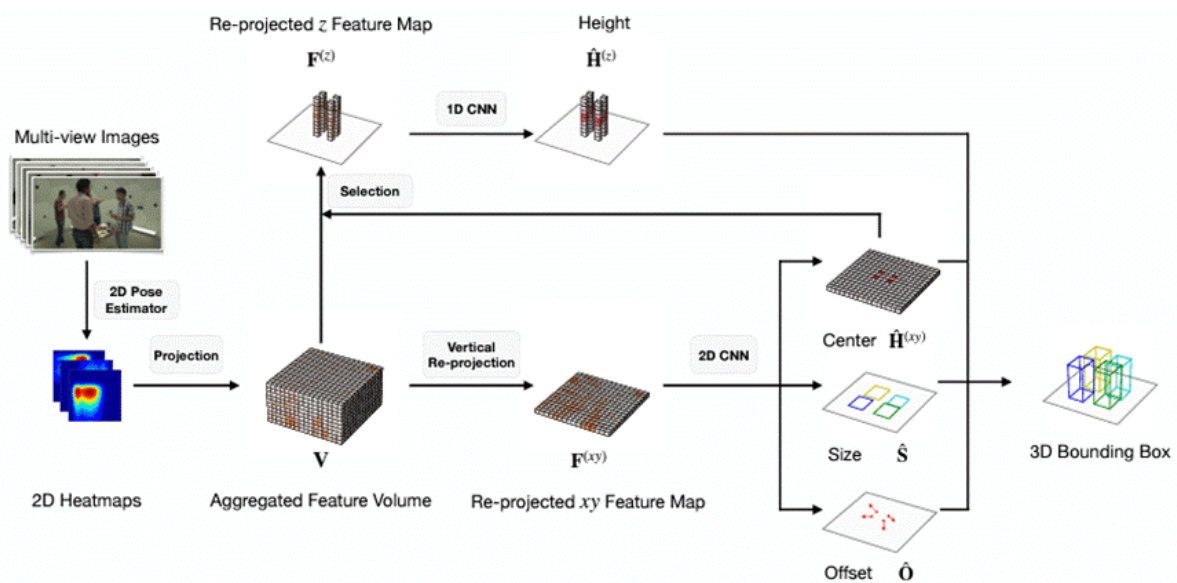
Εικόνα 117: Αρχιτεκτονική λύσης ασφαλούς αλληλεπίδρασης ανθρώπου ρομπότ

2.16.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

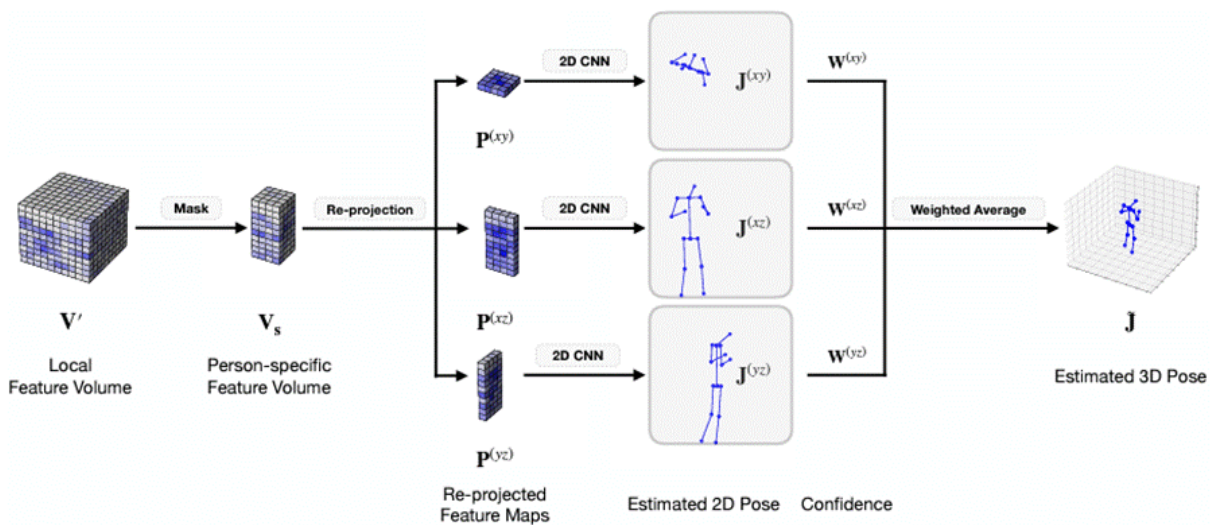
Περιβάλλον: Το περιβάλλον υλοποίησης περιλαμβάνει N κάμερες που καταγράφουν την ίδια σκηνή εργασίας υπό διαφορετική γωνία λήψης. Για κάθε καρτέ που συλλέγεται, κατασκευάζεται ένα `rostopic camera_n/image/`, που κάνει `publish` τα δεδομένα εικόνες σε έναν κεντρικό κόμβο ROS, στον οποίο υλοποιείται η διαδικασία υπολογισμού των 3D σκελετών.

Εκτίμηση 3D σκελετού πολλών χειριστών: Ο στόχος εδώ είναι η εκτίμηση της 3D πόζας όλων των ανθρώπων-χειριστών σε ολικές συντεταγμένες, έχοντας ως είσοδο εικόνες πολλαπλών λήψεων και τις παραμέτρους των καμερών²². Η προσέγγιση βασίζεται σε *volumetric representations*, ανιχνεύοντας 3D bounding boxes ως ενδιάμεσο βήμα. Η είσοδος μας είναι ένας τρισδιάστατος όγκος χαρακτηριστικών $V \in \mathbb{R}^{K \times L \times W \times H}$, ο οποίος κατασκευάζεται μέσω της επαναπροβολής των διδιάστατων heatmap στάσεων από πολλαπλές κάμερες στον τρισδιάστατο χώρο voxel²³. Οι διδιάστατοι heatmap στάσεων εξάγονται από τις εικόνες χρησιμοποιώντας ένα έτοιμο μοντέλο εκτίμησης πόζας²⁴. Το $L \times W \times H$ αντιπροσωπεύει τον αριθμό των voxels που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση του χώρου, ενώ το K αντιπροσωπεύει τον αριθμό των αρθρώσεων. Για την ανίχνευση των χειριστών, προβάλλουμε το V στο επίπεδο xy για να αποκτήσουμε τον χάρτη χαρακτηριστικών $F^{(xy)}$ (bird's-eye view). Ένα 2D CNN πολλαπλών κλάδων εκτιμά τρεις χάρτες χαρακτηριστικών $(\hat{H}^{(xy)}, \hat{S}, \hat{\theta})$ που κωδικοποιούν αντίστοιχα τη θέση του κέντρου κάθε ατόμου, το μέγεθος του bounding box

και την απόκλιση του κέντρου. Στη συνέχεια, επιλέγουμε τις μονοδιάστατες στήλες χαρακτηριστικών $F^{(z)}$ από θέσεις με υψηλές τιμές εμπιστοσύνης στο $\hat{H}^{(xy)}$. Έπειτα, ένα μονοδιάστατο CNN εκτιμά τον heatmap $\hat{H}^{(z)}$ για την κατακόρυφη θέση του κέντρου του bounding box. Τέλος, εξάγεται το αντίστοιχο 3D bounding box για κάθε χειριστή. Σε ό,τι αφορά την εκτίμηση των αρθρώσεων, για κάθε άτομο αρχικά κατασκευάζουμε τον τοπικό όγκο χαρακτηριστικών του V' . Ο ειδικός για το άτομο όγκος χαρακτηριστικών V_s προκύπτει μέσω μίας μάσκας στο V' χρησιμοποιώντας το ανιχνευμένο 3D bounding box. Επαναπροβάλλουμε τον V_s σε τρία ορθογώνια επίπεδα συντεταγμένων για να αποκτήσουμε τους δισδιάστατους χάρτες χαρακτηριστικών $P^{(t)}$. Ένας κοινόχρηστος δισδιάστατος εκτιμητής πόζας υπολογίζει τις θέσεις των αρθρώσεων $J^{(t)}$ για κάθε επίπεδο, ενώ ένα δίκτυο εμπιστοσύνης υπολογίζει τα αντίστοιχα βάρη $W^{(t)}$. Τέλος, η τρισδιάστατη στάση \hat{J} υπολογίζεται ζυγίζοντας τις $J^{(t)}$ με τα $W^{(t)}$ ανά ζεύγη ($t \in \{xy, xz, yz\}$).



Εικόνα 118: Ανίχνευση χειριστών



Εικόνα 119: Εντοπισμός αρθρώσεων

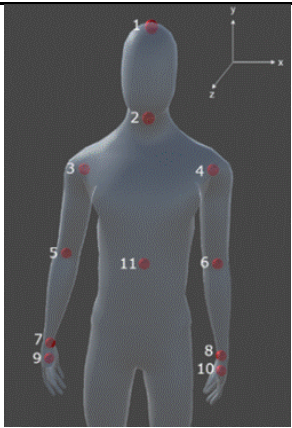
Εργονομική καταπόνηση: Η μετρική RULA²⁵ είναι μία από τις πλέον υιοθετημένες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία για την εμπειρική αξιολόγηση του κινδύνου εμφάνισης μυοσκελετικών διαταραχών που σχετίζονται με εργασία. Πιο συγκεκριμένα, εκτιμώντας τον 3D σκελετό κάθε χειριστή, επιλέγουμε εκείνες τις αρθρώσεις που είναι απαραίτητες για την εκτίμηση της εργονομικής καταπόνησης. Παράλληλα, υπολογίζονται οι γωνίες των αρθρώσεων που απαιτούνται από τον αλγόριθμο χρησιμοποιώντας τις θέσεις των αρθρώσεων που εμφανίζονται στον Πίνακα 3 για κάθε καρέ προσομοίωσης. Δεδομένης της θέσης δύο αρθρώσεων στον τρισδιάστατο χώρο, P_1 και P_2 , μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τη γωνία φ μεταξύ του διανύσματος $\overrightarrow{P_1P_2}$ και του διανύσματος κατεύθυνσης \vec{V} χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$\varphi = \arccos \frac{\overrightarrow{P_1P_2} \cdot \vec{V}}{\|\overrightarrow{P_1P_2}\| \cdot \|\vec{V}\|}$$

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις αρθρώσεις που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό των γωνιών μαζί με τα κατάλληλα διανύσματα κατεύθυνσης.

Πίνακας 11: Αρθρώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του RULA (Δ: Δεξιά, Α: Αριστερά)

Αρθρώσεις	Διάνυσμα κατεύθυνσης (\vec{V})	Περιγραφή γωνίας
3-5 (Δ) and 4-6 (Α)	$\overrightarrow{(0,1,0)}$	Γωνίες άνω βραχίονα (Δ&Α)
5-7 (Δ) and 6-8 (Α)	$\overrightarrow{(0,1,0)}$	Γωνίες κάτω βραχίονα (Δ&Α)
7-9 (Δ) and 8-10 (Α)	$\overrightarrow{P_{j5}P_{j7}}$ and $\overrightarrow{P_{j6}P_{j8}}$	Γωνίες καρπού (Δ&Α)
1-2	$\overrightarrow{(0,1,0)}$	Γωνία αυχένα
2-11	$\overrightarrow{(0,1,0)}$	Γωνία κορμού



Μετά τον υπολογισμό των απαιτούμενων γωνιών των αρθρώσεων και λαμβάνοντας υπόψη άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την καταπόνηση του σώματος, όπως οι επαναλήψεις που απαιτούνται για μια συγκεκριμένη ενέργεια, υπολογίζεται μια τελική βαθμολογία που κυμαίνεται από 1 έως 7. Μια βαθμολογία 1 ή 2 υποδηλώνει αποδεκτή στάση σώματος, ενώ μια βαθμολογία 3 ή 4 υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση χωρίς την απαίτηση άμεσων αλλαγών στο εργασιακό περιβάλλον. Υψηλότερες βαθμολογίες υποδηλώνουν την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση και αλλαγές που πρέπει να εφαρμοστούν στο εγγύς μέλλον (βαθμολογία 5 ή 6) ή άμεσα (βαθμολογία 7).

