

**Ελλάδα 2.0 ΕΘΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

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

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

[ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ: TAEDR-0535864]

**Παραδοτέο:**

**Π3.2**

Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

*Δεκέμβριος 2025*

## Περίληψη – Ελληνικά

Το παραδοτέο Π3.2 του έργου Greece4.0 αφορά τη δοκιμή, τον έλεγχο και την αξιολόγηση των τεχνολογικών λύσεων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του έργου σε εργαστηριακό περιβάλλον. Στόχος του είναι η τεκμηριωμένη αποτίμηση της λειτουργικής επάρκειας, της τεχνολογικής ωριμότητας και της δυνατότητας αξιοποίησης των λύσεων, μέσα από οργανωμένα σενάρια δοκιμής και την επαλήθευση των αντίστοιχων δεικτών απόδοσης (KPIs).

Στο παραδοτέο αξιολογείται ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών ψηφιακού μετασχηματισμού για τη μεταποιητική βιομηχανία, όπως αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα, πλατφόρμες Ψηφιακού Διδύμου, εργαλεία βελτιστοποίησης προσθετικής κατασκευής, λύσεις ανάλυσης δεδομένων και εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης. Για κάθε λύση παρουσιάζονται τα βασικά σενάρια αξιολόγησης, οι διαδικασίες ελέγχου και τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής λειτουργίας, με έμφαση στην αξιοπιστία, την ακρίβεια, την αποδοτικότητα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ρεαλιστικά βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Συνολικά, το παραδοτέο Π3.2 επιβεβαιώνει την πρόοδο και την ετοιμότητα των λύσεων του έργου Greece4.0 για τη μετάβαση σε επόμενα στάδια πιλοτικής και βιομηχανικής αξιοποίησης. Μέσα από τη συστηματική αξιολόγηση αναδεικνύεται η προστιθέμενη αξία των τεχνολογιών του έργου ως προς τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της ευελιξίας και της υποστήριξης λήψης αποφάσεων στη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή.

## Περίληψη – Αγγλικά

Deliverable D3.2 of the Greece4.0 project concerns the testing, verification and evaluation of the technological solutions developed within the project in a laboratory environment. Its objective is to provide a documented assessment of the functional adequacy, technological maturity and exploitation potential of the solutions through structured test scenarios and the verification of the corresponding Key Performance Indicators (KPIs).

The deliverable evaluates a broad range of digital transformation applications for the manufacturing industry, including autonomous robotic systems, Digital Twin platforms, additive manufacturing optimization tools, data analytics solutions and artificial intelligence applications. For each solution, the document presents the main evaluation scenarios, the verification procedures and the results of pilot operation, with emphasis on reliability, accuracy, efficiency and integration capability in realistic industrial environments.

Overall, deliverable D3.2 confirms the progress and readiness of the Greece4.0 solutions for transition to subsequent pilot and industrial deployment stages. Through systematic evaluation, it highlights the added value of the project technologies in improving efficiency, flexibility and decision-support capabilities in modern industrial production

## Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Περιεχόμενα	
Περίληψη – Ελληνικά.....	i
Περίληψη – Αγγλικά.....	ii
Περιεχόμενα.....	iii
Κατάλογος Εικόνων.....	vi
Κατάλογος Πινάκων.....	viii
1 Εισαγωγή – Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου.....	1
2 Δοκιμή και αξιολόγηση των Εφαρμογών του έργου Greece4.0.....	2
2.1. Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής.....	2
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	2
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	3
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	3
2.2. Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης.....	4
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	4
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	4
2.3. Λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση υβριδικών μεθόδων.....	7
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	7
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	8
2.4. Λογισμικό για την δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης.....	9
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	9
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	9
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	10
2.5 <sup>α</sup> . Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Εξοπλισμού στην Βιομηχανία 4.0.....	11
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	11
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	11
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	15
2.5 <sup>β</sup> . Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Διαδικασιών στην Βιομηχανία 4.0.....	17
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	17
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	18
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	23
2.6. Πλατφόρμα Ανάλυσης και Διαχείρισης Δεδομένων από το Βιομηχανικό Δίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things).....	24
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	24
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	24
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	26

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

2.7. Ολογράμματα βασισμένα σε Ψηφιακά Δίδυμα για μεταφορά γνώσης και εκπαίδευση εργαζομένων-χειριστών στο περιβάλλον της Βιομηχανίας 4.0.....	27
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	27
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	28
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	29
2.8. Εργαλειοθήκη προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής και διαχείρισης προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής.....	30
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	30
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	32
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	37
2.9. Κυκλικές αλυσίδες αξίας μέσω διαχείρισης και παρακολούθησης δευτερογενών υλικών με χρήση ψηφιακών διδύμων και διαβατηρίων προϊόντων.....	39
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	39
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	44
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	45
2.10 <sup>α</sup> . Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων.....	47
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	47
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	49
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	56
2.10 <sup>β</sup> . Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικού ελέγχου.....	58
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	58
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	60
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	62
2.11. Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής.....	64
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	64
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	65
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	67
2.12. Βιομηχανικό μετασύμπαν με την χρήση επεξηγηματικής τεχνητής νοημοσύνης για εφαρμογές επιχειρηματικής νοημοσύνης.....	68
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	68
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	70
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	74
2.13. Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες.....	77
Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	77
Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	80
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	82
2.14. Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής.....	84

## Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

2.12.1.	Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης .....	84
2.12.2.	Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	86
2.12.3.	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	89
2.15.	Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα.....	97
	Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	97
	Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs .....	98
	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	102
2.16.	Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ.....	103
	Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	103
	Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs.....	104
	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	107
	Παρουσίαση και αξιολόγηση της λύσης από την ΡΙΚΕΙ (Διαχείριση Απορριμμάτων).....	109
	Αξιολόγηση από τη Lödige Greece (Air Cargo Logistics).....	109
	Συμπεράσματα για τη Συμμετοχή των Ειδικών .....	109
2.17.	Κατανόηση σκηνης με βάση οπτική πληροφορία .....	110
	Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	110
	Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs .....	116
	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	118
2.18.	Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων .....	121
	Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης.....	121
	Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs .....	121
	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	124

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Γράφημα παρελθοντικών τιμών στην πλατφόρμα ψηφιακού διδύμου .....	12
Εικόνα 2 Αποθηκευμένες τιμές με timestamp.....	12
Εικόνα 3 Αρχιτεκτονική Transformer .....	14
Εικόνα 4 Επιλογή παραμέτρων ανάλυσης.....	14
Εικόνα 5 Αποτέλεσμα ανάλυσης.....	14
Εικόνα 6 Προσομοίωση αλλαγή επιθυμητής στάθμης μέσω της πλατφόρμας ψηφιακού διδύμου....	15
Εικόνα 7 Παρακολούθηση εκτέλεσης βιομηχανικής διαδικασίας μέσα από το ΨΔ.....	19
Εικόνα 8 Αποθήκευση και προβολή τιμών αισθητήρων και ελεγκτών παραγωγής κατά την εκτέλεση της διαδικασίας.....	19
Εικόνα 9 Προσαρμογή μοντέλου AML με προσθήκη νέας μηχανής .....	20
Εικόνα 10 Αναπροσαρμογή ΨΔ στην νέα παραγωγική διάταξη .....	20
Εικόνα 11 Δημιουργία σεναρίων παραγωγικής διαδικασίας με χρήση φυσικής γλώσσας .....	21
Εικόνα 12 Εκτέλεση παραγόμενων σεναρίων στο ΨΔ.....	21
Εικόνα 13 Προσαρμογή ΨΔ στην νέα χωροταξική διάταξη.....	22
Εικόνα 14 Διαμόρφωση AML μοντέλου στην νέα χωροταξική διάταξη.....	22
Εικόνα 15 Υπολογισμός νέας τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα στο ΨΔ .....	22
Εικόνα 16 Επαναπρογραμματισμός ελεγκτή ρομποτικού βραχίονα.....	22
Εικόνα 17 Το Dashboard της πλατφόρμας.....	24
Εικόνα 18 Trend Analytics και Anomaly Detection .....	25
Εικόνα 19 Συνολική παρακολούθηση δεδομένων.....	25
Εικόνα 20 Δημιουργία και απεικόνιση συναγεμίων.....	26
Εικόνα 21 Περιγραφή σεναρίου με χρήση Nodes στην εφαρμογή XR-Creator .....	27
Εικόνα 22 Διάγραμμα σύγκρισης χρηστών κατά την διαδικασία εκπαίδευσης.....	28
Εικόνα 23 Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs .....	28
Εικόνα 24 Αποτύπωση δικτύου παραγωγής βιομηχανικού σεναρίου εφαρμογής τρέχουσας τεχνολογικής λύσης: (πάνω) γραφική αναπαράσταση κόμβων, (κάτω) σχεδίαση με συνδυασμό βασικών δομικών στοιχείων .....	31
Εικόνα 25 (Πάνω) Σχηματική αναπαράσταση δικτύου παραγωγής για το σενάριο A μέσω της εργαλειοθήκης, (Κάτω) Παρακολούθηση δείκτη κατά την διάρκεια προσομοίωσης (735 από 1500 βήματα) .....	33
Εικόνα 26 (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B με την πολιτική drop για την μηχανή Χυμοποίησης (700 βήματα προσομοίωσης), (Δεξιά) - (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B με την πολιτική block για την μηχανή Χυμοποίησης (700 βήματα προσομοίωσης) .....	36
Εικόνα 27 (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B με την πολιτική drop για την μηχανή Χυμοποίησης (700 βήματα προσομοίωσης) με πιο «επιθετικά κριτήρια», (Δεξιά) - (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B.....	36
Εικόνα 28 Γραμμή Παραγωγής Χυμού της ελληνικής βιομηχανίας (μοντελοποίηση μέσω του εργαλείου PSM) .....	39
Εικόνα 11 Βήματα δημιουργίας συνθετικών δεδομένων μέσω rython .....	41
Εικόνα 29 Βήματα δημιουργίας συνθετικών δεδομένων μέσω Python .....	41
Εικόνα 30 Δημιουργία εξισώσεων για τον υπολογισμό των SBSC δεικτών στο περιβάλλον του PSM Editor .....	42
Εικόνα 31 Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος .....	43
Εικόνα 32 Αποτελέσματα Δεικτών ανά κατηγορία στο DPP (Βιωσιμότητας, ESG, Δίκτυο & Ιχνηλασιμότητας) .....	44
Εικόνα 33 Οπτικοποίηση EDA .....	47
Εικόνα 34 Δείγμα συνόλου δεδομένων από τις εγγραφές συμβάντων .....	49
Εικόνα 35 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για τη Διορθωτική Πρόβλεψη (Corrective Prediction).....	51