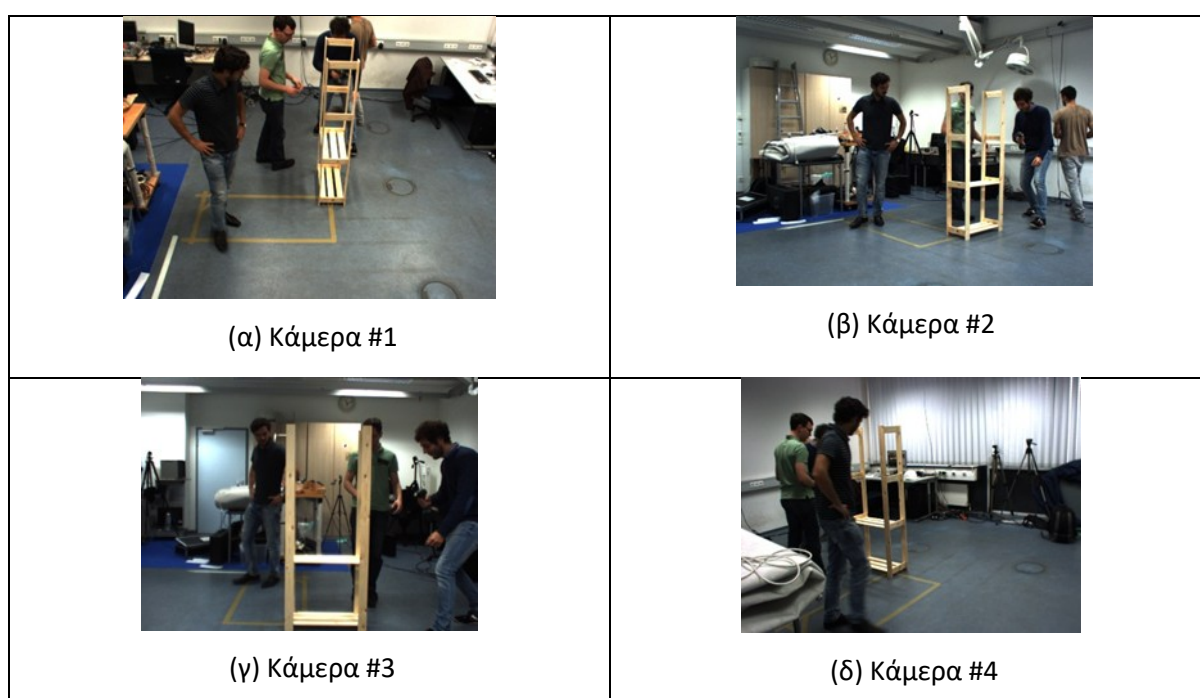
2.16.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Η συλλογή δεδομένων εικόνων σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνει δύο ελεύθερα διαθέσιμα σύνολα δεδομένων, τα Campus και Shelf²⁶. Το πρώτο αποτελείται από τρεις κάμερες που καταγράφουν την ίδια σκηνή, με σύνολο εικόνων 2000 (για κάθε κάμερα), ενώ το δεύτερο αποτελείται από τέσσερις κάμερες, με σύνολο εικόνων 3200 (για κάθε κάμερα). Παράλληλα, είναι διαθέσιμες οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι (intrinsic & extrinsic parameters) των καμερών, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο υπολογισμός του 3D σκελετού σε έναν κοινό 3D χώρο. Σε επόμενο στάδιο θα συλλεγούν εικόνες από πραγματικό εργαστηριακό χώρο.

Ενδεικτικά παραδείγματα δεδομένων φαίνονται στις παρακάτω Εικόνες. Να σημειωθεί ότι στο στάδιο αυτό, τα συγκεκριμένα σύνολα δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν από την λύση της ασφαλούς αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ.



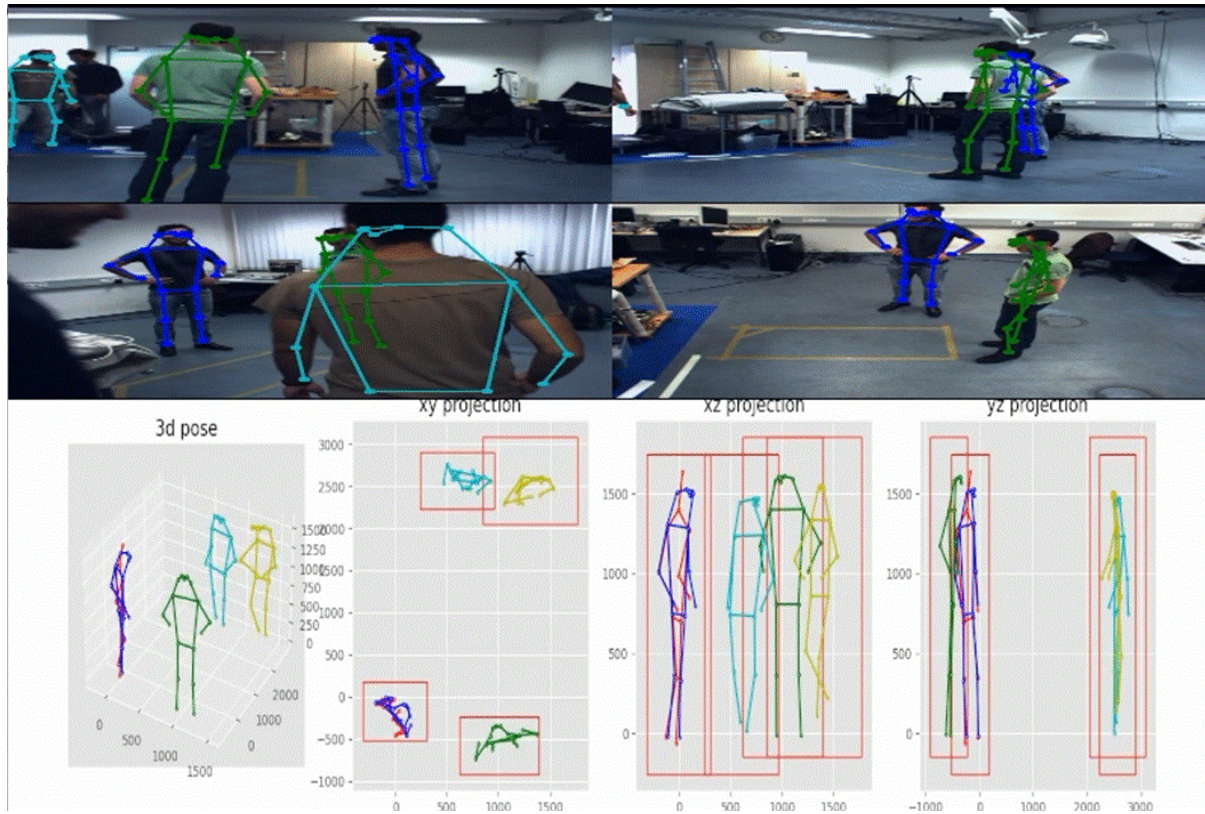
Εικόνα 120: Ενδεικτικά δεδομένα Campus



Εικόνα 121: Ενδεικτικά δεδομένα Shelf

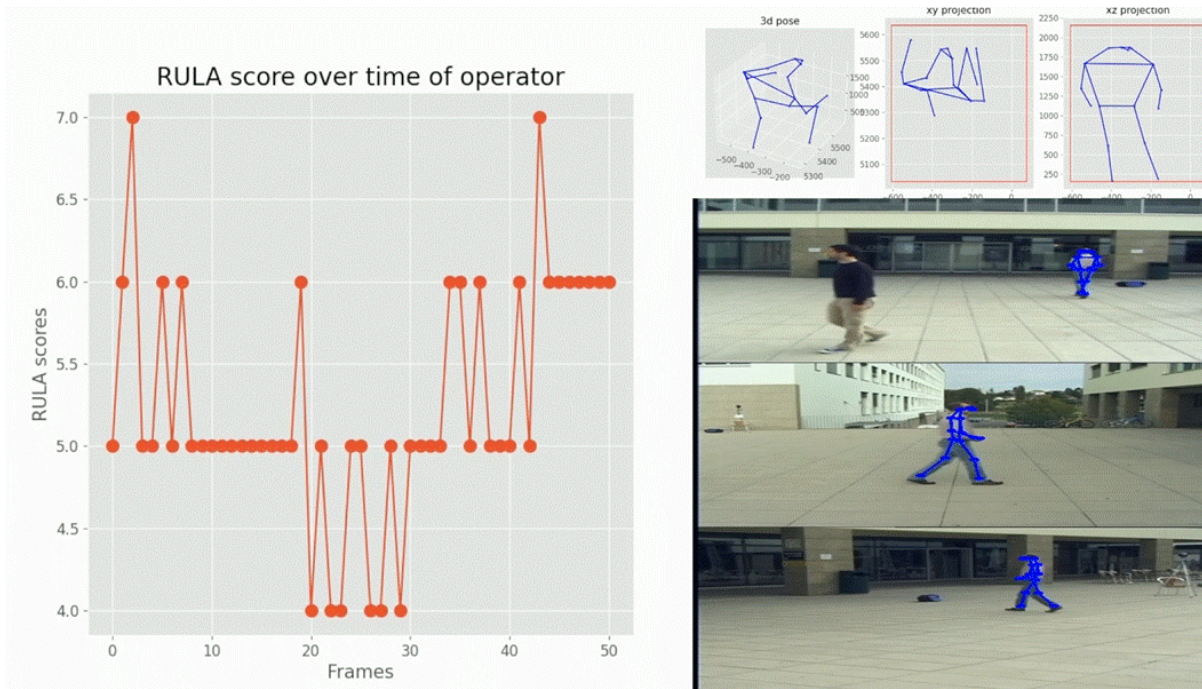
Με βάση τα προηγούμενα, αναπτύχθηκαν τέσσερα ενδεικτικά βίντεο υλοποίησης της προτεινομένης λύσης, που βρίσκονται αποθηκευμένα [εδώ](#). Πιο συγκεκριμένα, αρχικά υπολογίστηκε ο 3D σκελετός της πόζας πολλών χειριστών, συνδυάζοντας δεδομένα τα δεδομένα είτε από τρεις είτε από πέντε κάμερες. Οι Εικόνα 122, Εικόνα 123 και Εικόνα 124 παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα αποτελέσματα:

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

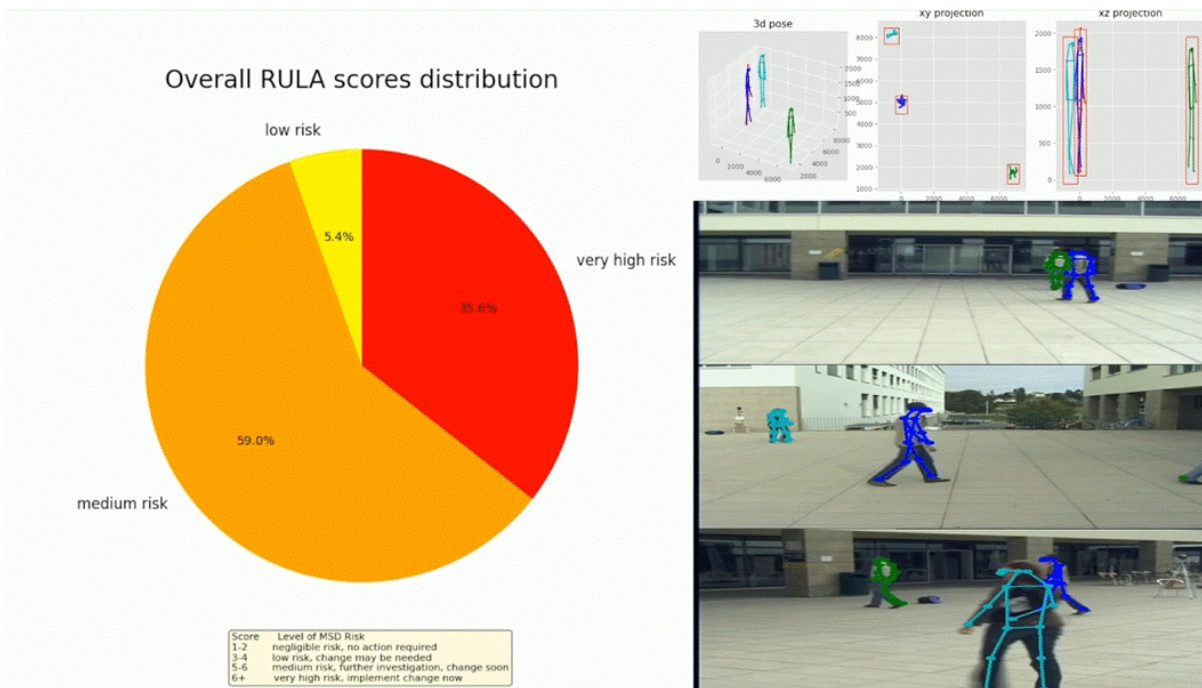


Εικόνα 122: Υπολογισμός 3D σκελετού ταυτόχρονα πολλών χειριστών, χρησιμοποιώντας 3 κάμερες που καταγράφουν την ίδια σκηνή. Πέρα από την συνολική 3D πόζα, παρουσιάζονται και τα ενδιάμεσα βήματα υπολογισμού της πόζας στα επίπεδα xy , xz και yz , μαζί με τον αντίστοιχο 2D σκελετό σε κάθε μία εικόνα.

Επιπλέον, βασιζόμενοι στην εξαγωγή του 3D σκελετού, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την μετρική RULA και να καταγράψουμε την εργονομική καταπόνηση κάθε χειριστή. Στις παρακάτω Εικόνες 17 και 18, παρατηρούμε την εξέλιξη της μετρικής RULA στο χρόνο για έναν συγκεκριμένο χειριστή με βάση τον τρόπο κινείται, και επιπλέον μία συνολική εξέλιξη της μετρικής για όλους τους χειριστές που μας επιτρέπει να τους ομαδοποιήσουμε με βάση την μέση καταπόνηση τους.



Εικόνα 123: Εξέλιξη της μετρικής RULA στον χρόνο για έναν χειριστή.



Εικόνα 124: Εξέλιξη της μετρικής RULA για όλους τους χειριστές, επιτρέποντας την ομαδοποίηση τους με βάση την μέση καταπόνηση

2.17 Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία

Ο άνθρωπος είναι το κέντρο των δραστηριοτήτων των επιχειρήσεων. Η βιομηχανία 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 χρησιμοποιώντας 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 απο 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 με την εκτέλεση κώδικα όσο και απευθείας από εργαζομένους μέσω browser. Η ανάπτυξη μιας λύσης κατανόησης σκηνής έχει πολλά επιμέρους στοιχεία τα οποία απαιτούν τόσο τεχνικού επιπέδου δουλειά, (υλοποίηση λογισμικού server για μεταγωγή εικόνων), τόσο σε επίπεδο εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων η οποία είναι πολύπλοκη και πολύ χρονοβόρα, και όσο σε επίπεδο διεπαφής front-end για την φιλική προς τον τελικό χρήστη εμπειρία κατά την χρήση του λογισμικού. Αξιοποιώντας την πολυετή εμπειρία μας στον τομέα της υπολογιστικής όρασης έχουμε ήδη ένα τμηματικά λειτουργικό σύστημα του οποίου οι λεπτομέρειες θα παρατεθούν στις επόμενες ενότητες.

2.17.1 Στάδια υλοποίησης

Η ανάπτυξη της λύσης μας μπορεί να τμηματοποιηθεί σε 10 λογικά στάδια εργασιών:

- **Διερεύνηση βιβλιογραφίας κατάλληλων νέων τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης.** Κύριος στόχος του πρώτου βήματος εκπόνησης της λύσης ήταν η βιβλιογραφική έρευνα για μεθόδους. Το βήμα αυτό έλαβε χώρα τους 2 πρώτους μήνες αναδεικνύοντας τα νευρωνικά δίκτυα U-NET σαν μεθοδολογία διακριτοποίησης της εικόνας σε περιοχές ενδιαφέροντος, και εντοπισμού της ανθρώπινης παρουσίας. Κατόπιν σύνολα δεδομένων όπως πχ το COCO 2017 αλλά και τεχνικές δυναμικής παραγωγής δεδομένων εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων όπως πχ το Stable Diffusion αναγνωρίστηκαν σαν κατάλληλες πηγές για την εκπαίδευση της μεθόδου.
- **Προορισμός δομών δεδομένων/αρχιτεκτονικής υλοποίησης.** Σαν δεύτερο βήμα της λύσης και ταυτόχρονα με την ωρίμανση της βιβλιογραφικής έρευνας, με το βήμα αυτό αποφασίστηκαν οι κατάλληλες μορφές εισόδου/εξόδου της αρχιτεκτονικής ενώ δημιουργήθηκε ένα σκαρίφημα της αρχιτεκτονικής για τον ορισμό των επιμέρους στοιχείων της.
- **Ανάπτυξη μεθόδου εντοπισμού αρθρώσεων RGB σε 2D.** Το βήμα αυτό ήταν το πρώτο βήμα υλοποίησης με στόχο την ανάπτυξη και εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου δημιουργημένου εξ ολοκλήρου από εμάς με την ικανότητα να εντοπίζει σε πρώτη φάση τους ανθρώπους σε μια σκηνή επιστρέφοντας τον σκελετό του σαν δισδιάστατα σημεία. Το τμήμα αυτό της υλοποίησης ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2024 και ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο.
- **Ενσωμάτωση νευρωνικών δικτύων σε ένα κοινό πακέτο λογισμικού.** Κατά το βήμα αυτό τα διάφορα μοντέλα ενσωματώθηκαν σε ένα κοινό πακέτο λογισμικού με την δυνατότητα να ενοποιήσει τα δεδομένα τους υπο μια κοινή δομή δεδομένων (Βήμα 2).
- **Εκπαίδευση/Βελτίωση νευρωνικών δικτύων.** Αυτό είναι το πιο σημαντικό, δύσκολο και χρονοβόρο κομμάτι της συγκεκριμένης λύσης. Αναμένουμε την συνέχεια της προσπάθειας αυτής τουλάχιστον μέχρι τον Μάρτιο. Παρόλα αυτά ακόμα και μετά την ολοκλήρωση του έργου σχεδιάζουμε την παροχή δυνατότητας training feedback στους πελάτες της εφαρμογής έτσι ώστε περιπτώσεις όπου το δίκτυο δεν γενικεύει σωστά να μπορούν να προστεθούν στα δεδομένα εκπαίδευσης και να καλυφθούν από την μέθοδο.
- **Σχεδιασμός/Υλοποίηση εφαρμογής Server.** Κατά το βήμα αυτό που διήρκησε από τον μήνα Απρίλιο έως και τον Ιούλιο υλοποιήθηκε το back-end (server) κομμάτι της εφαρμογής. Το κομμάτι αυτό περιλαμβάνει διάφορους οδηγούς ροών εικόνας υλοποιημένους σε python και χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες OpenCV / gstreamer έκανε την δυνατή την μεταγωγή εικόνων από διάφορες πηγές.

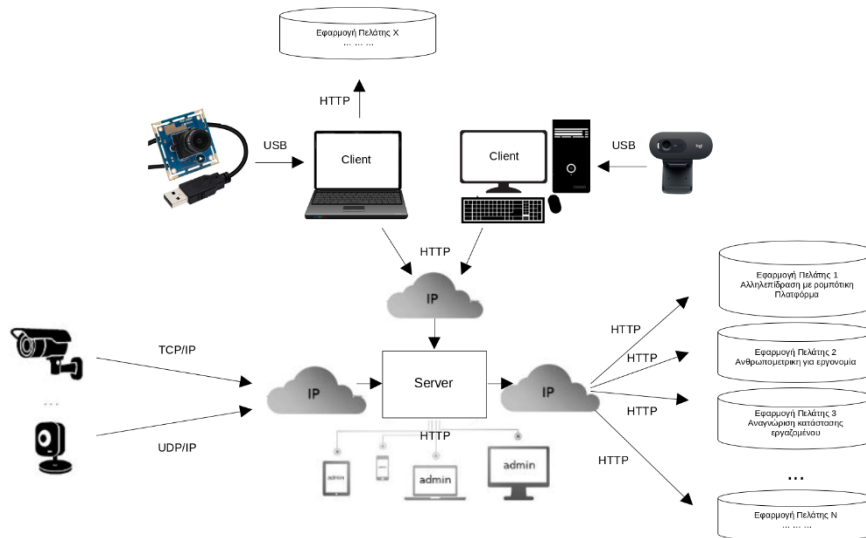
- **Σχεδιασμός/Υλοποίηση εφαρμογής Client.** Κατά το βήμα αυτό η εφαρμογή πελάτη (client) του back-end διαμορφώθηκε ώστε να μπορεί να λάβει είσοδο από το back-end και να συνδυαστούν μαζί σαν ένα κοινό σύστημα.
- **Ενσωμάτωση/Υλοποίηση/Ενωση υπο-μοντέλων στην συνολική λύση.** Κατά το βήμα αυτό, το back-end της λύσης με τον server που αναλαμβάνει την μεταγωγή εικόνων και του client που χρησιμοποιεί τις εικόνες για να εξάγει πληροφορία μέσω TN, θα πρέπει να συνενωθεί με ένα διαδικτυακό interface.
- **Τεκμηρίωση λύσης / Εκπαιδευτικό υλικό.** Το βήμα αυτό θα αναλάβει την δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού.
- **Εκτέλεση εργαστηριακών πειραμάτων / καταγραφή KPI.** Σαν τελικό βήμα η τελική και βέλτιστη έκδοση του πακέτου TN που αναπτύσσουμε θα δοκιμαστεί σε εργαστηριακά πειράματα για την καταγραφή των key performance indicators (KPI) τα οποία επιτυγχάνει.

Για την ανάπτυξη της λύσης έχοντας πλέον ένα σταθερό back-end οι συνθήκες επιτρέπουν την υλοποίηση της Web διεπαφής της εφαρμογής, την δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού και την αποτίμηση των KPIs της. Ταυτόχρονα αναμένουμε κάποια μικρή βελτίωση της μεθόδου λόγω καλύτερης σύγκλισης του νευρωνικού δικτύου λόγω της συνεχόμενης εκπαίδευσης του.

2.17.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η αρχιτεκτονική της λύσης μας περιλαμβάνει 2 διαφορετικές βαθμίδες, λογισμικού διακομιστή (server) και πελάτη (client). Καθότι οι υπολογιστικές απαιτήσεις των νευρωνικών δικτύων δεν είναι τετριμμένες (απαιτείται GPGPU κατά προτίμηση με Tensor processing units) για την εκτέλεση του νευρωνικού δικτύου που αναπτύσσουμε. Για αυτό τον λόγο η λύση μας στοχεύει έναν κεντρικό διακομιστή με πολλούς υπολογιστικούς πόρους και το κατάλληλο υλισμικό και περιφερειακές συσκευές πελάτες η οποίες απλά θα προωθούν εικόνες από κάμερες συνδεδεμένες επάνω τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται επεκτασιμότητα του δικτύου καμερών με την χρήση υπαρχόντων συσκευών και ακόμα και πελάτες χωρίς πολλές δυνατότητες συμβάλλουν στον γράφο υπολογισμού σαν πηγές δεδομένων. Την ίδια στιγμή για IP Cameras που είναι διαθέσιμες στο δίκτυο, ο διακομιστής χρησιμοποιώντας τα πακέτα λογισμικού gstreamer και OpenCV μπορεί να ανοίξει απευθείας συνδέσεις με τις κάμερες της επιχείρησης ώστε να συλλέξει και να επεξεργαστεί τα δεδομένα τους χρησιμοποιώντας το νευρωνικό δίκτυο της λύσης εκτελώντας τον συνοδευτικό κώδικα py. Η Εικόνα 125 επιδεικνύει την τρέχουσα αρχιτεκτονική. Έχουμε υλοποιήσει τόσο το λογισμικό πελάτη για την καταγραφή και μετάδοση εικόνων όσο και το λογισμικό διακομιστή για την συλλογή τους από IP cameras. Τα δεδομένα εισόδου μετεγγράφονται σε μια αρχιτεκτονική Κοινόχρηστης μνήμης, ενώ ένας HTTP δικτυακός διακομιστής επιτρέπει την χρήση της εφαρμογής μέσω προγράμματος φυλλομετρητή από συσκευές όπως κινητά, tablet, και laptop.

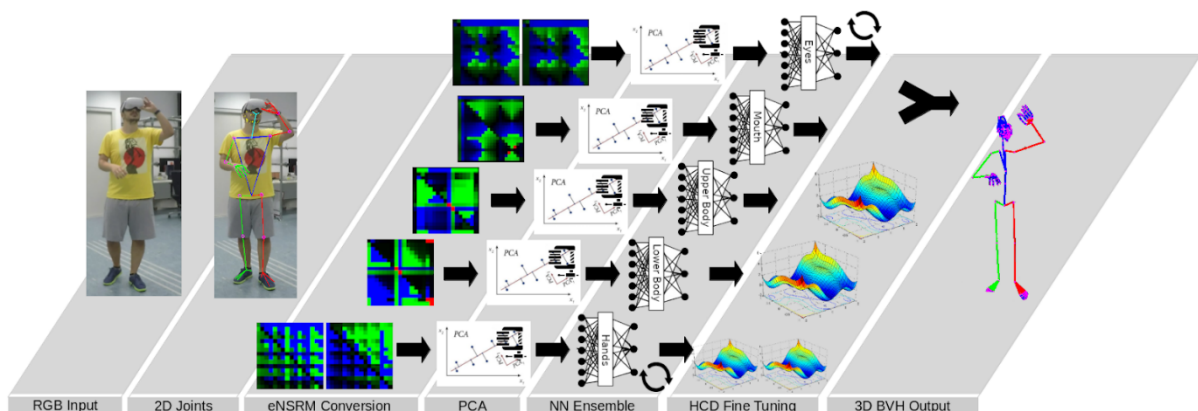
Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 125: Επίπεδα αρχιτεκτονικής λύσης

Η διαστρωμάτωση των διαφόρων επιπέδων της αρχιτεκτονικής που αναπτύσσεται που επιδεικνύει τους ρόλους πελάτη/διακομιστή και εφαρμογής. Οι συσκευές πελάτες εκτελούν λογισμικό που συλλαμβάνει εικόνες από USB cameras και τις προωθεί στον Server. Ο δε διακομιστής λαμβάνει αυτές τις εικόνες, η μπορεί και ο ίδιος να δειγματοληπτεί αυτόνομα εκτελώντας κώδικα ρυθμιστικούς επικοινωνώντας με μια λίστα IP cameras. Τα δεδομένα που συλλέγονται επεξεργάζονται και είναι διαθέσιμα μέσω HTTP πρωτοκόλλου από εφαρμογές πελάτες και από τους administrators της επιχείρησης.

Παρότι σε μεγάλο βαθμό τα δομικά στοιχεία client/server της αρχιτεκτονικής είναι στην θέση τους και το νευρωνικό δίκτυο είναι διαθέσιμο και μπορεί να εξάγει αποτελέσματα, ωστόσο η ενσωμάτωση/υλοποίηση/ένωση των υπο μοντέλων σε μια διεπαφή ακόμα εκκρεμεί καθώς όπως εξ αρχής προβλέφθηκε έχει μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας και ακόμα 3 μήνες ανάπτυξης σύμφωνα με το σχέδιο υλοποίησης. Συνεχίζοντας την περιγραφή της ενδιάμεσης αρχιτεκτονικής η εφαρμογή server στην καρδιά του συστήματος που αναπτύσσουμε βασίζεται σε ένα νευρωνικό δίκτυο το οποίο αναπτύσσουμε και το οποίο για κάθε μια εικόνα που λαμβάνει ως είσοδο εξάγει δισδιάστατα σημεία για το κάθε τμήμα του ανθρώπινου σώματος που εντοπίζει στην εικόνα, Part Affinity Fields (PAFs) για την συσχέτιση των διαφόρων τμημάτων του ανθρώπινου σώματος μεταξύ τους, πληροφορίες βάθους (3D) και τρισδιάστατα διανύσματα στην επιφάνεια της εικόνας όπως φαίνεται στην εικόνα. Ταυτόχρονα συλλέγοντας ένα σύνολο σημείων 2D ενός ανθρώπινου σκελετού με την χρήση της μεθόδου MocapNET (Εικόνα 126) είναι δυνατή η εξαγωγή αντίστροφης κινηματικής του ανθρώπου.



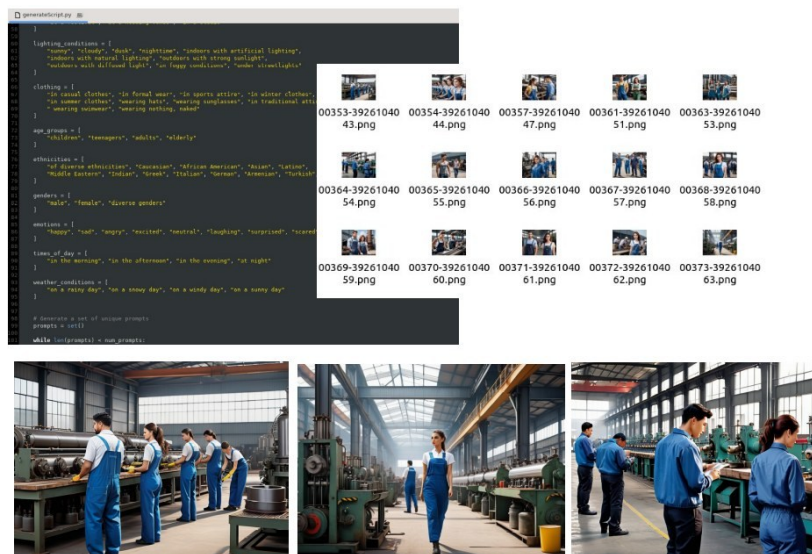
Εικόνα 126: Αρχιτεκτονική Νευρωνικού Δικτύου MocapNET

Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου MosarNET επιτρέπει την μετατροπή δισδιάστατων σημείων που αντιστοιχούν στα σημεία του σώματος σε τρισδιάστατη αντίστροφη κινηματική επίλυση του ανθρώπινου σκελετού. Τα δεδομένα εξαγωγής των παραπάνω νευρωνικών δικτύων μετα την συλλογή τους είναι διαθέσιμα σε εφαρμογές πελάτες οι οποίες μέσω http ερωτήσεων μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν κατα το δοκούν για τους σκοπούς της επιχείρησης.

2.17.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Για την εκπόνηση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου υλοποιήθηκε εξειδικευμένος κώδικας που βασίζεται στο Tensorflow 2.16.1 χρησιμοποιώντας το SDK του Keras 3.1 .Η εκπαίδευση του δικτύου γίνεται πάνω στο ανοικτό σετ δεδομένων COCO 2017. Το σύνολο δεδομένων COCO περιλαμβάνει περιγραφές της κάθε εικόνας, πάνω από 250.000 ανθρώπους με συντεταγμένες για τα τμήματα του ανθρώπινου σώματος και θεωρείται ένα από τα βασικά σύνολα δεδομένων για εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων για την κατανόηση εικόνων.

Παρότι τα δεδομένα εκπαίδευσης περιέχουν μεγάλη ποικιλία εικόνων όλων των ειδών τα δεδομένα αυτά δεν είναι προσαρμοσμένα για σκηνές σε βιομηχανικά περιβάλλοντα εργασίας. Σαν ένα επιπλέον μέτρο για την καλή εκπαίδευση του δικτύου σε δεδομένα που αφορούν βιομηχανική χρήση, χρησιμοποιούμε το παραγωγικό μοντέλο Stable Diffusion το οποίο είναι εκπαιδευμένο σε πάνω από 5 δισεκατομμύρια εικόνες χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων LAION-5B. Σύμφωνα με πηγές το Stable Diffusion εκπαιδεύτηκε σε ένα cloud cluster με 256 Nvidia A100 GPUs. Χρειάστηκε 150,000 ώρες εκπαίδευσης, που ισοδυναμούν με ένα κόστος εκπαίδευσης \$600,000. Χρησιμοποιώντας το σαν θεμελιώδες μοντέλο TN δημιουργούμε εικόνες διαφόρων παραμέτρων που να ταιριάζουν με ένα βιομηχανικό περιβάλλον τις οποίες εν συνεχεία υποσημειώνουμε με την χρήση μιας γραφικής διεπαφής.



Εικόνα 127: Παραγωγή συνθετικών δεδομένων με το Stable Diffusion model

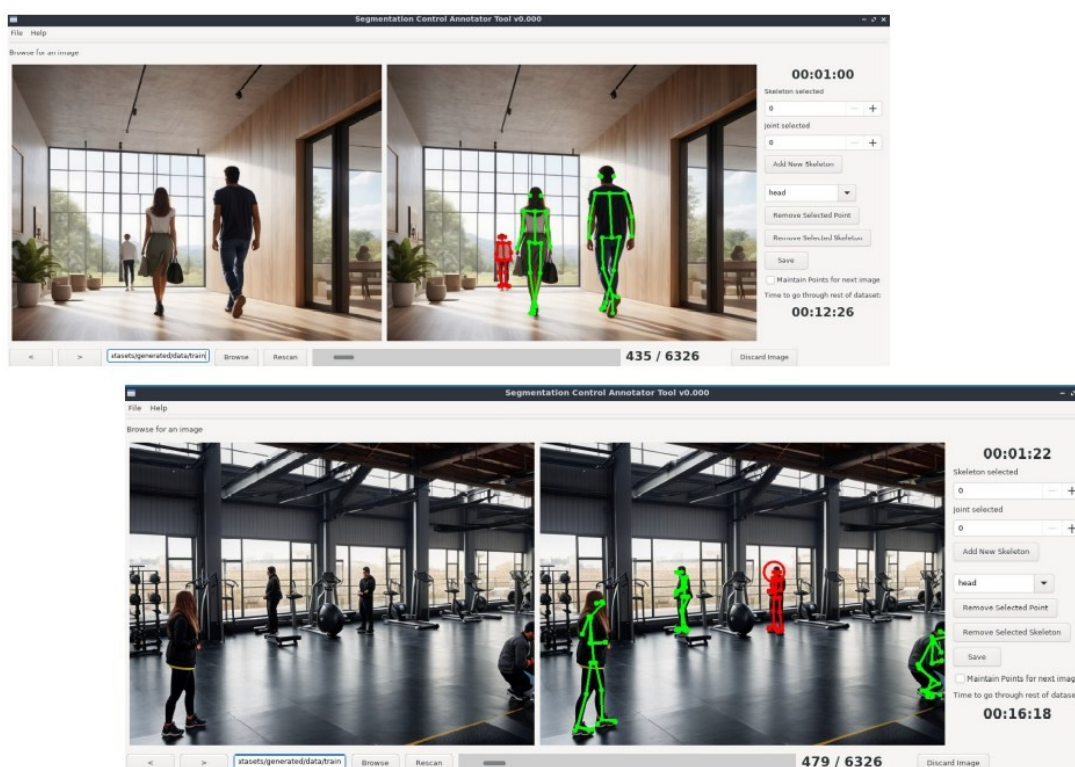
Χρησιμοποιώντας το παραγωγικό μοντέλο Stable Diffusion μπορούμε να δημιουργήσουμε συνθετικά δεδομένα εκπαίδευσης του δικτύου για την καλύτερη εκπαίδευση του για τέτοιες σκηνές.