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Εικόνα 36 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για τη Μη Διορθωτική Πρόβλεψη (Non-Corrective Prediction) .....	52
Εικόνα 37 Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης μεταξύ των πλαισίων AutoML για όλα τα μοντέλα ...	54
Εικόνα 38 Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML σε σχέση με την ακρίβεια πρόβλεψης .....	54
Εικόνα 39 Σύγκριση της ακρίβειας μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών .....	55
Εικόνα 40 Σύγκριση του σφάλματος μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών .....	55
Εικόνα 41 Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών .....	55
Εικόνα 42 Σενάριο 1 - Set-point Tracking για επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm .....	61
Εικόνα 43 Σενάριο 2 - Set-point Tracking για επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm παρουσία θορύβου στη μέτρηση .....	61
Εικόνα 44 Σενάριο 3 - Set-point Tracking για επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm με σφάλμα μοντελοποίησης .....	62
Εικόνα 45 Σφάλματα αυτοματισμών ανά ημέρα .....	65
Εικόνα 46 Διάγραμμα σύγκρισης παραγωγικότητας διαδικασίας συλλογής παραγγελιών .....	66
Εικόνα 47 Οδηγός συνέντευξης .....	68
Εικόνα 48 Δωμάτιο ερωτήσεων στη Unity .....	69
Εικόνα 49 Διεξαγωγή σεναρίου δοκιμής στη βιομηχανία .....	73
Εικόνα 50 Περιπτώσεις απαιτητικών συνθηκών εντοπισμού .....	78
Εικόνα 51 Προβολή του εργαστηριακού περιβάλλοντος καταμέτρησης με drone .....	79
Εικόνα 52 Καταγραφή αντικειμένων σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού .....	79
Εικόνα 53 Εντοπισμός γύρω από ετερογενή και μη κατηγοριοποιημένα αντικείμενα .....	80
Εικόνα 54 Σύγκριση χρόνου χειραψίας και κατανάλωσης ενέργειας για το PQ-EDHOC .....	91
Εικόνα 55 Σύγκριση χρήσης μνήμης του PQ-EDHOC (FLASH και RAM) .....	92
Εικόνα 56 Χρόνος σύνδεσης κατόχου (Verifier–Holder και Issuer–Holder) .....	93
Εικόνα 57 Χρόνος δημιουργίας διαπιστευτηρίων (Issuer–Platform) .....	93
Εικόνα 58 Χρόνος λήψης διαπιστευτηρίων (Issuer–Holder) .....	93
Εικόνα 59 Χρόνος δημιουργίας απόδειξης (Proof Creation Time – Holder–Issuer) .....	94
Εικόνα 60 Χρόνος λήψης και επαλήθευσης απόδειξης (Proof Reception Time – Verifier–Holder) .....	94
Εικόνα 61 Αποτελέσματα kernel-only: χρόνοι/κύκλοι, latency, throughput και speedup έναντι CPU baseline (με και χωρίς OpenCL), ανά επίπεδο ασφάλειας .....	94
Εικόνα 62 Αρχιτεκτονική αντίληψης πολλαπλών καμερών βασισμένη στο ROS, σχεδιασμένη για πραγματικού χρόνου εκτίμηση 3D ανθρώπινης στάσης μέσω επεξεργασίας πολλαπλών καμερών .....	103
Εικόνα 63 Μετρικές εκτίμησης ανθρώπινης καταπόνησης και οι μαθηματικοί ορισμοί τους .....	104
Εικόνα 64 Αποτελέσματα εκτίμησης εργονομικής κατάστασης με την μορφή heatmap .....	105
Εικόνα 65 Εκτίμηση εργονομικής κατάστασης στο 21ο καρέ .....	105
Εικόνα 66 Εκτίμηση 3D πόζας στα σύνολα δεδομένων (A) Campus, (B) Shelf, και (C) Panoptic .....	105
Εικόνα 67 Μετρικές αξιολόγησης του VoxelPose στο σύνολο δεδομένων Panoptic με διαφορετικές ρυθμίσεις καμερών. (A) Οι μετρικές AP (AP@50, AP@75, AP@100, AP@125, AP@150) δείχνουν μείωση της απόδοσης καθώς μειώνεται ο αριθμός των καμερών. (B) Μελέτη μείωσης αριθμού καμερών ως προς το Recall: το Recall μειώνεται ελαφρώς με λιγότερες κάμερες. (C) Μελέτη μείωσης αριθμού καμερών ως προς το Μέσο Σφάλμα Θέσης ανά Άρθρωση (MPJPE): το MPJPE αυξάνεται, υποδεικνύοντας μειωμένη ακρίβεια με λιγότερες κάμερες .....	106
Εικόνα 68 Σύγκριση της απόδοσης εκτίμησης πόζας μεταξύ των μοντέλων YOLO-HRNet και Mask R-CNN-HRNet, χρησιμοποιώντας δύο μετρικές αξιολόγησης: PCP και Recall στα 75 mm (Recall@75mm) .....	107
Εικόνα 69 Σχέση ακρίβειας εκτίμησης εργονομικών χαρακτηριστικών και χρόνου εκτέλεσης για 5 και 3 κάμερες .....	108

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Εικόνα 70 Ενδεικτικές εικόνες κατά την εργαστηριακή χρήση της μεθόδου εξαγωγής αντίστροφης κινηματικής (A/K) σε σύνολα δεδομένων τα οποία καταγράψαμε όπου γίνεται χρήση κράνους εικονικής πραγματικότητας και όπου κατά την διάρκεια κατά την οποία ο χρήστης μετακινείται και αλληλεπιδρά με αντικείμενα στο μετασύμπαν το σύστημα μας παρακολουθεί την κίνηση του στον χώρο για την διασφάλιση της ασφάλειας του και σε video όπου γίνεται συναρμολόγηση με την βοήθεια ρομποτικού βραχίονα..... 111

Εικόνα 71 Παρατηρούμε την εύρωστη παρακολούθηση ατόμων διαφορετικών φύλων και σωματότυπου καθ'όλη την διάρκεια παρακολούθησης των προσώπων ..... 112

Εικόνα 72 Κατά την χρήση της λύσης σε σκηνή όπου ένας χρήστης αλληλεπιδρά με ένα ρομποτικό βραχίονα, παρατηρούμε σε γενικές γραμμές εύρωστη εξαγωγή αντίστροφης κινηματικής (A/K) ακόμα και για άκρα τα οποία δεν είναι πλήρως ορατά (πόδια)..... 112

Εικόνα 73 Ενδεικτικά αποτελέσματα κατά την χρήση της λύσης για δυναμική απαρίθμηση/κατανόηση συμβάντων στην σκηνή. Τοποθετούμε σημεία δειγματοληψίας (κίτρινες κουκίδες στις εικόνες εισόδου). Παρατηρώντας τις εναλλαγές στον χάρτη βάθους και τμηματοποίησης της σκηνής και αντιστοιχώντας τις αλλαγές σε μια γραφική παράσταση σε περιπτώσεις που η σκηνή περιέχει αντικείμενα στα οποία το νευρωνικό δίκτυο έχει εκπαιδευτεί παρατηρούμε μεγάλη ευρωστία στην γραφική παράσταση. Αντίθετα σε εικόνες με ταχεία εξεζητημένα κινούμενα αντικείμενα (πχ κουτιά με εταιρικά σήματα) ο εντοπισμός είναι πιο θορυβώδης αλλά παρόλα αυτά παραμένει ακριβής. .... 113

Εικόνα 74 Ενδεικτικά αποτελέσματα κατά την χρήση της λύσης για εξαγωγή βάθους, κάθετων διανυσμάτων και χαρτών τμηματοποίησης για σκηνές από αλυσίδες παραγωγής διαφόρων βιομηχανιών. .... 115

Εικόνα 75 Ενδεικτικά αποτελέσματα κατά την χρήση της λύσης στην πλατφόρμα <http://greece40.csd.uoc.gr> ερωτώντας το μοντέλο γλώσσας /όρασης στην Ελληνική γλώσσα “Περιέγραψε την σκηνή” απευθείας από τον φυλλομετρητή. .... 119

Εικόνα 76 Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος λανθασμένης σειράς εκτέλεσης κατά την εκτέλεση των βημάτων (δράσεων) της δραστηριότητας Block 1. .... 122

Εικόνα 77 Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος υπο την μορφή παράλειψης εκτέλεσης κατά την εκτέλεση των βημάτων (δράσεων) της δραστηριότητας Block 2..... 123

Εικόνα 78 Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος υπο την μορφή παράλειψης εκτέλεσης κατά την εκτέλεση των βημάτων (δράσεων) της δραστηριότητας EGT..... 124

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 KPIs και Σενάρια Δοκιμής Λύσης 2.1.....	3
Πίνακας 2 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας (Λύση 2.2) .....	4
Πίνακας 2 KPIs και Σενάρια Δοκιμής Λύσης 2.3.....	7
Πίνακας 3 Σενάρια Χρήσης και KPIs για τη Λύση 2.4.....	9
Πίνακας 2 KPIs Digital Twin .....	15
Πίνακας 3 Επικύρωση μέσωσν επαλήθευσης Σ1.....	19
Πίνακας 4 Επικύρωση μέσωσν επαλήθευσης Σ2.....	20
Πίνακας 5 Επικύρωση μέσωσν επαλήθευσης Σ3.....	21
Πίνακας 6 Επικύρωση μέσωσν επαλήθευσης Σ4.....	23
Πίνακας 7 Αποτύπωση των ροών εισόδου -εξόδου για τη γραμμή παραγωγής και τις επιμέρους διεργασίες, και αποτελέσματα .....	39
Πίνακας 8 Λίστα Επιλεγμένων Key Performance Indicators για υπολογισμό μέσω του PSM Tool .....	41
Πίνακας 9 Λίστα προκλήσεων κατά την ανάπτυξη της Λύσης 9 και τρόποι αντιμετώπισής τους. ....	46
Πίνακας 10 Τα σημεία μέτρησης και οι κατευθύνσεις των αισθητήρων για τα επιταχυνσιόμετρα.....	48
Πίνακας 11 Δείγμα συνόλου δεδομένων από τις μετρήσεις των αισθητήρων.....	48
Πίνακας 12 Απόδοση Αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης (RL) σε Διορθωτικά Περιβάλλοντα (Corrective Environments) .....	51
Πίνακας 13 Απόδοση Αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης (RL) σε Μη Διορθωτικά Περιβάλλοντα (Non-Corrective Environments).....	52

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Πίνακας 14 Συνεισφορά του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων .....	57
Πίνακας 15 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας για την λύση 10β.....	59
Πίνακας 16 Τιμές δεικτών απόδοσης KPI για την αξιολόγηση του ελεγκτή και σύγκριση με παραδοσιακούς ελεγκτές τύπου PID .....	62
Πίνακας 17 Ερωτήσεις και Κατηγορίες .....	69
Πίνακας 18 Μετρήσεις στην ανάλυση συναισθήματος στις απαντήσεις των χρηστών.....	71
Πίνακας 19 Δημογραφικά στοιχεία ανά ομάδες ατόμων συμμετοχής στην δοκιμή στο εργαστήριο ..	75
Πίνακας 20 Αποτελέσματα ανά ομάδα δοκιμής στο εργαστήριο .....	75
Πίνακας 21 Περιληπτικά αποτελέσματα απόδοσης στη βιομηχανία .....	75
Πίνακας 22 Αποτελέσματα συνολικού χρόνου χειραψίας του PQ-EDHOC.....	90
Πίνακας 23 Αξιολόγηση ισχύος και ενέργειας κατά τη συνολική χειραψία του PQ-EDHOC .....	90
Πίνακας 24 Μέγεθος επικοινωνίας και χρήση μνήμης του PQ-EDHOC .....	91
Πίνακας 25 End-to-end αποτελέσματα πλήρους εφαρμογής: χρόνοι KeyGen/Sign/Verify (CPU-only vs PS/PL offload) και ποσοστιαία βελτίωση, ανά επίπεδο ασφάλειας.....	95
Πίνακας 26 Κατανάλωση πόρων (LUT/FF/BRAM/DSP) ανά υπομονάδα (π.χ. NTT, INTT, multiplier) και συνολικά, και επιτευχθέντα latency/throughput για συσχέτιση κόστους-απόδοσης.....	95
Πίνακας 27 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα .....	96
Πίνακας 28 Ενδεικτικά παραδείγματα ερωτήσεων και απαντήσεων κατά την αξιολόγηση του μοντέλου γλώσσας/όρασης.....	113
Πίνακας 29 Συγκεντρωτικός πίνακας μέσης ακρίβειας ανά άκρο (Mean Per Joint Estimation Error) της τρισδιάστατης επίλυσης της ανθρώπινης κινηματικής της λύσης μας σε χιλιοστά (mm) στο σύνολο επαλήθευσης του H3.6M. ....	116
Πίνακας 30 Συγκεντρωτικός πίνακας μέσης ακρίβειας (Average Precision) της λύσης με την χρήση της μετρικής HDM και Mean Squared Error (MSE) έναντι του σετ επαλήθευσης δεδομένων COCO ή των αποτελεσμάτων των καλύτερων παγκοσμίως νευρωνικών δικτύων την στιγμή εκπόνηση.....	117
Πίνακας 31 Συγκριτικός πίνακας σχετικού μεγέθους νευρωνικών δικτύων τελευταίας τεχνολογίας που εκτελεί κάποια εξειδικευμένη διεργασία κατανόησης σκηνής. Η λύση μας παράγει έναν μοναδικό διεθνώς συνδυασμό εξόδων κατανόησης σκηνής χρησιμοποιώντας ένα κλάσμα του μεγέθους δικτύων που απαιτούνται από τις βέλτιστες τεχνικές στην διεθνή βιβλιογραφία. Για την λειτουργία ερωταπαντήσεων σε φυσική γλώσσα στα Ελληνικά κάνουμε χρήση του οπτικού-γλωσσικού μοντέλου Deep Seek VL2 το οποίο έχει δισεκατομμύρια παραμέτρους και έχει κόστος εκπαίδευσης πολλών εκατομμυρίων κάτι το οποίο καθιστά ανέφικτη την κατασκευή μιας ιθαγενούς Ελληνικής λύσης με τους διαθέσιμους πόρους. ....	117
Πίνακας 32 Αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου στο HA4M σετ δεδομένων...	122
Πίνακας 33 Αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου στο σύνολο δεδομένων με διαφορετικές προδιαγραφές τοποθέτησης των οπτικών αισθητήρων σε σχέση με εκείνες στα βίντεο εκπαίδευσης.....	122

## 1 Εισαγωγή – Σκοπός και Στόχος του Παραδοτέου

Το παρόν Παραδοτέο Π3.2 εντάσσεται στο πλαίσιο του έργου Greece4.0, το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη, επίδειξη και αξιολόγηση ενός συνόλου προηγμένων τεχνολογικών λύσεων ψηφιακού μετασχηματισμού για την ελληνική μεταποιητική βιομηχανία. Οι λύσεις αυτές καλύπτουν κρίσιμες περιοχές της Βιομηχανίας 4.0 και της μετάβασης προς τη Βιομηχανία 5.0, όπως η αυτοματοποίηση και ρομποτική, τα Ψηφιακά Δίδυμα, η τεχνητή νοημοσύνη, η βελτιστοποίηση παραγωγικών διεργασιών, καθώς και η δημιουργία και αξιοποίηση βιομηχανικών δεδομένων.