Με την χρήση αυτών των δεδομένων η εκπαίδευση του μοντέλου καθοδηγείται προς περιβάλλοντα πιο κοντά σε αυτά τα οποία πιθανόν θα χρησιμοποιηθεί μειώνοντας το ενδεχόμενο κακής λειτουργίας λόγω μη γενίκευσης σε βιομηχανικούς χώρους.

Ταυτόχρονα για την καλή λειτουργία με κάμερες χαμηλής ποιότητας όλες οι εικόνες εισόδου υπόκεινται σε επαύξηση δεδομένων (data augmentation) τεχνικές (Εικόνα 127) όπου με την προσομοίωση θερμοδυναμικού θορύβου, και καμένων εικονοστοιχείων, την αλλαγή φωτεινότητας και αντίθεσης και την χρήση πανοραμική

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής

κίνηση και ζούμ και περιστροφή των δειγμάτων το νευρωνικό δίκτυο σκληραγωγείται στην σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων ακόμα και υπό αντίξοες συνθήκες ως προς την ποιότητα των παρατηρήσεων.

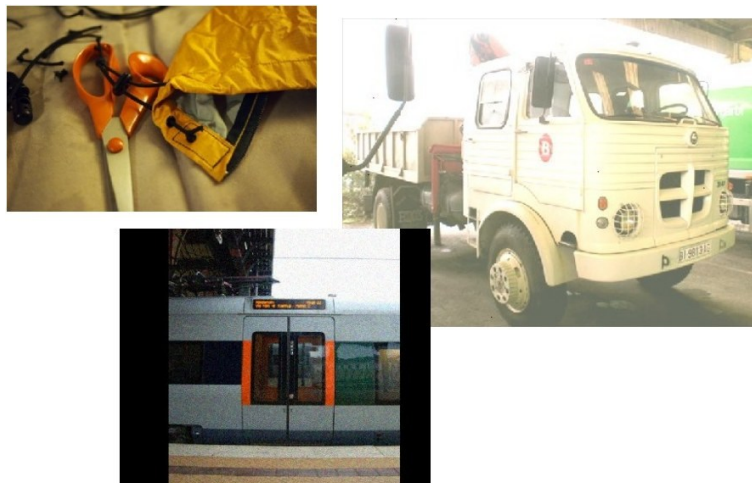


Εικόνα 128: Εφαρμογή αναπαραγωγής και κατακερματισμού βίντεο

Στα πλαίσια της καλύτερης εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου αναπτύχθηκε εφαρμογή (wxPython) με την οποία ένα καταγεγραμμένο σύνολο δεδομένων μπορεί να γίνει αναπαραγωγή δείχνοντας αποτελέσματα ενώ τα ίδια τα δεδομένα μπορούν να επισημανθούν και να επανεισαχθούν στον κώδικα εκπαίδευσης για ενισχυτική μάθηση σε δεδομένα που μπορεί να έχει ανάγκη μια επιχείρηση και να μην καλύπτονται από την υπάρχουσα βάση δεδομένων εκπαίδευσης.

Αφού συλλέξουμε τα δείγματα εκπαίδευσης χρησιμοποιώντας τα θεμελιώδη μοντέλα Detectron 2, Segment Anything, Depth Anything, Vision GPT2, DP Text, Sapiens και Open Pose εξάγουμε αυτοματοποιημένα δεδομένα εξόδου τα οποία όμως μπορούν να αλλάξουμε και χειροκίνητα μέσω της εφαρμογής μας (Εικόνα 128). Εν συνεχεία μπορεί να ξεκινήσει η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου η οποία απαιτεί 3-7 ημέρες για να ολοκληρωθεί ανάλογα με το μέγεθος του . Το νευρωνικό δίκτυο στην συνέχεια μπορεί να λάβει εικόνες και να τις επεξεργαστεί παράγοντας απευθείας την ζητούμενη έξοδο.

Για την δρομολόγηση όμως των εικόνων εισόδου και εξόδου απαιτείται ένας μηχανισμός τον οποίο επίσης αναπτύξαμε στα πλαίσια της λύσης. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται SharedMemoryVideoBuffers και χρησιμοποιεί την δυνατότητα του Linux Kernel για χαρτογράφηση των ίδιων θέσεων μνήμης μεταξύ διαφορετικών διεργασιών και εφαρμογών. Με αυτό τον τρόπο δεν απαιτείται η διαρκής μεταγωγή εικόνων από την μια διεργασία στην άλλη κάτι το οποίο απαιτεί πάρα πολύ υπολογιστική ισχύ. Αντί αυτού ο διακομιστής εκκινεί διαφορετικές διεργασίες (μια για κάθε πηγή) κάθε μια από τις οποίες αναλαμβάνει την ανάλυση δεδομένων από τις διάφορες διαθέσιμες κάμερες. Τα δεδομένα εικόνας τοποθετούνται σε μια κοινόχρηστη τοποθεσία μνήμης και γίνονται άμεσα ορατά από την εφαρμογή που εκτελεί το νευρωνικό δίκτυο. Μετά την εκτέλεση του νευρωνικού δικτύου η έξοδος τοποθετείται σε αντίστοιχα διαμορφωμένη μνήμη η οποία μπορεί να προσπελαστεί από τον HTTP διακομιστή παραδίδοντας την έξοδο στις εφαρμογές πελάτες.



Εικόνα 129: Μεγέθυνση συνόλου δεδομένων με εισαγωγή θορύβου και άλλων παραμέτρων

Οι εικόνες με τις οποίες εκπαιδεύεται το νευρωνικό δίκτυο υπόκεινται σε επαύξηση δεδομένων για προσομοίωση μη εργαστηριακών συνθηκών δεδομένων με εξομοίωση φαινομένων όπως καμένα ριxel στις κάμερες εισόδου, δυναμικό στοχαστικό θόρυβο, μεταβολές φωτεινότητας και αντίθεσης και διαφορετικές σχετικές περιστροφές και θέσεις των απεικονιζόμενων αντικειμένων.

2.17.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Για την παραγωγή παραδειγμάτων χρήσης χρησιμοποιούμε δημοσίως διαθέσιμα video στο Youtube από βιομηχανίες του εξωτερικού τα οποία μεταχειριζόμαστε σαν να προέρχονται από πηγή εισόδου κάμερας δικτύου. Τα video αυτά δεν είναι τμήμα των δεδομένων εκπαίδευσης του δικτύου (άρα το δίκτυο δεν τα έχει δει ποτέ και η ακρίβεια του δικτύου σε αυτά τα δεδομένα είναι ενδεικτική της ακρίβειας σε πραγματικά δεδομένα). Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα εξοπλισμένο με κάρτα γραφικών NVIDIA Geforce RTX 4080 με 16GB VRAM, AMD Ryzen 7 3800X 8-Core επεξεργαστή και 32GB RAM επιτυγχάνουμε 15 Hz ρυθμό ανανέωσης για μια πηγή εικόνων.

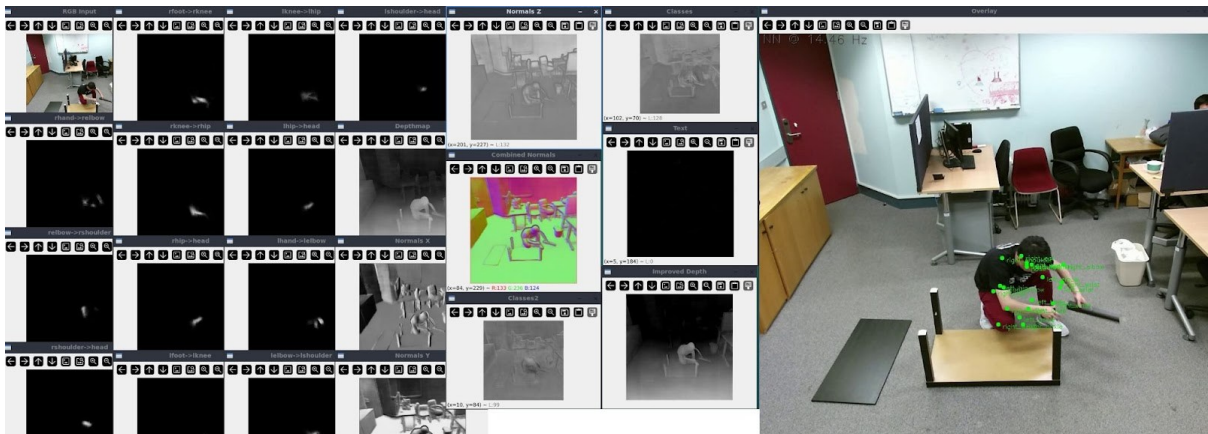
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 130Εικόνα, παρατηρούμε καλή ακρίβεια ενώ ο εντοπισμός των ανθρώπων είναι εύρωστος για άτομα διαφορετικού φύλου, χρώματος δέρματος και ακόμα και όταν αυτά χρησιμοποιούν προστατευτικά ρούχα, γάντια, καπέλα και εξαρτήματα τα οποία απομακρύνουν την εξωτερική τους εμφάνιση από την κατανομή εικόνων COCO17 στην οποία έχει εκπαιδευτεί το δίκτυο. Θεωρούμε την επιτυχή γενίκευση του δικτύου σε τέτοιες εικόνες σαν αποτέλεσμα της προσθήκης της γεννήτριας συνθετικών εικόνων που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 130: Στιγμιότυπα της εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου που αναπτύσσουμε σε δημόσια διαθέσιμα video από εργοστάσια στο Youtube.

Παρατηρούμε την εξαγωγή πόζας μαρκαρισμένη με πράσινα σημεία πάνω στα αντίστοιχα σημεία εντοπισμού. Παρατηρούμε εύρωστα αποτελέσματα παρά την ποικιλομορφία των εικόνων εισόδου. Η ενδιάμεση λύση που έχουμε αυτή την στιγμή εξάγει πληροφορίες βάθους και διανύσματα τριών διαστάσεων για τον άνθρωπο. Σαν αποτέλεσμα τα δεδομένα αυτά μπορούν με σχετικά τετριμμένο τρόπο και ελάχιστο κώδικα να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως η εκτίμηση της παρουσίας των εργαζομένων στα διάφορα πόστα, την παρακολούθηση των κινήσεων τους, πιθανή αποφυγή επαναλαμβανόμενων κινήσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε τραυματισμούς ή την αποφυγή ατυχημάτων. Η γραφική παρουσίαση της ενδιάμεσης έκδοσης της λύσης βασίζεται σε παραθυρικό περιβάλλον. Κατά την διάρκεια εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου όλες οι ενδιάμεσες έξοδοι του νευρωνικού δικτύου μπορεί να γίνουν ορατές σε παράθυρα που επιτρέπουν στον χρήστη την παρακολούθηση της λειτουργίας του δικτύου.



Εικόνα 131: Γραφική διεπαφή εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου που λαμβάνει εικόνες RGB και εξάγει δισδιάστατη πόζα στον server.



Εικόνα 132: Γραφική διεπαφή εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου MocapNET στον server.