Ο κύριος σκοπός του Παραδοτέου Π3.2 είναι η τεκμηριωμένη δοκιμή και αξιολόγηση των εφαρμογών και των πιλοτικών συστημάτων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του έργου, με έμφαση στην επιβεβαίωση της λειτουργικής τους επάρκειας, της τεχνολογικής ωριμότητας και της επιχειρησιακής τους αξίας. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω της εκτέλεσης συγκεκριμένων σεναρίων δοκιμής, της συλλογής μετρήσεων και της αντιστοίχισης των αποτελεσμάτων με τους δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) που είχαν καθοριστεί στις αρχικές φάσεις του έργου.

Το Παραδοτέο Π3.2 βασίζεται άμεσα στα αποτελέσματα προηγούμενων παραδοτέων. Ειδικότερα, στο Παραδοτέο Π1.1 είχαν οριστεί οι βασικές απαιτήσεις, οι στόχοι και οι δείκτες απόδοσης των τεχνολογικών λύσεων, προσδιορίζοντας το πλαίσιο αξιολόγησης που εφαρμόζεται στην παρούσα φάση. Στη συνέχεια, στο Παραδοτέο Π2.2 παρουσιάστηκε η τεχνική ολοκλήρωση των συστημάτων, η αρχιτεκτονική τους σχεδίαση και η υλοποίηση των υποσυστημάτων που συγκροτούν τις εφαρμογές. Επιπλέον, στο Παραδοτέο Π3.1 πραγματοποιήθηκε η πιλοτική εγκατάσταση των λύσεων σε εργαστηριακά περιβάλλοντα και η αρχική επίδειξη της λειτουργίας τους σε ελεγχόμενες συνθήκες.

Στο πλαίσιο του Π3.2, η αξιολόγηση επεκτείνεται και εμβαθύνει στην ποσοτική και ποιοτική τεκμηρίωση της απόδοσης των λύσεων, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η αξιοπιστία λειτουργίας, η ακρίβεια αποτελεσμάτων, η αποδοτικότητα διεργασιών, η μείωση χρόνου και κόστους, καθώς και η δυνατότητα ενσωμάτωσης σε πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε συνθήκες που προσομοιώνουν ρεαλιστικά παραγωγικά σενάρια, με στόχο την επιβεβαίωση επιπέδου τεχνολογικής ωριμότητας TRL5, δηλαδή την επικύρωση της λειτουργίας των συστημάτων σε σχετικό περιβάλλον εφαρμογής.

Το Παραδοτέο καλύπτει, μεταξύ άλλων, την αξιολόγηση λύσεων όπως τα αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και γραμμών παραγωγής, οι πλατφόρμες Ψηφιακού Διδύμου για συνεργατικά βιομηχανικά ρομπότ με χρήση τεχνητής νοημοσύνης, τα εργαλεία βελτιστοποίησης προσθετικής κατασκευής με υβριδικές μεθόδους, καθώς και οι πλατφόρμες δημιουργίας συνθετικών δεδομένων για την εκπαίδευση συστημάτων AI.

## 2 Δοκιμή και αξιολόγηση των Εφαρμογών του έργου Greece4.0

### 2.1. Αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για διαχείριση αποθήκης και εργασιών γραμμής παραγωγής

Η λύση 2.1 αφορά τον σχεδιασμό και την πιλοτική εγκατάσταση ενός αυτοκινούμενου ρομποτικού συστήματος (AMR) για την εκτέλεση εργασιών ενδο-εφοδιαστικής και μεταφοράς υλικών σε περιβάλλον αποθήκης ή παραγωγής.

#### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση της λύσης 2.1, η οποία αφορά αυτοκινούμενα ρομποτικά συστήματα για εφαρμογές ενδο-εφοδιαστικής (intralogistics) και υποστήριξης εργασιών γραμμής παραγωγής, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών σεναρίων δοκιμής σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον. Στόχος των δοκιμών ήταν η επαλήθευση της λειτουργικότητας του συστήματος, η επιβεβαίωση της τεχνικής αξιοπιστίας του υπό συνθήκες προσομοίωσης πραγματικής βιομηχανικής λειτουργίας, καθώς και η αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων με τους αντίστοιχους δείκτες απόδοσης (KPIs) που είχαν καθοριστεί στο πλαίσιο του έργου.

Τα σενάρια αξιολόγησης επικεντρώθηκαν σε κρίσιμες λειτουργίες ενός αυτοκινούμενου ρομπότ αποθήκης, όπως η αυτόνομη πλοήγηση, η ασφαλής μεταφορά υλικών, η διαχείριση δυναμικών εμποδίων και η δυνατότητα διασύνδεσης με ψηφιακά συστήματα παραγωγής και αποθήκης (π.χ. WMS/MES/ERP). Η δοκιμαστική διαδικασία περιλάμβανε επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις αποστολών (missions), καταγραφή χρονικών δεδομένων, επιβεβαίωση επιτυχούς ολοκλήρωσης ενεργειών και αξιολόγηση της σταθερότητας του συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

#### Σενάριο Σ1 – Αυτόνομη πλοήγηση και μεταφορά υλικού

Στο πρώτο σενάριο δοκιμής, το αυτοκινούμενο ρομποτικό σύστημα κλήθηκε να εκτελέσει μια τυπική αποστολή μεταφοράς υλικών εντός του χώρου αποθήκης. Συγκεκριμένα, το ρομπότ ξεκινούσε από προκαθορισμένο σημείο φόρτωσης, ακολουθούσε διαδρομή μεταφοράς και παρέδιδε το φορτίο σε σταθμό παραγωγής ή συλλογής. Κατά τη διάρκεια του σεναρίου αξιολογήθηκαν η ακρίβεια πλοήγησης και εντοπισμού (localization accuracy), η δυνατότητα τήρησης της διαδρομής, καθώς και η επιτυχής ολοκλήρωση της αποστολής χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Η λειτουργία βασίστηκε σε αισθητήρες πλοήγησης (όπως LiDAR και συστήματα όρασης), καθώς και σε αλγορίθμους ταυτόχρονης χαρτογράφησης και εντοπισμού (SLAM), οι οποίοι επιτρέπουν την αξιόπιστη κίνηση του ρομπότ σε περιβάλλοντα αποθήκης.

#### Σενάριο Σ2 – Δυναμική αποφυγή εμποδίων σε περιβάλλον παραγωγής

Το δεύτερο σενάριο επικεντρώθηκε στην ασφαλή λειτουργία του ρομπότ σε δυναμικό περιβάλλον, όπου εμφανίζονται εμπόδια όπως κινούμενα αντικείμενα, εργαζόμενοι ή προσωρινές παρεμβολές στη διαδρομή. Το ρομπότ κλήθηκε να συνεχίσει την αποστολή του προσαρμόζοντας τη διαδρομή σε πραγματικό χρόνο, εφαρμόζοντας μηχανισμούς obstacle avoidance και collision prevention.

Η αξιολόγηση περιλάμβανε τον έλεγχο της συμπεριφοράς του συστήματος σε απρόβλεπτες συνθήκες, την ικανότητα ασφαλούς επιβράδυνσης ή αναδρομολόγησης, καθώς και τη διατήρηση της αποδοτικότητας χωρίς πλήρη διακοπή της λειτουργίας.

#### Σενάριο Σ3 – Διασύνδεση με σύστημα διαχείρισης αποθήκης και παραγωγής

Το τρίτο σενάριο δοκιμής αφορούσε την ψηφιακή διασύνδεση του ρομποτικού συστήματος με κεντρική πλατφόρμα διαχείρισης αποθήκης ή παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό εξετάστηκε η δυνατότητα αποστολής εντολών logistics από ανώτερο σύστημα ελέγχου, η λήψη και εκτέλεση αποστολών, καθώς και η επιστροφή δεδομένων κατάστασης (status updates) προς το κεντρικό πληροφοριακό σύστημα.

Η δοκιμή αυτή αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη μελλοντική ενσωμάτωση της λύσης σε πραγματικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου απαιτείται διαλειτουργικότητα με WMS/MES υποδομές και δυνατότητα διαχείρισης στόλου (fleet management).

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Πίνακας 1 KPIs και Σενάρια Δοκιμής Λύσης 2.1

KPI	Περιγραφή Δείκτη	Σενάριο Επαλήθευσης	Αποτέλεσμα
KPI1	Επιτυχής ολοκλήρωση αποστολών μεταφοράς	Σ1	– Mission success rate >95%
KPI2	Ασφαλής πλοήγηση σε δυναμικό χώρο	Σ2	– Επιβεβαιώθηκε obstacle avoidance
KPI3	Μείωση χρόνου logistics cycle	Σ1	– Ταχύτερη μεταφορά έναντι χειροκίνητης
KPI4	Δυνατότητα ενσωμάτωσης σε MES/ERP	Σ3	– Επιβεβαιώθηκε τεχνική επεκτασιμότητα

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το αυτοκινούμενο σύστημα μπορεί να υποστηρίξει αποδοτικές διαδικασίες intralogistics, μειώνοντας χειροκίνητες μεταφορές και αυξάνοντας την ευελιξία της παραγωγής. Η λύση θεωρείται ώριμη για μετάβαση σε βιομηχανική πιλοτική εγκατάσταση.

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

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Η επίδειξη της λύσης «Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) για ευέλικτη πλατφόρμα συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ με χρήση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης» οργανώνεται σε σενάρια χρήσης που καλύπτουν: (α) την ασφαλή συνεργασία ανθρώπου–ρομπότ με αξιοποίηση TN και δεδομένων πραγματικού χρόνου, (β) τη δημιουργία/συγχρονισμό του ψηφιακού περιβάλλοντος με το φυσικό κελί, και (γ) την ευέλικτη αναδιαμόρφωση (reconfiguration) διαδικασιών και παραμέτρων παραγωγής. Η λογική των σεναρίων ευθυγραμμίζεται με τους δείκτες αξιολόγησης που έχουν οριστεί για τη λύση: KPI1: Μοντελοποίηση πολλαπλών βιομηχανικών διαδικασιών, KPI2: Εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων αναπροσαρμογής της παραγωγικής διαδικασίας, KPI3: Μείωση του χρόνου σχεδίασης και εφαρμογής βιομηχανικών διαδικασιών. Προαπαιτούμενα επίδειξης και ροή δεδομένων.

Σύνδεση φυσικού κελιού και ψηφιακού διδύμου: Το ψηφιακό περιβάλλον αναπαριστά ρεαλιστικά μια υπαρκτή εργοστασιακή μονάδα και συγχρονίζεται σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο με δεδομένα αισθητήρων, ώστε να αποτυπώνει δυναμικά τις συνθήκες λειτουργίας.

Υποσύστημα αντίληψης ανθρώπου και δυναμικών εμποδίων (TN + όραση): Το σύστημα βασίζεται σε ROS2, όπου subscribers λαμβάνουν δεδομένα από κάμερες και publishers μεταδίδουν επεξεργασμένες πληροφορίες θέσης/σημείων-κλειδιών. Η εκτίμηση ανθρώπινης στάσης/σημείων γίνεται με σκελετικά μοντέλα 3D, ώστε να δημιουργούνται δυναμικά εμπόδια προς αποφυγή.

Βαθμονόμηση hand–eye: Για αξιόπιστη χωρική αντιστοίχιση κάμερας–βάσης ρομπότ, εκτελείται βαθμονόμηση hand–eye. Στην πιλοτική υλοποίηση χρησιμοποιείται στατική κάμερα και δείκτης ArUco προσαρμοσμένος στον ρομποτικό βραχίονα.

Σχεδιασμός κίνησης & αποφυγή σύγκρουσης: Ο έλεγχος κίνησης και ο σχεδιασμός τροχιάς υλοποιούνται με MoveIt2 (ROS2), το οποίο υποστηρίζει αποφυγή σύγκρουσης με στατικά και δυναμικά εμπόδια. Οι χειριστές αναπαρίστανται ως δυναμικά αντικείμενα (π.χ. σφαίρες/όγκος ασφαλείας), και όταν προβλέπεται σύγκρουση, το ρομπότ επιβραδύνει ή σταματά προσωρινά.

Διαδικασία επίδειξης: Τα σενάρια εκτελούνται με κοινή μεθοδολογία: (i) ορισμός διαδικασίας στο DT, (ii) προσομοίωση/επαλήθευση, (iii) εκτέλεση στο φυσικό κελί με ενεργό συγχρονισμό, (iv) καταγραφή (logs) συμβάντων ασφάλειας/παρεμβάσεων και χρόνων υλοποίησης.

### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Πίνακας 2 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας (Λύση 2.2)

Σενάριο Επίδειξης	Στόχος	Περιγραφή/ Βήματα Εκτέλεσης	Μέσα επαλήθευσης / Αναμενόμενο αποτέλεσμα	KPI
Σ1 – Μοντελοποίηση 2 διαδικασιών συναρμολόγησης στο DT	Επίδειξη ότι το DT υποστηρίζει πολλαπλές διαδικασίες (π.χ. pick-and-place + βίδωμα/κουμπώματα)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ορισμός κελιού/εργαλείων/αντικειμένων στο ψηφιακό περιβάλλον.</li> <li>• Παραμετροποίηση κινήσεων ρομπότ (όρια, ταχύτητες).</li> <li>• Προσομοίωση κύκλου για Διαδικασία A και B.</li> <li>• Εκτέλεση στο φυσικό κελί με ταυτόχρονη οπτικοποίηση στο DT.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα ψηφιακά και φυσικά συμβάντα (στάσεις, ενέργειες, κύκλοι) εμφανίζουν συνεπή ακολουθία.</li> <li>• Επιτυχής ολοκλήρωση 2 διαφορετικών ροών εργασίας χωρίς επαναμοντελοποίηση από την αρχή.</li> </ul>	KPI1
Σ2 – Ασφαλής	Επίδειξη ανίχνευσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hand–eye calibration με ArUco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MoveIt2 αναπρογραμματίζει</li> </ul>	Υποστηρικτικό σενάριο

Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

<p>συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ με δυναμικά εμπόδια</p>	<p>ανθρώπου και αποφυγής σύγκρουσης με χρήση TN &amp; MoveIt2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εκκίνηση ROS2 κόμβων αντίληψης: από κάμερα → keypoints/skeleton → δημιουργία δυναμικών εμποδίων.</li> <li>• Εκτέλεση ρομποτικής κίνησης κοντά σε ζώνη χειριστή.</li> <li>• Ο χειριστής εισέρχεται/κινείται εντός ορισμένου "safety envelope".</li> </ul>	<p>τροχιά ή ενεργοποιεί slowdown/stop όταν προβλέπεται σύγκρουση.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Καταγραφή συμβάντων "near-collision", χρόνου αντίδρασης και καταστάσεων safety stop.</li> </ul>	<p>ασφάλειας (τεκμηριώνει τη λειτουργία TN/real-time)</p>
<p>Σ3 – Αναπροσαρμογή παραγωγικής διαδικασίας (reconfiguration) χωρίς ανακατασκευή μοντέλου</p>	<p>Επίδειξη ευελιξίας: αλλαγή παραμέτρων/σεναρίου και συνέχιση λειτουργίας</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιλογή νέου σεναρίου (π.χ. αλλαγή σειράς βημάτων, νέες θέσεις στόχων, διαφορετικό εργαλείο).</li> <li>• Επικαιροποίηση παραμέτρων στο DT και επαναπροσομοίωση.</li> <li>• Εφαρμογή αλλαγής στο φυσικό κελί.</li> <li>• Παρακολούθηση συνέπειας DT-φυσικού.</li> <li>• Ενεργοποίηση συγχρονισμού αισθητήρων/ροών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιτυχής εκτέλεση εναλλακτικής ροής χωρίς αποσυγχρονισμό.</li> <li>• Τεκμηριωμένη αλλαγή configuration και ορθότητα νέας τροχιάς.</li> </ul>	<p>KPI2</p>
<p>Σ4 – Δυναμική ενημέρωση DT με γεγονότα/εμπόδια πραγματικού χρόνου</p>	<p>Επίδειξη "ζωντανού" DT που ακολουθεί το φυσικό περιβάλλον</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εισαγωγή μη προγραμματισμένου αντικειμένου/εμποδίου στον χώρο.</li> <li>• Αυτόματη ενημέρωση της ψηφιακής σκηνής και επαναυπολογισμός ασφαλούς κίνησης.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Το DT αποτυπώνει την αλλαγή στη σκηνή.</li> <li>• Η κίνηση προσαρμόζεται/ανασχεδιάζεται ώστε να αποφεύγεται το νέο εμπόδιο.</li> </ul>	<p>KPI2 (ως μορφή αναπροσαρμογής)</p>
<p>Σ5 – Μέτρηση χρόνου σχεδίασης &amp; εφαρμογής (baseline vs DT)</p>	<p>Ποσοτικοποίηση οφέλους στη μηχανική/προγραμματισμό διαδικασιών</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ορισμός baseline διαδικασίας χωρίς DT (χειροκίνητη ρύθμιση/προγραμματισμός).</li> <li>• Ορισμός ίδιας διαδικασίας με DT (μοντελοποίηση + προσομοίωση + εφαρμογή).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μείωση συνολικού χρόνου (ιδίως validate/deploy) λόγω προσομοίωσης και έγκαιρου εντοπισμού ασυμβατοτήτων.</li> <li>• Παρουσίαση συγκριτικών μετρήσεων.</li> </ul>	<p>KPI3</p>

## Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- Καταγραφή χρόνων (T\_design, T\_validate, T\_deploy).
-

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

Το πιλοτικό σύστημα της λύσης «Λογισμικό για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση υβριδικών μεθόδων» ολοκληρώθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον με στόχο την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός ολοκληρωμένου εργαλείου υποστήριξης της διαδικασίας Additive Manufacturing (AM). Η λύση ανταποκρίνεται στις βασικές προκλήσεις των διεργασιών προσθετικής κατασκευής, οι οποίες σχετίζονται τόσο με την ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου (εγκλείσματα, πόροι, μικρορωγμές), όσο και με γεωμετρικές αποκλίσεις και ανάγκες επανακατεργασίας.

Η πιλοτική εγκατάσταση περιλάμβανε την υλοποίηση λογισμικού πλαισίου βελτιστοποίησης που αξιοποιεί υβριδικές μεθόδους προσομοίωσης και δεδομένων διεργασίας, παρέχοντας τις ακόλουθες λειτουργίες:

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

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

#### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

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

Πίνακας 3 KPIs και Σενάρια Δοκιμής Λύσης 2.3

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

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

→ simulation →

print)

Σενάριο 5: Υποστήριξη εντοπισμού υλικών/εργαλείων και workflow planning	Μείωση χρόνου προετοιμασίας λόγω καλύτερης διαχείρισης πόρων	KPI5	50 λεπτά setup	30 λεπτά setup	~40%
--	--	------	----------------	----------------	------

---

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της πιλοτικής επίδειξης καταδεικνύουν ότι η λύση συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής, στη βελτίωση της αξιοπιστίας της παραγωγικής διαδικασίας και στη μείωση επαναληπτικών εργασιών μέσω ενός ολοκληρωμένου λογισμικού πλαισίου βελτιστοποίησης. Η αξιολόγηση επιβεβαιώνει τη δυνατότητα εφαρμογής της λύσης σε πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα προσθετικής κατασκευής.

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

Στο Παραδοτέο Π1.1, η λύση «Λογισμικό για τη δημιουργία συνθετικών για την εκπαίδευση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης» αξιολογείται μέσω KPIs που σχετίζονται με:

- αύξηση διαθέσιμων δεδομένων
- βελτίωση ακρίβειας AI μοντέλων
- μείωση κόστους συλλογής πραγματικών δεδομένων
- μείωση χρόνου ανάπτυξης AI εφαρμογών

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

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

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

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

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

Η πλατφόρμα επιτρέπει τη δημιουργία ρεαλιστικών συνθετικών σεναρίων βλαβών και λειτουργίας εξοπλισμού, παρέχοντας επαρκή όγκο δεδομένων για την εκπαίδευση predictive maintenance και anomaly detection αλγορίθμων.

Με την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, το πιλοτικό σύστημα θεωρείται λειτουργικό ως εργαλείο ενίσχυσης της ανάπτυξης AI εφαρμογών στη βιομηχανία, μειώνοντας σημαντικά την εξάρτηση από πραγματικά datasets.

### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

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

Πίνακας 4 Σενάρια Χρήσης και KPIs για τη Λύση 2.4

Σενάριο Επίδειξης	Στόχος	KPI	Τιμή πριν	Τιμή μετά	Βελτίωση
Σενάριο 1: Παραγωγή συνθετικών δεδομένων βλαβών για predictive maintenance	Αύξηση διαθέσιμων δεδομένων εκπαίδευσης	KPI1	1.000 πραγματικά δείγματα	10.000 δείγματα (1k real + 9k synthetic)	+900%
Σενάριο 2: Εκπαίδευση AI	Βελτίωση ακρίβειας	KPI2	78% accuracy	89% accuracy	+11 μονάδες

Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

μοντέλου με synthetic augmentation	ταξινόμησης βλαβών				
Σενάριο 3: Μείωση ανάγκης συλλογής πραγματικών δεδομένων	Μείωση κόστους δεδομένων και labeling	KPI3	100% real data collection	35% real + 65% synthetic	-65% κόστος
Σενάριο 4: Επιτάχυνση ανάπτυξης AI pipeline	Μείωση χρόνου ανάπτυξης AI εφαρμογής	KPI4	8 εβδομάδες	5 εβδομάδες	~38%

Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της πιλοτικής επίδειξης καταδεικνύουν ότι η λύση μπορεί να λειτουργήσει ως κρίσιμο εργαλείο υποστήριξης της ανάπτυξης τεχνητής νοημοσύνης στη βιομηχανία, επιτρέποντας την παραγωγή μεγάλου όγκου ρεαλιστικών δεδομένων, τη βελτίωση της απόδοσης AI μοντέλων και τη σημαντική μείωση κόστους και χρόνου ανάπτυξης.

Η χρήση συνθετικών δεδομένων ενισχύει τη δυνατότητα γενίκευσης των μοντέλων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σπάνιων βλαβών ή περιορισμένης πρόσβασης σε πραγματικά δεδομένα, συμβάλλοντας στην ευρύτερη αξιοποίηση AI εφαρμογών στο πλαίσιο του Greece4.0.

## 2.5<sup>α</sup>. Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Εξοπλισμού στην Βιομηχανία 4.0

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Η λύση 5 της Ενότητας Εργασίας 3 αφορά την ανάπτυξη και αξιολόγηση μιας ολοκληρωμένης υποδομής Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) για την παρακολούθηση και την αποτίμηση της λειτουργίας βιομηχανικού εξοπλισμού σε πραγματικό και εικονικό χρόνο. Τα σενάρια ελέγχου βασίστηκαν στις λειτουργικές δοκιμές που παρουσιάστηκαν στο Π3.1 και πλέον αξιολογούν τόσο την ποιότητα, όσο και την αξιοπιστία και χρηστικότητα της λύσης στο εργαστηριακό περιβάλλον.

Το εργαστηριακό σύστημα περιλαμβάνει έναν προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC) που εποπτεύει τη στάθμη της δεξαμενής, έναν αισθητήρα δονήσεων τύπου event-triggered και μια πλατφόρμα Digital Twin η οποία έχει υλοποιηθεί με τη σουίτα Eclipse Ditto, MQTT messaging, InfluxDB για αποθήκευση χρονοσειρών και custom υπηρεσίες για ανάλυση και οπτικοποίηση. Ο κύριος στόχος ήταν να αξιολογηθεί εάν η υποδομή δύναται να υποστηρίξει αξιόπιστα, μετρήσιμα και αναπαραγώγιμα σενάρια λειτουργίας εξοπλισμού, τόσο κατά τη φυσική λειτουργία όσο και κατά τη διεξαγωγή προσομοιώσεων.

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης εξετάστηκαν τρία διακριτά σενάρια, όπως ορίστηκαν στο ανανεωμένο 3.1 «Λύση 5»:

1. **Σενάριο 1 (KPI 1) – Διασύνδεση ροών δεδομένων με την πλατφόρμα Ψηφιακού Διδύμου**  
Ελέγχθηκε η αδιάλειπτη επικοινωνία PLC → MQTT → Ditto → InfluxDB και η ικανότητα της πλατφόρμας να ενημερώνει το Digital Twin με μικρές καθυστερήσεις και χωρίς απώλειες δεδομένων.
2. **Σενάριο 2 (KPI 2) – Χρήση event-triggered αισθητήρα δονήσεων με FFT & ML μοντέλα**  
Αξιολογήθηκε ο μηχανισμός καταγραφής δονήσεων, η ανάλυση συχνότητας μέσω FFT και η ακρίβεια των δύο μοντέλων ταξινόμησης (Random Forest και Transformer). Εξετάστηκε η αξιοπιστία ανίχνευσης σφαλμάτων (fault detection accuracy), ο χρόνος ανταπόκρισης και η διαθεσιμότητα των αποτελεσμάτων εντός του Digital Twin.
3. **Σενάριο 3 (KPI 3) – Εκτέλεση υποθετικών σεναρίων παραγωγικής λειτουργίας μέσω προσομοιώσεων**

Στο πλαίσιο του Digital Twin πραγματοποιήθηκαν what-if δοκιμές, όπως αλλαγές σε ρυθμούς εισροής/εκροής, εμφάνιση σφαλμάτων και λειτουργία υπό εναλλακτικές συνθήκες. Στόχος ήταν να διαπιστωθεί εάν η πλατφόρμα μπορεί να υποστηρίξει λήψη αποφάσεων, πρόβλεψη συμπεριφοράς και αποδοτικότερο προγραμματισμό της παραγωγής.