2.18 Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων

2.18.1 Στάδια υλοποίησης

Η παρούσα λύση αποσκοπεί στην υλοποίηση ενός συστήματος οπτικής αναγνώρισης και επιθεώρησης διαδικαστικών δραστηριοτήτων (διαδικασιών), το οποίο επιπλέον θα προσφέρει και δυνατότητες αξιολόγησης τήρησης των πρωτοκόλλων εκτέλεσης τους. 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 συγκεκριμένης λύσης είναι προσφέρει μοντέλα οπτικής αντίληψης, τα οποία θα επιτρέπουν την αναγνώριση και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο την εκτέλεση προκαθορισμένων διαδικασιών. Επιπλέον, στόχος της τελικής λύσης είναι η 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 σύστημα της προσφερόμενης λύσης θα προσφερθεί μέσω μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας γραφικών εργαλείων χρήστη, παρέχοντας στους χρήστες μια εύχρηστη διεπαφή για την παρακολούθηση και αξιολόγηση των δραστηριοτήτων.

Για την ανάπτυξη της εν λόγω λύσης, έχει συνταχθεί ένα χρονοδιάγραμμα εργασιών σύμφωνα με το οποίο η προτεινόμενη λύση αναπτύσσεται γύρω από 9 ομάδες εργασιών οι οποίες περιλαμβάνουν τις ακόλουθες ενέργειες:

- **Βιβλιογραφική αναζήτηση σχεδιαστικών λύσεων και σετ δεδομένων** τα οποία αναφέρονται σε σενάρια με παρόμοια θεματολογία με την θεματολογία με εκείνη των βιομηχανικών κλάδων στόχευσης του έργου. **Κύριος στόχος:** εξεύρεση σετ δεδομένων για την ανάπτυξη των μοντέλων της συγκεκριμένης λύσης και την επαλήθευση της απόδοσης τους.
- **Προσδιορισμός των προδιαγραφών δόμησης της πληροφορίας** για την ορθή αξιοποίηση της απο τα προς ανάπτυξη μοντέλα. **Κύριος στόχος:** 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, υλοποίηση και εκπαίδευση του υποσυστήματος της λύσης που επιτρέπει την οπτική

αναγνώριση των ατομικών βημάτων εκτέλεσης. Κάθε βήμα εκτέλεσης (δράση) μπορεί εν δυνάμει να αποτελέσει δομικό στοιχείο (μέρος) μιας δραστηριότητας.

- **Αξιολόγηση και επίτευξη της δυνατότητας εκτέλεσης μοντέλων σε πραγματικό χρόνο (real-time):** Αφορά το σύνολο των ενεργειών βελτιστοποίησης των μοντέλων καθώς και του τρόπου συλλογής των οπτικών δεδομένων, προεπεξεργασίας και διοχέτευσης τους προς το μοντέλο.
- **Ανάπτυξη μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων:** Στο πακέτο εργασιών περιλαμβάνονται όλες οι εργασίες σχεδίασης, υλοποίησης και αποσφαλμάτωσης του βασικού μοντέλου της λύσης το οποίο επιτρέπει την ταυτόχρονη οπτική αναγνώριση τόσο της τρέχουσας δράσης που επιτελείται καθώς και την παροχή εκτίμησης για την τρέχουσα δραστηριότητα.
- **Σχεδίαση πλατφόρμας και γραφικών εργαλείων:** Το πακέτο εργασιών περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ή περισσότερων γραφικών εργαλείων τα οποία επιτρέπουν την εύκολη και σωστή προετοιμασία εξατομικευμένων δεδομένων με στόχο την επανεκπαίδευση των προσφερόμενων μοντέλων, καθώς και γραφικά εργαλεία για αξιοποίηση και οπτικοποίηση των εκτιμήσεων των μοντέλων της λύσης.
- **Βελτιστοποίηση απόδοση μοντέλων:** Περιλαμβάνει το σύνολο των ενεργειών για την ενίσχυση της απόδοσης των μοντέλων, όπως η επιλογή κατάλληλων παραμέτρων εκπαίδευσης, και τυχόν τροποποιήσεις στις αρχιτεκτονικές των μοντέλων.
- **Τεκμηρίωση λύσης/Εκπαιδευτικό υλικό:** Ενέργειες για την παροχή υλικού υπό την μορφή σύντομων διαλέξεων με στόχο την ενημέρωση των ενδιαφερομένων ως προς βασικές δομές της TN, και και το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση της λειτουργίας των προτεινόμενων λύσεων του έργου.
- **Εκτέλεση εργαστηριακού σεναρίου και καταγραφή KPIs:** Αφορά τις ενέργειες για την τελική καταγραφή της απόδοσης των μοντέλων της λύσης και το έλεγχο της επίτευξης των στόχων απόδοσης. Επίσης, σε αυτό περιλαμβάνονται και ενέργειες πιλοτικών δοκιμών της λύσης σε επιλεγμένα σενάρια σε εργαστηριακό περιβάλλον.

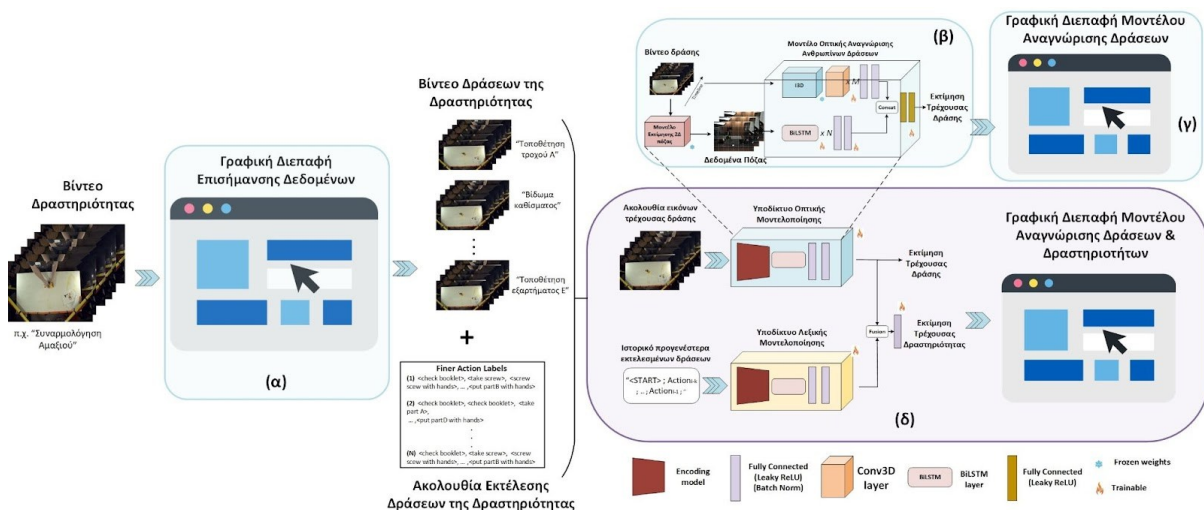
2.18.2 Αρχιτεκτονική ενδιάμεσης έκδοσης

Η ενδιάμεση έκδοση της λύσης περιλαμβάνει την πλήρη υλοποίηση των ακόλουθων πακέτων εργασίας: (α) **Γραφικό εργαλείο αξιοποίησης του προτεινόμενου μοντέλου** (Εικόνα 133.α), (β) **Μοντέλο οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων** (Εικόνα 133.β), το οποίο έχει επαυξηθεί με επιμέρους συστήματα για την ανάδειξη των δυνατοτήτων αξιοποίησης του, και (γ) **Γραφικό εργαλείο επίσημανσης δεδομένων** (Εικόνα 133.γ), με στόχο την διευκόλυνση προσαρμογής/προετοιμασίας των δεδομένων που διαθέτουν ενδιαφερόμενοι βιομηχανικοί εταίροι, με σκοπό την αξιοποίηση των μοντέλων της προτεινόμενης λύσης. Τα υλοποιημένα εργαλεία/μοντέλα ήδη συνθέτουν τον βασικό κορμό αξιοποίησης/χρήσης της προτεινόμενης λύσης, παρέχοντας ήδη ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας (Εικόνα 133). **Τόσο το μοντέλο (β), όσο και το εργαλείο επίσημανσης (α), θα αποτελέσουν τμήματα του τελικού μοντέλου της προτεινόμενης λύσης** (Εικόνα 133.δ), το οποίο θα επιτρέπει την αναγνώριση τόσο της τρέχουσας ανθρωπίνης δράσης που εκτελείται όσο και την δραστηριότητα στην οποία ανήκει, π.χ. **δράση:** τοποθέτηση φίλτρου στην καφετιέρα, **δραστηριότητα:** συναρμολόγηση καφετιέρας.

Στην παρούσα ενδιάμεση φάση της λύσης το μοντέλο οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων έχει υλοποιηθεί ως stand-alone, με στόχο την παροχή του ως μια απλή προσβάσιμη σε όλους έκδοση της λύσης σε συνδυασμό με την αξιοποίηση της στο γραφικό εργαλείο (γ). Η **αρχιτεκτονική του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων** (Εικόνα 133.β) βασίζεται σε ένα μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης, το οποίο λαμβάνει ως είσοδο δεδομένα βίντεο (ακολουθίες εικόνων) και τις αντίστοιχες εκτιμήσεις για την 2D πόζα του ατόμου που εκτελεί τη δράση. Οι ροές βίντεο μπορούν να καταγράφονται από συμβατικές ή εξειδικευμένες κάμερες εμπορίου, προσφέροντας έτσι ευελιξία στην ενσωμάτωση σε διαφορετικά περιβάλλοντα εφαρμογής. Στην παρούσα έκδοση του το μοντέλο TN είναι ένα νευρωνικό δίκτυο το οποίο αποτελείται από 2 υποδίκτυα καθένα από τα οποία αναλαμβάνει την εκμάθηση N-διάστατων αναπαραστάσεων για κάθε μια από τις δύο πηγές πληροφορίας. Οι N-διάστατες αυτές αναπαραστάσεις

συνδυάζονται και επεξεργάζονται περαιτέρω από ένα τρίτο υποδίκτυο του μοντέλου με στόχο την εκτίμηση της εκτελούμενης δράσης. Λόγω της φύσης της επεξεργασίας των δεδομένων, η εκτίμηση αφορά κατά κύριο λόγο έναν χρήστη. Ωστόσο, με τη χρήση προσεγγίσεων ανίχνευσης και παρακολούθησης πολλαπλών ατόμων στο χώρο, είναι εφικτή η εξαγωγή εκτιμήσεων για τις δράσεις που εκτελούνται από κάθε άτομο ξεχωριστά. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής στο μοντέλο των περιοχών κίνησης και παρουσίας κάθε ατόμου, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα 2D σκελετικά δεδομένα (πόζες). Η συγκεκριμένη επαύξηση του μοντέλου με δυνατότητες αναγνώρισης τρέχουσας εκτελούμενης δράσης σε σκηνές πολλαπλών ατόμων υλοποιείται στην γραφική διεπαφή αξιοποίησης του μοντέλου (Εικόνα 133: .γ).

Αναφορικά με τα δυο γραφικά εργαλεία, η **γραφική διεπαφή επισήμανσης δεδομένων** (Εικόνα 133.α) επιτρέπει τις ακόλουθες λειτουργίες (α) φόρτωση ενός βίντεο και κατάτμηση σύμφωνα με επιλεγμένα από τον χρήστη μικρά βίντεο (κλιπ), (β) επισήμανση και αποθήκευση των κατατμημένων βίντεο με ετικέτες δράσης καθώς και με ετικέτα δραστηριότητας, και (γ) εξαγωγή της θάσης δεδομένων επισήμανσης σε μορφή (.csv), το οποίο διαθέτει δομή συμβατή με εκείνη που αναμένεται από το μοντέλο. Στον αντίποδα η **γραφική διεπαφή χρήσης του εκπαιδευμένου μοντέλου** (Εικόνα 133.γ), προσφέρει τις ακόλουθες λειτουργίες, (α) φόρτωση και επεξεργασία βίντεο που επιλέγει ο χρήστης, (β) εκτίμηση τρέχουσας εκτελούμενης δράσης για κάθε άτομο που υπάρχει στο επιλεγμένο βίντεο, (γ) καταγραφή των εκτιμήσεων του μοντέλου για το σύνολο των δράσεων που έχει επιτελέσει το κάθε άτομο σε ολόκληρη την διάρκεια του βίντεο.