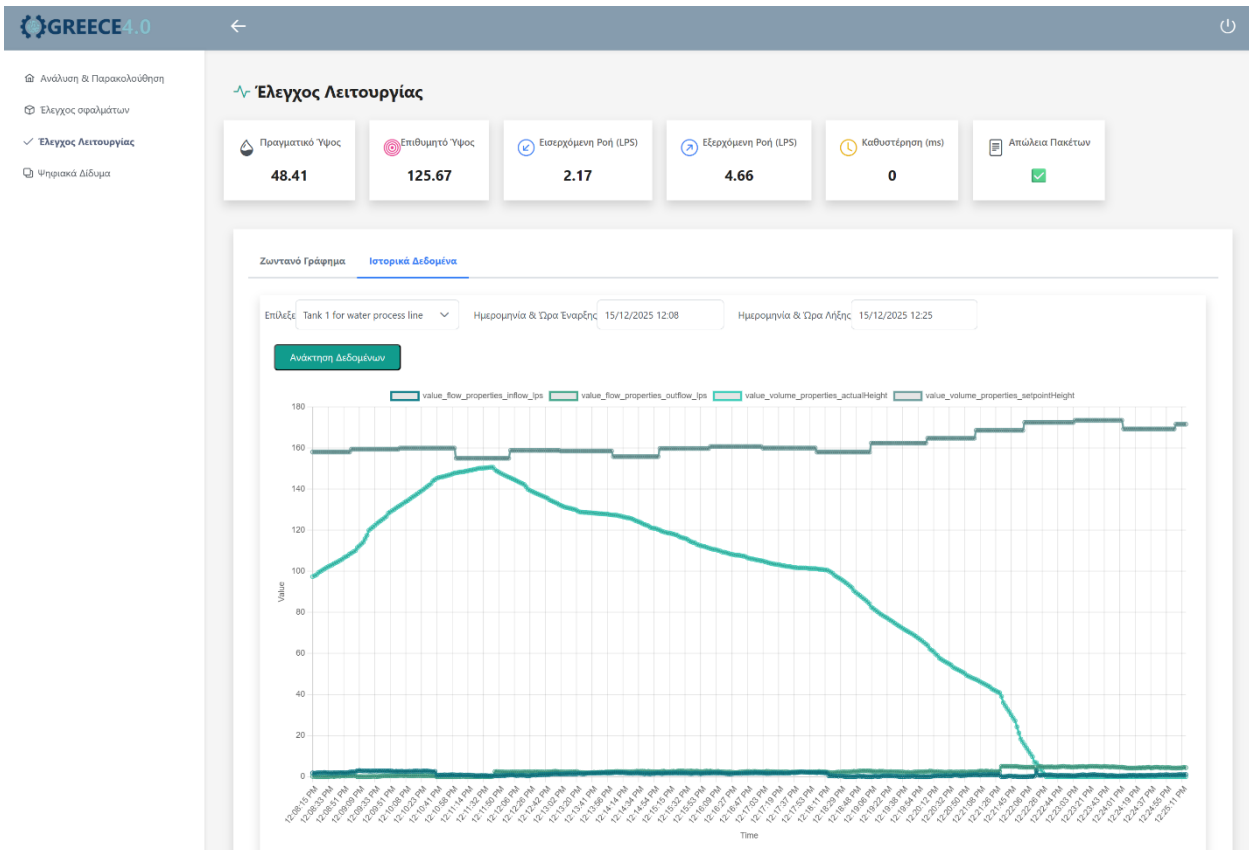
Για κάθε σενάριο δημιουργήθηκαν κατάλληλα logs, απεικονίσεις και πίνακες μέτρησης επιδόσεων, που αξιοποιήθηκαν στη συνολική αξιολόγηση της λύσης. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν latency, packet loss, αριθμό event-triggers, επιδόσεις ταξινόμησης μέσω ML, χρόνους προσομοιώσεων και ακρίβεια μεταξύ προβλεπόμενων–πραγματικών τιμών.

### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

#### *KPI1 – Βελτίωση της παρακολούθησης της παραγωγής σε θέματα χρονικής και ποσοτικής ροής δεδομένων*

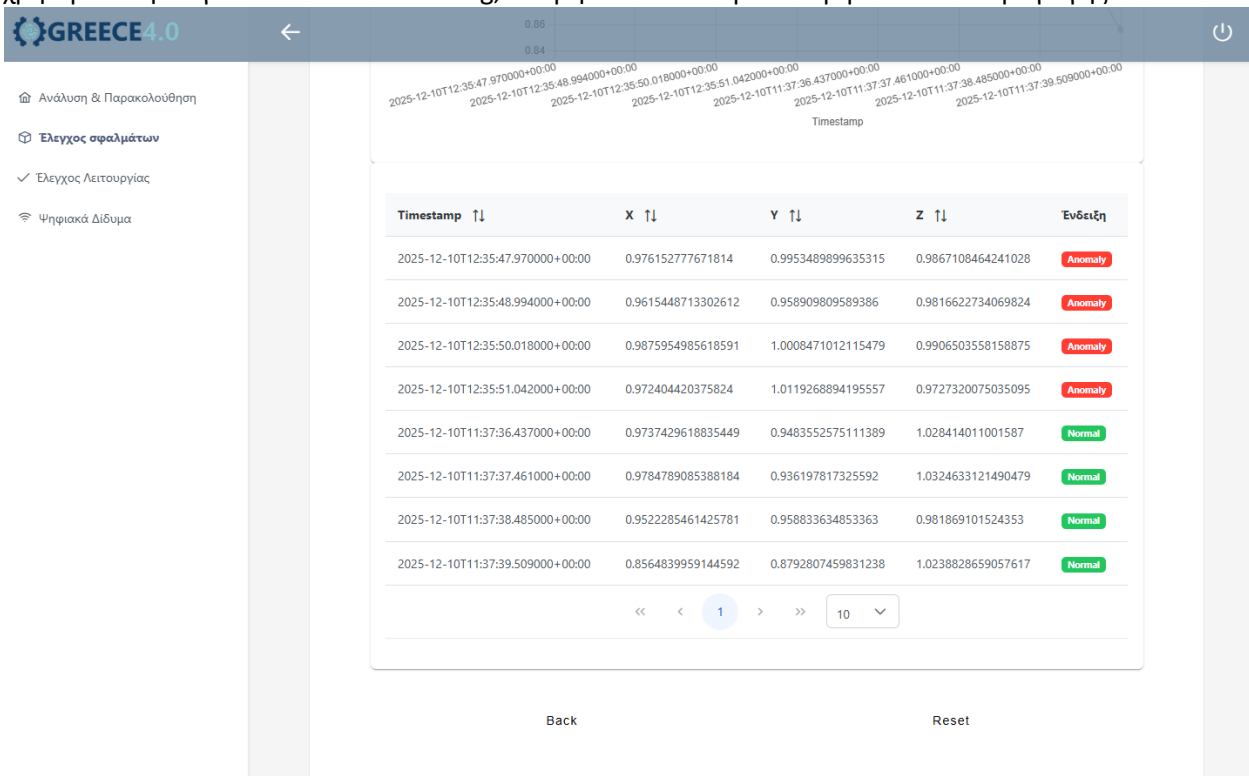
Η λειτουργία της υποδομής ροής δεδομένων από το PLC, μέσω MQTT, στο Ditto και κατά συνέπια στην InfluxDB επαληθεύτηκε μέσω μετρήσεων καθυστέρησης και παρακολούθησης απωλειών πακέτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ομαλή ροή δεδομένων, με σταθερό latency και μηδενική απώλεια μηνυμάτων.

## Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 1 Γράφημα παρελθοντικών τιμών στην πλατφόρμα ψηφιακού διδύμου

Η συνέπεια των timestamps εντός του Digital Twin επιβεβαιώνει ότι η πλατφόρμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για real-time monitoring, ακόμη και σε δυναμικά περιβάλλοντα παραγωγής.



Εικόνα 2 Αποθηκευμένες τιμές με timestamp

*KPI2 – Πιο έγκαιρη διάγνωση σφαλμάτων με την εφαρμογή υπαρχόντων μεθόδων πρόβλεψης*

Για την επιβεβαίωση του KPI2, υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο εργαστηριακό σενάριο που περιλαμβάνει έναν μηχανισμό ανίχνευσης δονήσεων στο τέλος της δεξαμενής, όπου βρίσκεται η κρίσιμη μηχανή (π.χ. αντλία/βαλβίδα/μοτέρ) βασισμένος σε Adafruit Huzzah 32 – ESP32 (μικροελεγκτής με Wi-Fi), LIS3DH επιταχυνσιόμετρο της STMicroelectronics, Διασύνδεση SPI και Υποστήριξη OTA firmware updates. Τα δεδομένα από αυτό το σύστημα στέλνονται σε πραγματικό χρόνο μέσω του υποσυστήματος IoT στην πλατφόρμα.

Κάθε εγγραφή αντιστοιχεί σε μία μέτρηση δόνησης από την μηχανή σε κατάσταση είτε Healthy (Υγιής) είτε Faulty (Ελαττωματική). Για την αποτύπωση των χαρακτηριστικών στο πεδίο της συχνότητας, μια σύνθετες τεχνική για ανίχνευση μηχανικών σφαλμάτων<sup>1</sup>, κάθε σήμα στο πεδίο του χρόνου  $x(t)$  μετασχηματίστηκε στο μέτρο του φάσματός του με χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (FFT). Αναλυτικότερα, για κάθε άξονα ( $x, z, y$ ) μετρήσεων του επιταχυνσιόμετρου υπολογίστηκε το FFT:

$$X(k) = FFT(x(n)), n = 0, \dots, N - 1$$

Κρατήθηκαν μόνο τα θετικά δείγματα συχνότητας (μονόπλευρο φάσμα). Για σήμα μήκους  $N$ , προκύπτουν  $N/2$  φασματικά bins. Ύστερα, υπολογίστηκε και κλιμακώθηκε το μέτρο του φάσματος ως:

$$mag(k) = \frac{2}{N} |X(k)|$$

Κάθε δείγμα αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα συχνοτήτων το οποίο περιέχει τις τιμές του μέτρου για όλα τα φασματικά bins:

$$x \in R^L$$

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε σε κάθε αρχείο και κάθε άξονα, με αποτέλεσμα ένα σύνολο δεδομένων υπό την μορφή πινάκων στο οποίο κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε έναν συνδυασμό (filename, label, axis) και κάθε στήλη αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο bin συχνότητας.

Σε κάθε δείγμα αποδόθηκε μία δυαδική ετικέτα: 0: Healthy (Υγιής) 1: Faulty (Ελαττωματική). Το σύνολο των δεδομένων χωρίστηκε σε σύνολο εκπαίδευσης και ελέγχου με διαχωρισμό 80/20 και στρωματοποιημένη δειγματοληψία (stratified split), ώστε να διατηρηθεί η αναλογία των κλάσεων με 80% των δειγμάτων να διατηρούνται για εκπαίδευση και 20% των δειγμάτων για τελικό έλεγχο.

Οι ετικέτες εκπαίδευσης διατηρήθηκαν ως δεκαδικές τιμές στο σύνολο  $\{0,1\}$ , για συμβατότητα με το binary cross-entropy loss function που χρησιμοποιήθηκε στο νευρωνικά δίκτυο και στον αλγόριθμο μηχανικής μάθησης.

Για καλύτερη εκμετάλλευση της δομής του φάσματος στο πεδίο της συχνότητας, διατηρώντας ταυτόχρονα το μοντέλο συμπαγές και εκπαιδευσιμο σε σχετικά μικρό σύνολο δεδομένων, υλοποιήθηκε ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης Transformer και συγκρίθηκε ως προς την ακρίβεια με το μοντέλο μηχανικής μάθησης Random Forest. Συγκεκριμένα, εμπνεόμενοι από την συγκεκριμένη δουλειά<sup>2</sup>, υλοποιήθηκε ο Transformer με τα κάτωθι δομικά μέρη.

Το τυποποιημένο διάνυσμα FFT  $x$  για κάθε δείγμα διαιρέθηκε σε μη επικαλυπτόμενα “patches” συνεχόμενων φασματικών bins με μέγεθος patch:  $P=25$  φασματικά bins και αριθμό patches:

$$Np = \frac{P}{L}$$

Χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα πρώτα  $Np \cdot P$  χαρακτηριστικά, ώστε το μήκος εισόδου να είναι ακριβές πολλαπλάσιο του μεγέθους patch. Κάθε δείγμα αναδιαμορφώθηκε από επίπεδο διάνυσμα μήκους  $Np \cdot P$  σε μήτρα διαστάσεων:

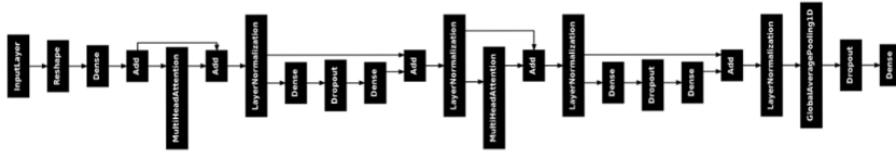
$$X_{patch} \in R^{Np \times P}$$

Κάθε patch προβάλλεται σε χώρο σταθερής διάστασης (patch embedding) και εμπλουτίζεται με μαθησιακές ενσωματώσεις θέσης (positional embedding), ώστε να διατηρείται η πληροφορία στον άξονα συχνότητας.

Πάνω στα ενσωματωμένα patches εφαρμόζονται διαδοχικά μπλοκ Transformer με Multi-Head Self-Attention και θέση-προς-θέση πλήρως συνδεδεμένα δίκτυα (Feed-Forward Networks), τα οποία επιτρέπουν στο μοντέλο να συλλαμβάνει τόσο τοπικές όσο και μακροπρόθεσμες συσχετίσεις στο φάσμα. Η τελική αναπαράσταση προκύπτει μέσω global average pooling κατά μήκος των patches και τροφοδοτείται σε μία πυκνή έξοδο με σιγμοειδή ενεργοποίηση, η οποία αποδίδει την πιθανότητα το

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

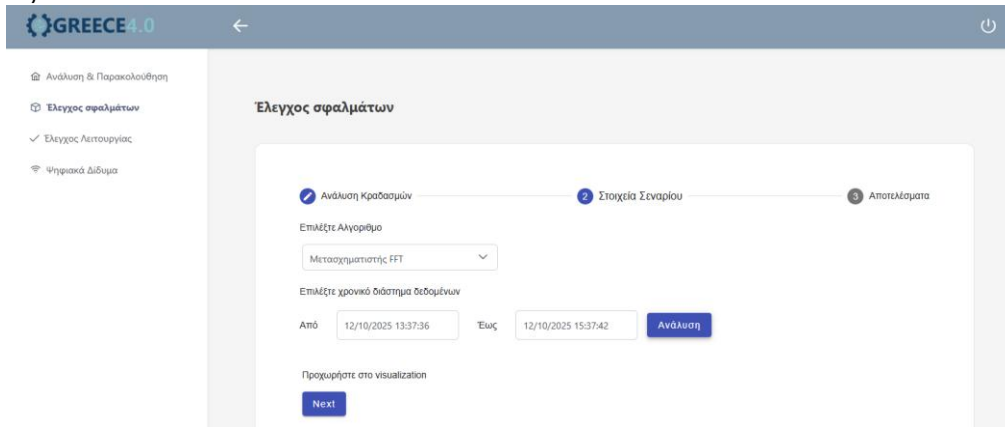
δείγμα να ανήκει στην κλάση “Faulty”. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε με binary cross-entropy και βελτιστοποιητή Adam, χρησιμοποιώντας early stopping για την αποφυγή υπερπροσαρμογής (overfitting). Η αρχιτεκτονική του Transformer οπτικοποιείται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 Αρχιτεκτονική Transformer

Ο αισθητήρας δονήσεων ενεργοποιήθηκε μόνο όταν υπήρχαν ενδείξεις υπερβολικής δόνησης, μειώνοντας σημαντικά τον όγκο δεδομένων και αυξάνοντας την αποδοτικότητα της καταγραφής. Μετά τον FFT μετασχηματισμό των σημάτων και την εξαγωγή φασματικών χαρακτηριστικών, τα μοντέλα RF και Transformer αξιολογήθηκαν με βάση accuracy, precision, recall και F1-score. Ο Transformer πέτυχε την καλύτερη συνολική απόδοση, με ιδιαίτερα υψηλό recall, γεγονός που σημαίνει μικρό αριθμό μη ανιχνευθέντων πραγματικών σφαλμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά τεκμηριώνουν ότι η λύση μπορεί να υποστηρίξει πρακτικές predictive maintenance.

Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την παραπάνω λειτουργία μέσω της πλατφόρμας. Αφού επιλέξει τον αλγόριθμο και το διάστημα δεδομένων μπορεί να δει την ανάλυση του αλγορίθμου μέσω ενός γραφήματος.



Εικόνα 4 Επιλογή παραμέτρων ανάλυσης

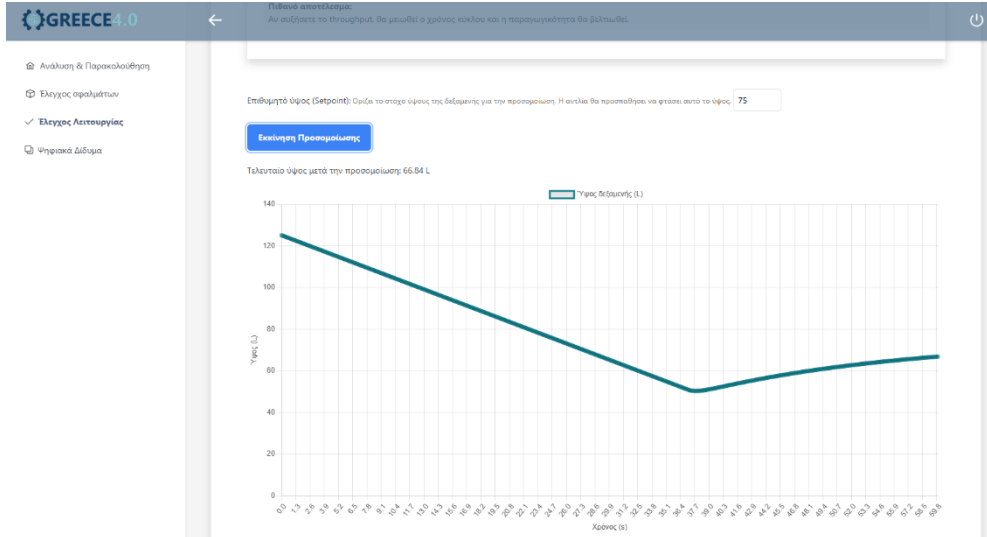


Εικόνα 5 Αποτέλεσμα ανάλυσης

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### KPI3 – Αποδοτικότερος προγραμματισμός της παραγωγής με τη χρήση δυναμικών προσομοιώσεων και υποθετικών σεναρίων

Το Digital Twin χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο προσομοίωσης για την εκτέλεση σεναρίων που δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα στον πραγματικό εξοπλισμό. Αξιολογήθηκαν η πιστότητα δεικτών όπως throughput, χρόνοι κύκλου, εντοπισμός bottlenecks και αντίδραση της διαδικασίας σε αλλαγές στην προσομοίωση. Οι προσομοιώσεις παρείχαν σταθερά και αναπαραγώγιμα αποτελέσματα, επιτρέποντας την εκτίμηση της επίδρασης εναλλακτικών ρυθμίσεων πριν αυτές εφαρμοστούν σε πραγματικό εξοπλισμό. Πιο συγκεκριμένα, στο εργαστηριακό σενάριο, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει η επιθυμητή τιμή στάθμης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διαδικασία προσομοίωσης μέσω της πλατφόρμας.



Εικόνα 6 Προσομοίωση αλλαγή επιθυμητής στάθμης μέσω της πλατφόρμας ψηφιακού διδύμου

Για την επαλήθευση της προσομοίωσης έγινε η αντίστοιχη αλλαγή και στο πραγματικό σύστημα για να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η απόκριση του πραγματικού συστήματος είναι πανομοιότυπη με αυτή της προσομοίωσης.

#### Συνολική επιβεβαίωση KPIs

Πίνακας 5 KPIs Digital Twin

KPI	Περιγραφή	Κατάσταση
KPI1	Αξιόπιστη ροή δεδομένων PLC → Digital Twin	Επιβεβαιωμένο
KPI2	Έγκαιρη διάγνωση σφαλμάτων με FFT & ML	Επιβεβαιωμένο
KPI3	Προσομοιώσεις για προγραμματισμό παραγωγής	Επιβεβαιωμένο

Όλα τα KPIs επιβεβαιώθηκαν στο εργαστηριακό περιβάλλον, καλύπτοντας τις προδιαγραφές του Π3.1.

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η συνολική αξιολόγηση της λύσης 5 δείχνει ότι η προσέγγιση του Ψηφιακού Διδύμου μπορεί να υποστηρίξει με αξιόπιστο και αποδοτικό τρόπο την ανάλυση πραγματικών δεδομένων εξοπλισμού και την πρόβλεψη μελλοντικών καταστάσεων λειτουργίας.

Η ροή δεδομένων από το PLC προς την πλατφόρμα απέδειξε υψηλή σταθερότητα, καθιστώντας δυνατή την παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών σε πραγματικό χρόνο. Η χρήση MQTT και Ditto επέτρεψε τη γρήγορη και τυποποιημένη ενσωμάτωση των δεδομένων στη λογική του Digital Twin, στοιχείο που αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για πρακτικές Industry 4.0.

Η αξιοποίηση event-triggered sensing και τεχνικών μηχανικής μάθησης για την ανίχνευση σφαλμάτων ανέδειξε τη δυνατότητα του συστήματος να εντοπίζει ανωμαλίες πριν γίνουν εμφανείς στη συνολική ροή παραγωγής. Η επίδοση των μοντέλων RF και ιδιαίτερα του Transformer υποστηρίζουν τη χρήση του Digital Twin ως εργαλείου έγκαιρης προειδοποίησης.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Τέλος, η δυνατότητα εκτέλεσης προσομοιώσεων προσθέτει σημαντική αξία στη λύση. Η πλατφόρμα επιτρέπει την αξιολόγηση σεναρίων που δεν θα ήταν εφικτά σε πραγματικές συνθήκες, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την οργάνωση της παραγωγής και τη διαχείριση πόρων. Η σταθερότητα και επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων καθιστούν τη λύση κατάλληλη για χρήση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η λύση 5 ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της Ενότητας Εργασίας 3 και προσφέρει μια σύγχρονη, ευέλικτη και επεκτάσιμη προσέγγιση για την υλοποίηση Ψηφιακών Διδύμων εξοπλισμού, ενισχύοντας ταυτόχρονα την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την προβλεψιμότητα των βιομηχανικών διαδικασιών.

## 2.5<sup>β</sup>. Αλγόριθμοι Προσομοίωσης για Ψηφιακά Δίδυμα Διαδικασιών στην Βιομηχανία 4.0

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

Η πιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος έγινε στο αντίγραφο-μικρογραφία μιας γραμμής παραγωγής που υπάρχει εγκατεστημένο στο Ινστιτούτο Βιομηχανικών Συστημάτων του ΑΘΗΝΑ, το οποίο περιγράφεται λεπτομερώς στο Παραδοτέο Π3.1 του έργου.

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

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

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

#### Σ1: Εκτέλεση προκαθορισμένης βιομηχανικής διαδικασίας παραγωγής

Στο πρώτο σενάριο, παρουσιάζεται η εγκατάσταση του Ψηφιακού Διδύμου και ο συγχρονισμός με την πραγματική γραμμή παραγωγής. Στα πλαίσια του έργου έχει κατασκευαστεί μία ροή διαδικασιών (pipeline) η οποία δέχεται ένα αρχείο AML (AML είναι η τυποποιημένη γλώσσα περιγραφής εργοστασίων), και παράγει το Ψηφιακό Δίδυμο του εργοστασίου που περιγράφει η γλώσσα αυτή. Η πραγμάτωση (instantiation) του Διδύμου γίνεται στο τρισδιάστατο χώρο της μηχανής παιχνιδιών Unity, όπου ανάλογα με τη μηχανή που περιγράφεται στην AML, πραγματώνεται στον 3D χώρο το αντίστοιχο τρισδιάστατο αντίγραφο της μηχανής (prefab). Επίσης, με την ανάγνωση του αρχείου, αυτόματα συνδέονται όλα τα ψηφιακά μηχανήματα με τους αντίστοιχους ψηφιακά δημιουργημένους ελεγκτές τους (Ελεγκτής βασισμένος στη MoveIt! βιβλιοθήκη του ROS Noetic για τον ρομποτικό βραχίονα, ψηφιακό PLC για τα υπόλοιπα μηχανήματα.) Στόχος του σεναρίου είναι ο έλεγχος ορθής λειτουργίας του Ψηφιακού Διδύμου για την παρακολούθηση της παραγωγής και των παραμέτρων αυτής σε πραγματικό χρόνο. Αντίστοιχα, τα μέσα επαλήθευσης περιλαμβάνουν:

- Οι τιμές παρακολούθησης του πραγματικού περιβάλλοντος πρέπει να συλλέγονται, να αποθηκεύονται και να παρουσιάζονται.
- Το ψηφιακό αντίγραφο στον τρισδιάστατο χώρο πρέπει να εκτελεί ακριβώς την ίδια διαδικασία με τη πραγματική γραμμή παραγωγής.