Εικόνα 133: Απεικόνιση της ροής της προτεινόμενης λύσης.

Στην εικόνα τα σχήματα αναφέρονται στα εξής: (α) στη γραφική διεπαφή χρήστη του εργαλείου επισήμανσης δεδομένων, (β) στο μοντέλο οπτικής αναγνώρισης δράσεων (που αναπτύχθηκε για την ενδιάμεση φάση), (γ) στη γραφική διεπαφή χρήστη για την αξιοποίηση του εκπαιδευμένου μοντέλου του (β), και (δ) στη δομή του μοντέλου της λύσης για την τελική φάση.

2.18.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης επιμέρους τμημάτων

Μοντέλο οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.18.2 το μοντέλο οπτικής αναγνώρισης δράσεων επεξεργάζεται τόσο τις διακριτές όσο και τις συνδυαστικές χωροχρονικές συσχετίσεις των οπτικών δεδομένων και των 2D σκελετικών πληροφοριών ενός ατόμου μέσα σε ακολουθίες εικόνων και δεδομένων πόζας, με σκοπό την εξαγωγή εκτίμησης για την εκτελούμενη δράση. Η υλοποίηση έγινε στη γλώσσα **Python**, με χρήση των βιβλιοθηκών **TensorFlow** και **Keras**, οι οποίες προσφέρουν εργαλεία ανάπτυξης και εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων.

Η δομή του υποδικτύου για την εκμάθηση της οπτικής αναπαράστασης αξιοποιεί το συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο **I3D**²⁷ για την χωροχρονική μοντελοποίηση των εικόνων βίντεο, μετατρέποντας τον αρχικό ταυστή εισόδου (*Πλήθος εικόνων x Ύψος x Πλάτος εικόνας*) σε έναν 2Δ ταυστή (KxL). Αυτός ο ταυστής στη συνέχεια επεξεργάζεται από συνελκτικά και πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα, παράγοντας έναν 1Δ ταυστή (1xM). Για τη μοντελοποίηση των σκελετικών δεδομένων, χρησιμοποιούνται νευρώνες σειριακής μοντελοποίησης ακολουθιακών δεδομένων —συγκεκριμένα Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM)—για την εκτίμηση των χρονικών συσχετίσεων, επεξεργάζοντας δεδομένα σκελετικής πόζας (ταυστής διάστασης *Πλήθος εικόνων x H*), όπου το *H* αναφέρεται στα στοιχεία της σκελετικής αναπαράστασης. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας αυτής μετατρέπεται επίσης σε έναν 1Δ ταυστή (1xM). Τέλος, τα παραγόμενα 1Δ διανύσματα από τις δύο πηγές συνδυάζονται μέσω σύνδεσης και υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία από ένα πλήθος πλήρως συνδεδεμένων επιπέδων, οδηγώντας στην τελική εκτίμηση της δράσης.

Η εκπαίδευση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης **Adam** και την συνάρτηση σφάλματος **categorical cross-entropy**. Τα σκελετικά δεδομένα προέρχονται από το μοντέλο **Mediapipe**²⁸, το οποίο επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητας εκτέλεσης σε πραγματικό χρόνο με χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως το ολοκληρωμένο μοντέλο ανάλυσης σκηνών που αναπτύσσει η **λύση 17** (ενότητα 2.17 του παραδοτέου), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο εξαγωγής σκελετικών δεδομένων αντικαθιστώντας το **Mediapipe**.

Γραφικές διεπαφές χρήστη

Η ανάπτυξη των γραφικών διεπαφών στην παρούσα φάση υλοποίησης έγινε με την χρήση των βιβλιοθηκών *wxPython* και *Tkinter*, με ενσωμάτωση επιμέρους βιβλιοθηκών εκτέλεσης των μοντέλων νευρωνικών δικτύων (π.χ. *Tensorflow*) καθώς και βιβλιοθηκών για την προεπεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων των μοντέλων που αξιοποιούνται (π.χ. *opencv*, *matplotlib*).

Αναφορικά με την **γραφική διεπαφή αξιοποίησης του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων** (Εικόνα 133.γ) η υποστήριξη της αναγνώρισης πολλαπλών ατόμων απαιτεί την χρήση μοντέλων για την ανίχνευση και παρακολούθηση των κινήσεων του κάθε ατόμου και την χρήση της περιοχής δράσης του ως πληροφορία εισόδου στο μοντέλο (καθώς και στο μοντέλο εξαγωγής των 2Δ σκελετικών δεδομένων). Ως εκ τούτου, για την αρχική ανίχνευση των περιοχών ύπαρξης ατόμων σε μια εικόνα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο **YOLOv8**²⁹ (2023) το οποίο συγκαταλέγεται κατά την στιγμή της υλοποίησης της διεπαφής στις κορυφαίες θέσεις απόδοσης στο **COCO**³⁰ benchmark αξιολόγησης μοντέλων ανίχνευσης αντικειμένων, διαθέτοντας επίσης *real-time* δυνατότητες εκτέλεσης. Αντίθετα για την παρακολούθηση των περιοχών κίνησης ενός συγκεκριμένου ατόμου μέσα στην σκηνή καθ' όλη την διάρκεια του βίντεο, χρησιμοποιούμε στην τρέχουσα έκδοση τον **CSRT Tracker**³¹, λόγω της καλής απόδοσης και των *real-time* προδιαγραφών που διαθέτει.

2.18.4 Παραδείγματα χρήσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε αρχικά στο πλαίσιο εκπαίδευσης του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων το οποίο έχει αναπτυχθεί πλήρως στην παρούσα φάση και στην απόδοσή του, και στην συνέχεια, θα γίνει η παρουσίαση των βασικών λειτουργιών των δυο γραφικών διεπαφών χρήστη οι οποίες επιτρέπουν την ανάδειξη των δυνατοτήτων και την αξιοποίηση των υλοποιημένων, στην παρούσα φάση της ανάπτυξης, μοντέλων. Και οι δυο διεπαφές σε αυτό το στάδιο υλοποίησης επιτρέπουν την χρήση τους σε τοπικό επίπεδο. Στα επόμενα βήματα υλοποίησης έχει προβλεφθεί η υποστήριξη της πρόσβασης στις διεπαφές που προσφέρει η λύση μέσω μιας *web* πλατφόρμας.

Μοντέλο οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων

Η παρούσα έκδοση του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων έχει εκπαιδευτεί σε ένα υποσύνολο του σετ δεδομένων **HMDB51**³², συγκεκριμένα στο *split1*. Το συγκεκριμένο σετ περιλαμβάνει 51 διαφορετικές ανθρωπίνες δράσεις, και τα δεδομένα του αποτελούνται από βίντεο μικρής διάρκειας (1-10

δευτερολέπτων) που έχουν ληφθεί από την πλατφόρμα YouTube. Τα βίντεο παρουσιάζουν ποικιλία στις γωνίες λήψης και στα περιβάλλοντα εκτέλεσης. Το μοντέλο έχει εκπαιδευτεί σε δύο επιμέρους υποσύνολα του αρχικού σετ δεδομένων, υποστηρίζοντας 8 και 13 διαφορετικές δράσεις αντίστοιχα. Οι δράσεις που υποστηρίζονται είναι γενικής φύσεως, όπως 'talk', 'stand', 'wave', 'sit', 'turn', 'drink', 'walk', 'pour drink', 'touch head'. Ωστόσο, το μοντέλο είναι σχεδιασμένο να επανεκπαιδεύεται σε οποιοδήποτε σύνολο δράσεων επιλέξει ο χρήστης, όπως ο βιομηχανικός εταίρος. Η απόδοση του μοντέλου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα σύνολα δεδομένων αξιολόγησης (test sets), και αξιολογήθηκε βάσει της Top1 και Top5 ακρίβειας (accuracy). Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει τις σχετικές αποδόσεις του μοντέλου, τα μεγέθη των υποσυνόλων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, το μήκος των ακολουθιών εισόδου, και το πλήθος των παραμέτρων.

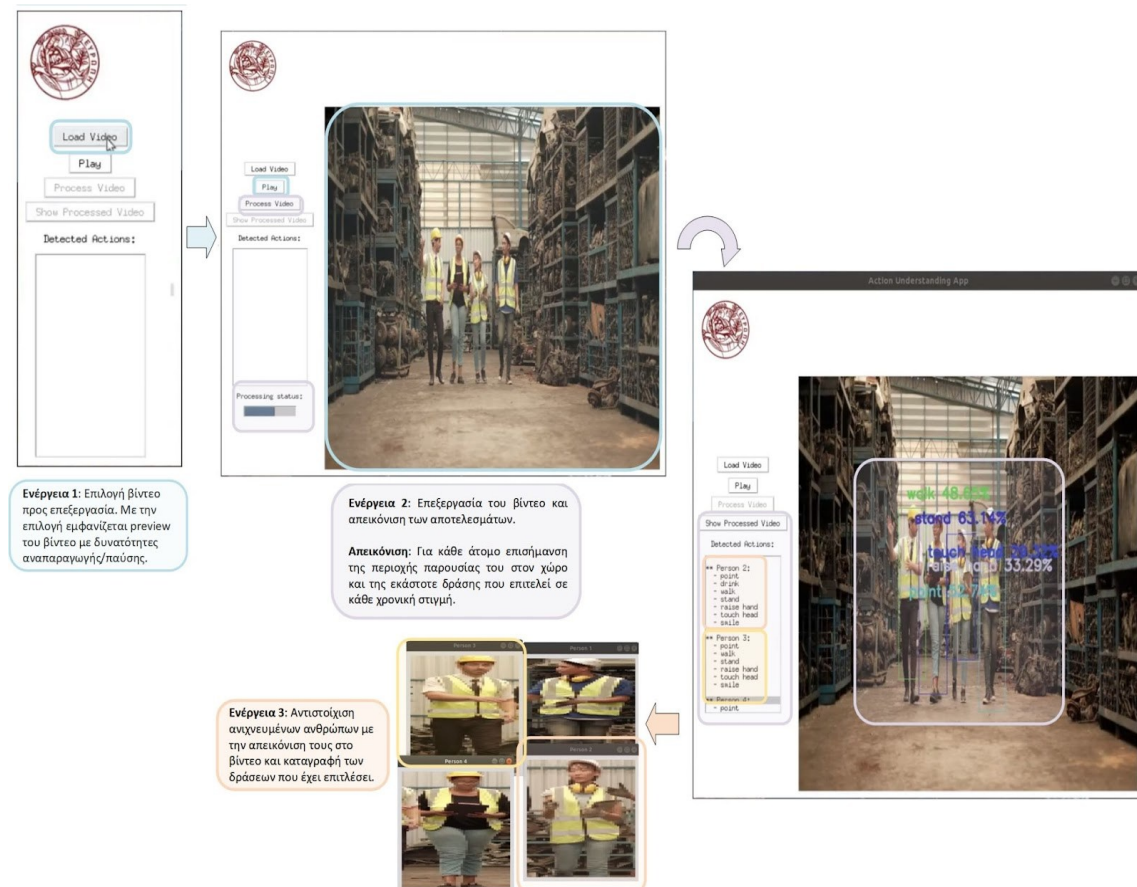
Πίνακας 12: Απόδοση, πλήθος παραμέτρων, μέγεθος σετ δεδομένων εκπαίδευσης/αξιολόγησης και διαστασιμότητα ακολουθιών εισόδου για τις 2 εκδόσεις του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης δράσεων που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα.