#### Σ2: Εκτέλεση εναλλακτικής διαδικασίας παραγωγής

Το δεύτερο σενάριο εστιάζει στην αξιολόγηση της προσαρμοστικότητας του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) κατά την προσθήκη νέας παραγωγικής μονάδας σε υπάρχουσα βιομηχανική διάταξη. Συγκεκριμένα, προσομοιώνει την ενσωμάτωση μιας επιπλέον μηχανής διάτρησης με μεταφορική ταινία σε ένα σύστημα που ήδη περιλαμβάνει ρομποτικό βραχίονα, αυτοματοποιημένη αποθήκη και δύο σταθμούς κατεργασίας, ελεγχόμενα από κεντρικό σύστημα PLC. Στόχος είναι να επαληθευτεί η ικανότητα του Digital Twin να προσαρμοστεί δυναμικά στις αλλαγές του πραγματικού περιβάλλοντος, να διατηρήσει τη λειτουργική συνέχεια της παραγωγής και να προβλέψει τις νέες ροές εργασίας και χρόνους επεξεργασίας, διασφαλίζοντας την ομαλή ενσωμάτωση της νέας μονάδας στο υπάρχον παραγωγικό σύστημα. Στόχος του σεναρίου είναι ο έλεγχος ορθής προσαρμογής Ψηφιακού Διδύμου στην αλλαγή του πραγματικού περιβάλλοντος. Αντίστοιχα, τα μέσα επαλήθευσης περιλαμβάνουν:

- Δημιουργία και επικύρωση του AutomationML μοντέλου για τη νέα γραμμή παραγωγής.
- Επιτυχής δημιουργία ψηφιακού αντιγράφου στον εικονικό τρισδιάστατο κόσμο.
- Επιτυχής επαναπαραμετροποίησης της πλατφόρμας του ΨΔ.
- Επιτυχής εκτέλεση και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της διαδικασίας.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### *Σ3: Αναστολή λειτουργίας μηχανής και ανάγκη προσαρμογής της παραγωγικής διαδικασίας*

Το σενάριο προσομοιώνει την αντιμετώπιση βλάβης σε μία μηχανή διάτρησης του βιομηχανικού συστήματος, με τη χρήση του Ψηφιακού Διδύμου για την προσαρμογή της παραγωγής. Μετά την εξομοίωση της αστοχίας, το Digital Twin αναλαμβάνει τον επανασχεδιασμό της παραγωγικής ροής: αναδιανέμει τις εργασίες, επαναπροσδιορίζει τις διαδρομές μεταφοράς και επαναπρογραμματίζει τους σταθμούς κατεργασίας, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων και τη διατήρηση της συνέχειας της παραγωγής. Η διαδικασία αυτή αποδεικνύει την αξία του Digital Twin στην ταχεία και αποτελεσματική διαχείριση έκτακτων καταστάσεων και την προσαρμογή της παραγωγικής διαδικασίας σε νέες συνθήκες λειτουργίας. Στόχος του σεναρίου είναι ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας της δημιουργίας σεναρίων παραγωγής, της προσομοίωσής τους της επικαιροποίηση τους στο ΨΔ και στη συνέχεια εκτέλεση τους στο πραγματικό περιβάλλον. Αντίστοιχα, τα μέσα επαλήθευσης περιλαμβάνουν:

- Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας με κριτήριο της απώλεια βιομηχανικού εξοπλισμού.
- Επιτυχής προσομοίωση διαδικασιών παραγωγής στο ΨΔ.
- Επιτυχής προσαρμογή της διαδικασίας στο πραγματικό περιβάλλον παραγωγής.

#### *Σ4: Αλλαγή στην γεωγραφική τοποθέτηση των βιομηχανικών συστημάτων*

Το σενάριο προσομοιώνει την αντιμετώπιση βλάβης σε μία μηχανή διάτρησης του βιομηχανικού συστήματος, με τη χρήση του Ψηφιακού Διδύμου για την προσαρμογή της παραγωγής. Μετά την εξομοίωση της αστοχίας, το Digital Twin αναλαμβάνει τον επανασχεδιασμό της παραγωγικής ροής: αναδιανέμει τις εργασίες, επαναπροσδιορίζει τις διαδρομές μεταφοράς και επαναπρογραμματίζει τους σταθμούς κατεργασίας, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων και τη διατήρηση της συνέχειας της παραγωγής. Η διαδικασία αυτή αποδεικνύει την αξία του Digital Twin στην ταχεία και αποτελεσματική διαχείριση έκτακτων καταστάσεων και την προσαρμογή της παραγωγικής διαδικασίας σε νέες συνθήκες λειτουργίας.

Στόχος σεναρίου: Έλεγχος ορθού υπολογισμού και προσομοίωσης της αλλαγής στην τοπολογία του εργοστασίου στο ψηφιακό αντίγραφο και αυτόματο επαναπρογραμματισμό των ελεγκτών σε πραγματικό χρόνο.

#### Μέσα επαλήθευσης

- Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας βάση αλλαγών στην τοπολογία της γραμμής παραγωγής.
- Επιτυχής προσομοίωση της διαδικασίας παραγωγής στο ΨΔ και δημιουργία νέων προγραμμάτων ελέγχου.
- Επιτυχής επαπρογραμματισμός των ελεγκτών του πραγματικού περιβάλλοντος.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο παραδοτέο Π3.1 είχε προβλεφθεί και ένα ακόμα σενάριο για την «Βελτιστοποίηση βάση στόχων όπως παραγωγή με νέα μηχανήματα ή νέες απαιτήσεις στην παραγωγή.» αλλά η ομοιότητα τόσο των στόχων όσο και των μέσων επαλήθευσης είναι παρόμοια με το σενάριο Σ3, οπότε αποφασίστηκε να παραληφθεί.

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

##### *KPI1: Εφαρμογή για μοντελοποίηση τουλάχιστον 2 βιομηχανικών διαδικασιών*

Για την επιβεβαίωση του πρώτου KPI εκτελέστηκαν τα δύο πρώτα σενάρια. Κάθε σενάριο αποτελεί ξεχωριστή βιομηχανική διαδικασία που μοντελοποιήθηκε σε AutomationML (υποδομή γραμμής παραγωγής) και BPMN (διαδικασία παραγωγής). Ταυτόχρονα επαληθεύτηκε η αυτόματη δημιουργία και προσαρμογή του Ψηφιακού Διδύμου. Η εκτέλεση του σεναρίου περιείχε τα εξής:

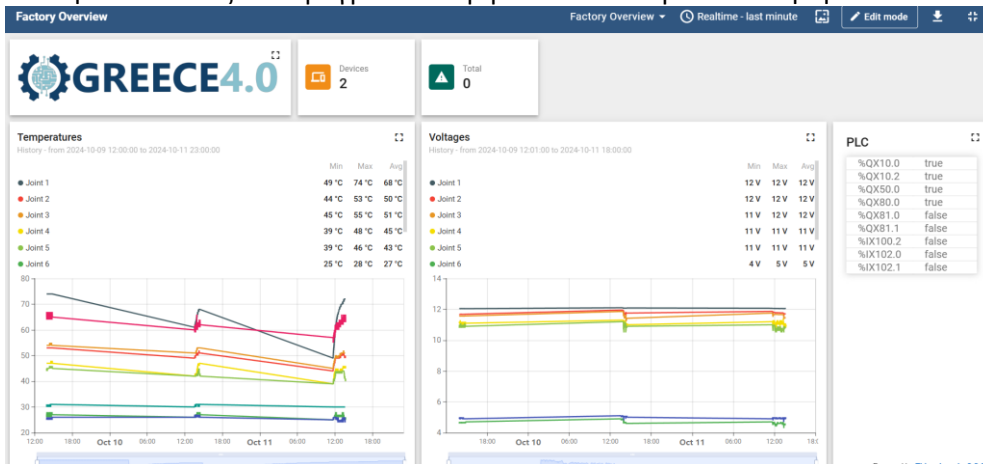
- Διαμόρφωση AML μοντέλου της παραγωγής.
- Εκτέλεση προγράμματος (script) για την εγκατάσταση και παραμετροποίηση του ΨΔ.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 7 Παρακολούθηση εκτέλεσης βιομηχανικής διαδικασίας μέσα από το ΨΔ

- Εκτέλεση διαδικασίας στο πραγματικό περιβάλλον και παρακολούθηση στο ΨΔ.



Εικόνα 8 Αποθήκευση και προβολή τιμών αισθητήρων και ελεγκτών παραγωγής κατά την εκτέλεση της διαδικασίας

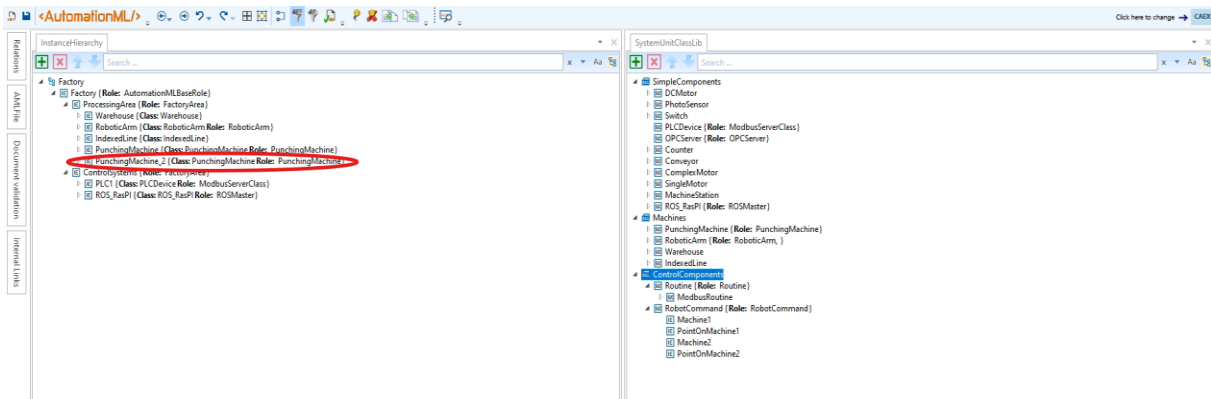
Πίνακας 6 Επικύρωση μέσων επαλήθευσης Σ1

A/A	Μέσα Επαλήθευσης	Αποτέλεσμα
1	Δημιουργία και επικύρωση του AutomationML μοντέλου για τη νέα γραμμή παραγωγής.	Επιτυχές
2	Επιτυχής δημιουργία ψηφιακού αντιγράφου στον εικονικό τρισδιάστατο κόσμο.	Επιτυχές
3	Επιτυχής επαναπαραμετροποίησης της πλατφόρμας του ΨΔ.	Επιτυχές
4	Επιτυχής εκτέλεση και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της διαδικασίας	Επιτυχές

Η εκτέλεση του δεύτερου σεναρίου περιείχε τα εξής:

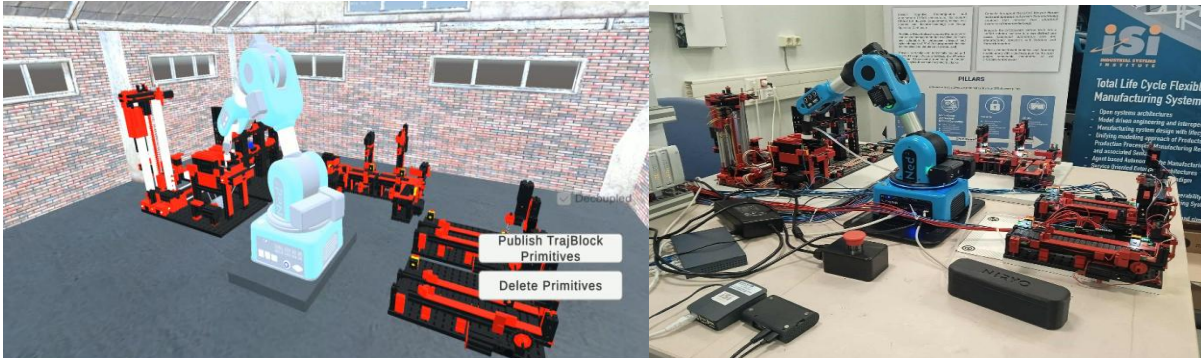
- Διαμόρφωση AML μοντέλου της παραγωγής με την προσθήκη της νέας μηχανής.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 9 Προσαρμογή μοντέλου AML με προσθήκη νέας μηχανής

- Εκτέλεση προγράμματος (script) για την παραμετροποίηση του ΨΔ.



Εικόνα 10 Αναπροσαρμογή ΨΔ στην νέα παραγωγική διάταξη

- Εκτέλεση διαδικασίας στο πραγματικό περιβάλλον και παρακολούθηση στο ΨΔ.