Έκδοση Μοντέλου	Διαστάσεις δεδομένων εισόδου	Ακρίβεια (Top1/5@Acc.)	Μέγεθος Σετ Δεδομένων (Train/Test)	Πλήθος Παραμέτρων
PoseRGB_8_Actions	RGB (16x224x224), Pose (16x66)	52.10% / 93.87%	1146 / 432	13.4 Million
PoseRGB_13_Actions	RGB (32x224x224), Pose (32x66)	45.03% / 79.80%	1484 / 611	24.5 Million

Η απόδοση του μοντέλου και στις δύο περιπτώσεις ήταν ικανοποιητική, δεδομένης της φύσης των δεδομένων και του πλήθους των δράσεων. Ωστόσο, υπάρχει περιθώριο περαιτέρω βελτίωσης μέσω της συνέχισης της εκπαίδευσης του μοντέλου. Με την αύξηση του αριθμού των εποχών, το μοντέλο αναμένεται να αποκτήσει μια πιο ισχυρή ικανότητα γενίκευσης, βελτιώνοντας την ακρίβεια τόσο στην αναγνώριση όσο και στην πρόβλεψη δράσεων. Επιπλέον, αναμένουμε ότι η απόδοση του μοντέλου θα είναι σημαντικά καλύτερη σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπου οι δράσεις εκτελούνται σε σταθερούς, λιγότερο δυναμικούς χώρους. Η προβλεψιμότητα των συνθηκών, όπως η σταθερή θέση της κάμερας, το περιορισμένο εύρος κινήσεων και το στατικό περιβάλλον, αναμένεται να μειώσει την πολυπλοκότητα της ανάλυσης και να αυξήσει την ακρίβεια.

Γραφική διεπαφή αξιοποίησης μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων

Για την ανάδειξη των δυνατοτήτων του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων και την αξιοποίηση ήδη από το συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης της λύσης, έχει ήδη σχεδιαστεί και αναπτυχθεί μια γραφική διεπαφή χρήστη, η οποία στην παρούσα φάση είναι προσβάσιμη σε τοπικό επίπεδο. **Ως παράδειγμα χρήσης** του ολοκληρωμένου μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρωπίνων δράσεων μέσω της διεπαφής, στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζουμε το σενάριο κατά το οποίο ένας χρήστης ένα βίντεο της επιλογής του προς επεξεργασία με την έξοδο του μοντέλου να είναι η ανίχνευση όλων των ατόμων και η ατομική εκτίμηση των δράσεων που έχουν εκτελεστεί. Επιπρόσθετα παρέχεται η δυνατότητα οπτικοποίησης της αντιστοίχισης ενός επιλεγμένου ατόμου από το χρήστη μέσα στο βίντεο με τις εκτιμήσεις του μοντέλου για τις δράσεις που εκτέλεσε. Ενδεικτικά στιγμιότυπα των δυνατοτήτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 134.



Εικόνα 134: Παράδειγμα χρήσης και δυνατοτήτων της διεπαφής αξιοποίησης του μοντέλου οπτικής αναγνώρισης ανθρώπινων δράσεων,

Προσφέρεται βίντεο που περιλαμβάνει πολλαπλά άτομα στην σκηνή. Βίντεο παραδείγματα: [σύνδεσμος δημόσιας πρόσβασης](#). Το βίντεο δεν αποτελεί μέρος του σετ δεδομένων εκπαίδευσης των μοντέλων.

Γραφική διεπαφή επισήμανσης δεδομένων

Για την εύκολη αξιοποίηση των μοντέλων της λύσης 18 από τους βιομηχανικούς εταίρους που θα εκδηλώσουν ενδιαφέρον, έχει αναπτυχθεί μια γραφική διεπαφή χρήστη η οποία επιτρέπει την εύκολη προετοιμασία των δεδομένων για την άμεση και εύκολη αξιοποίησή τους για την επανεκπαίδευση των προσφερόμενων μοντέλων, με στόχο την προσαρμογή τους στο πεδίο εργασιών του βιομηχανικού εταίρου. Στη παρούσα φάση συγκεκριμένη διεπαφή είναι προσβάσιμη σε τοπικό επίπεδο.

Ως παράδειγμα χρήσης της διεπαφής επισήμανσης, στην Εικόνα 134 παρουσιάζουμε το σενάριο κατά το οποίο ένας χρήστης προσθέτει ένα βίντεο της επιλογής του το οποίο αποτυπώνει ολόκληρη την διαδικασία υλοποίησης μιας δραστηριότητας (π.χ. συναρμολόγηση ενός αμαξιού). Μέσω της διεπαφής ο χρήστης μπορεί να διαχωρίσει χρονικά, μέσω της χρήσης γραμμών εντοπισμού της θέσης καρτέ (frame index track bars), τα τμήματα του βίντεο που αντιστοιχούν στα εκάστοτε βήματα (δράσεις). Για κάθε βήμα μπορεί να επισημάνει το αντίστοιχο χρονικό περιθώριο με την ετικέτα της δράσης που εκτελείται. Η κάθε επισήμανση του χρήστη (ετικέτα δράσης, χρονικό παράθυρο, όνομα βίντεο) αποθηκεύονται σε ένα μορφότυπο αρχείο αποθήκευσης δεδομένων σε μορφή πίνακα (.csv). Η δομή των δεδομένων εντός του αρχείου έχει οριστεί κατάλληλα ώστε να ακολουθεί τα πρότυπα άντλησης δεδομένων των προσφερόμενων μοντέλων της λύσης.

Π2.1 - Ενδιάμεση έκδοση των λύσεων για την βελτιστοποίηση κυβερνο-φυσικών-συστημάτων παραγωγής



Εικόνα 135: Παράδειγμα χρήσης και δυνατοτήτων της διεπαφής επισήμανσης δεδομένων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ενδιάμεση λύσης. Χρωματικές επισημάνσεις επιδεικνύουν τα σχετικά εργαλεία κάθε ενέργειας.

3 Συμπεράσματα

Η παρούσα ενδιάμεση έκδοση των λύσεων στο πλαίσιο της Ενότητας Εργασίας 2 καταδεικνύει ότι όλες οι υπό ανάπτυξη τεχνολογικές προσεγγίσεις βρίσκονται σε ένα ικανοποιητικό στάδιο ενδιάμεσης υλοποίησης. Ένα σημαντικό μέρος των υποδομών και λειτουργικών ενοτήτων των λύσεων έχει ήδη ολοκληρωθεί, ιδιαίτερα σε επίπεδο εσωτερικών λειτουργικών μονάδων και κρίσιμων υποσυστημάτων, εξασφαλίζοντας τη βασική λειτουργικότητα για τις πρώτες φάσεις δοκιμών και αξιολόγησης.

Οι λύσεις έχουν δοκιμαστεί σε προσομοιωμένα σενάρια ή με χρήση διαθέσιμων δεδομένων, επιτρέποντας την αξιολόγηση της απόδοσης και της ανθεκτικότητάς τους σε συνθήκες που προσομοιώνουν ρεαλιστικά βιομηχανικά περιβάλλοντα. Τα αποτελέσματα από αυτές τις αρχικές δοκιμές αποτέλεσαν σημαντική πηγή τεχνικής ανατροφοδότησης και έδωσαν τη δυνατότητα για πρώιμες βελτιώσεις και προσαρμογές, όπου αυτό κρίθηκε απαραίτητο.

Συνολικά, η πρόοδος των λύσεων μέχρι αυτό το στάδιο επιβεβαιώνει ότι το έργο εξελίσσεται με συστηματικό και στοχευμένο τρόπο, υποστηριζόμενο από συνεχή συνεργασία μεταξύ των εταίρων, τεχνική ωριμότητα και σταθερή προσήλωση στους τελικούς στόχους του έργου Greece 4.0. Η υφιστάμενη τεχνολογική βάση και οι ενδιάμεσες αξιολογήσεις προσφέρουν ένα ισχυρό θεμέλιο για την τελική φάση υλοποίησης και ολοκλήρωσης των λύσεων στην επόμενη περίοδο του έργου.

4 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.
- ⁴ Unity Technologies, “Unity,” 2023, game development platform. [Online]. Available: <https://unity.com/>
- ⁵ <https://www.meta.com/help/quest/articles/headsets-and-accessories/oculus-link/requirements-quest-link/>
- ⁶ 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>
- ⁷ National Institute Standards and Technology (NIST). Post-Quantum Cryptography. 2018. URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography>
- ⁸ J. Schaad, “CBOR Object Signing and Encryption (COSE): Header Parameters for Carrying and Referencing X.509 Certificates,” RFC 9360, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9360>
- ⁹ NIST, “FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard,” 2024. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/final>
- ¹⁰ NIST, “Post-Quantum Cryptography: Round 4 Submissions”, 2017. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/round-4-submissions>
- ¹¹ NIST, “FIPS 204: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard4,” 2024. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final>
- ¹² P. A. Fouque and et al., “Falcon: Fast-Fourier Lattice-based CompactSignatures over NTRU,” 2017. [Online]. Available: <https://falcon-sign.info/falcon.pdf>
- ¹³ IANA Internet Assigned Numbers Authority. CBOR Object Signing and Encryption (COSE). 2024. URL: <https://www.iana.org/assignments/cose/cose.xml>.
- ¹⁴ IANA Internet Assigned Numbers Authority. Ephemeral Diffie-Hellman Over COSE (EDHOC). 2024. URL: <https://www.iana.org/assignments/edhoc/edhoc.xhtml#edhoc-cipher-suites>.
- ¹⁵ “uOSCORE / uEDHOC,” URL:<https://github.com/Fraunhofer-AISEC/uoscore-uedhoc>, accessed: 2024-06-02.
- ¹⁶ “liboqs”, URL: <https://openquantumsafe.org/liboqs/>, accessed: 2024-06-02.
- ¹⁷ “mupq”: The minimalist post-quantum cryptography library,” 2023, accessed: 2024-10-29. [Online]. Available: <https://github.com/mupq/mupq>
- ¹⁸ “pqm4”, “PQM4 benchmarks with NIST initial drafts for FIPS 203,204,” <https://github.com/mupq/pqm4/blob/8d44b724396db0db55d5de93bec252cedb9c04/benchmarks.md>, 2024, accessed: 29-10-2024
- ¹⁹ “PQClean”, <https://github.com/PQClean/PQClean>, accessed: 2024-10-29
- ²⁰ Zephyr Project, “Zephyr project: Scalable real-time operating system (rtos) for embedded devices,” 2024, accessed: 2024-09-30. [Online]. Available: <https://zephyrproject.org/>
- ²¹ 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>.
- ²² Ye, Hang, et al. "Faster voxelpose: Real-time 3d human pose estimation by orthographic projection." European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022.
- ²³ Tu, H., Wang, C., Zeng, W.: Voxelpose: Towards multi-camera 3d human pose estimation in wild environment. In: ECCV (2020)
- ²⁴ Sun, K., Xiao, B., Liu, D., Wang, J.: Deep high-resolution representation learning for human pose estimation. In: CVPR (2019).
- ²⁵ L. McAtamney and E. N. Corlett, “RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders,” *Appl. Ergon.*, vol. 24, no. 2, pp. 91–99, 1993.
- ²⁶ <https://campar.in.tum.de/Chair/MultiHumanPose>
- ²⁷ 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).
- ²⁸ 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.

²⁹ 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.

³⁰ Lin, T. Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., ... & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft coco: Common objects in context. In Computer Vision—ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, Proceedings, Part V 13 (pp. 740-755). Springer International Publishing.

³¹ 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).

³² Kuehne, H., Jhuang, H., Garrote, E., Poggio, T., & Serre, T. (2011, November). HMDB: a large video database