Πίνακας 7 Επικύρωση μέσω επαλήθευσης Σ2

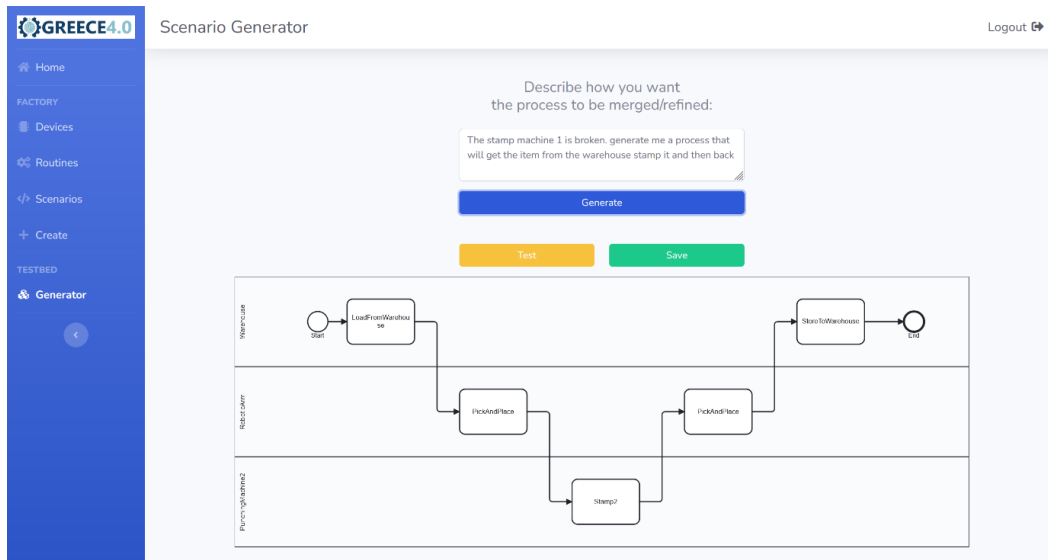
A/A	Μέσα Επαλήθευσης	Αποτέλεσμα
1	Δημιουργία και επικύρωση του AutomationML μοντέλου για τη νέα γραμμή παραγωγής.	Επιτυχές
2	Επιτυχής δημιουργία ψηφιακού αντιγράφου στον εικονικό τρισδιάστατο κόσμο.	Επιτυχές
3	Επιτυχής επαναπαραμετροποίησης της πλατφόρμας του ΨΔ.	Επιτυχές
4	Επιτυχής εκτέλεση και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της διαδικασίας.	Επιτυχές

#### KPI2: Εκτέλεση 3 σεναρίων αναπροσαρμογής της παραγωγικής διαδικασίας

Για την επιβεβαίωση του δεύτερου KPI εκτελέστηκαν τα σενάρια Σ3 και Σ4. Σε κάθε περίπτωση ελέγχεται η δυνατότητα με την χρήση του ΨΔ να αναπροσαρμοστεί η παραγωγική διαδικασία με διαφορετική προσέγγιση. Στο Σ1 γίνεται αναπροσαρμογή της βιομηχανικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας τον ήδη υπάρχον προγραμματισμό των ελεγκτών, ενώ στο Σ1 η αναπροσαρμογή γίνεται στον επαναπρογραμματισμό του ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα. Η εκτέλεση του τρίτου σεναρίου περιείχε τα εξής:

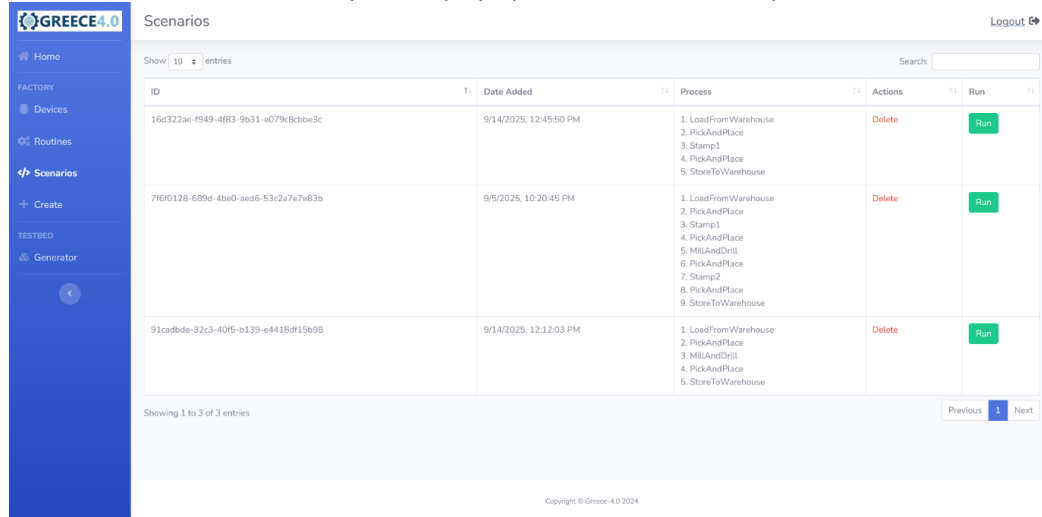
- Χρήση της εφαρμογής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικών διαδικασιών. Η εφαρμογή βασίζεται σε Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα, και ο χρήστης ορίζει τις επιθυμητές αλλαγές σε φυσική γλώσσα.
- Παραγωγή εναλλακτικών σεναρίων της παραγωγικής διαδικασίες σύμφωνα με τις νέες προδιαγραφές (βλάβη μιας μηχανής). Η διαδικασία έχει και ανάδραση με τον χρήστη για την αναπροσαρμογή των παραγόμενων σεναρίων και την κάλυψη των στόχων

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 11 Δημιουργία σεναρίων παραγωγικής διαδικασίας με χρήση φυσικής γλώσσας

- Εκτέλεση εναλλακτικού σεναρίου παραγωγής στο ΨΔ και επικαιροποίηση του.



Εικόνα 12 Εκτέλεση παραγόμενων σεναρίων στο ΨΔ

- Προσαρμογή συντονιστή εκτέλεσης βιομηχανικών διαδικασιών στο πραγματικό περιβάλλον με το νέο σενάριο.
- Εκτέλεση της νέας βιομηχανικής διαδικασίας

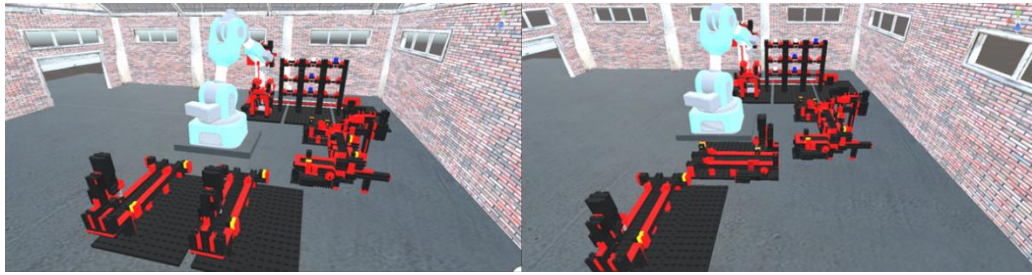
Πίνακας 8 Επικύρωση μέσωσν επαλήθευσης Σ3

A/A	Μέσα Επαλήθευσης	Αποτέλεσμα
1	Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας με κριτήριο της απώλεια βιομηχανικού εξοπλισμού.	Επιτυχές
2	Επιτυχής προσομοίωση διαδικασιών παραγωγής στο ΨΔ.	Επιτυχές
3	Επιτυχής προσαρμογή της διαδικασίας στο πραγματικό περιβάλλον παραγωγής.	Επιτυχές
4	Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας με κριτήριο της απώλεια βιομηχανικού εξοπλισμού.	Επιτυχές

Η εκτέλεση του τέταρτου σεναρίου περιείχε τα εξής:

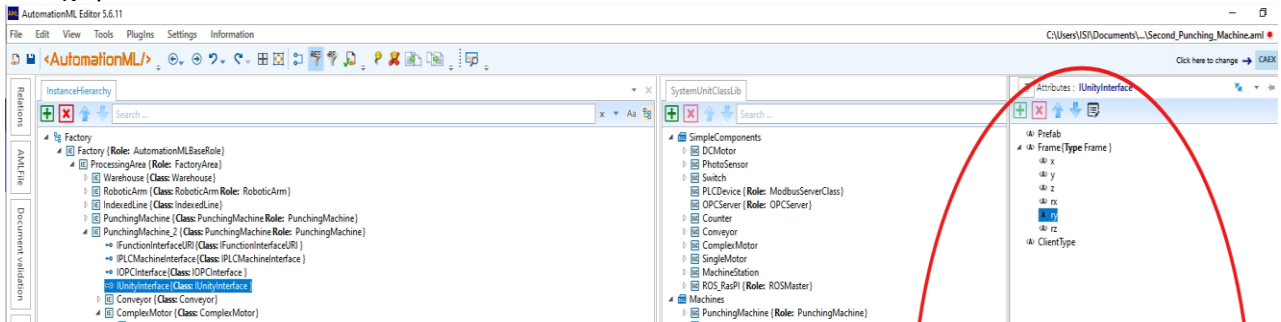
- Αλλαγή στον 3D ψηφιακό περιβάλλον της νέας διάταξης

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



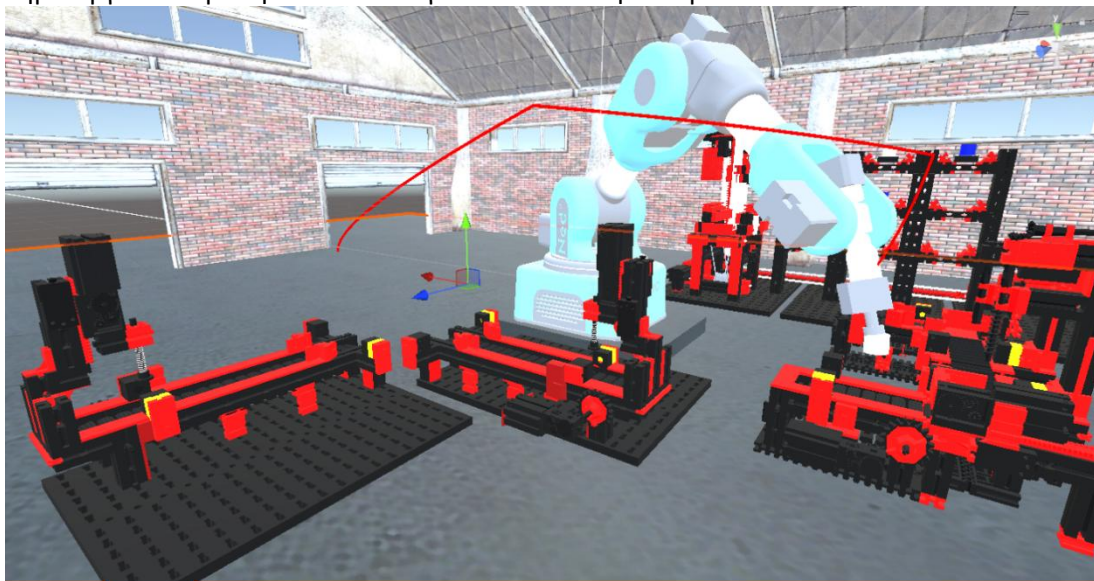
Εικόνα 13 Προσαρμογή ΨΔ στην νέα χωροταξική διάταξη

- Διαμόρφωση AML μοντέλου της παραγωγής με την αλλαγή στην τοποθέτηση των μηχανών στον χώρο.



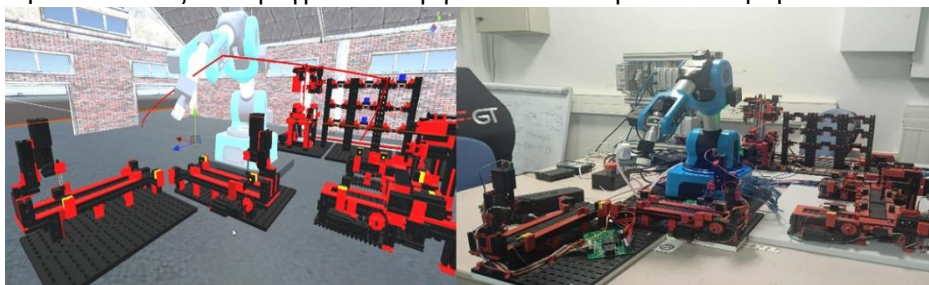
Εικόνα 14 Διαμόρφωση AML μοντέλου στην νέα χωροταξική διάταξη

- Υπολογισμός νέας τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα ώστε να μην συγκρουστεί με εμπόδια που δημιουργούνται με την νέα τοπολογία και εκτέλεση σεναρίου στο ΨΔ.



Εικόνα 15 Υπολογισμός νέας τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα στο ΨΔ

- Εκτέλεση διαδικασίας στο πραγματικό περιβάλλον και παρακολούθηση στο ΨΔ.



Εικόνα 16 Επαναπρογραμματισμός ελεγκτή ρομποτικού βραχίονα

A/A	Μέσα Επαλήθευσης	Αποτέλεσμα
1	Επιτυχής δημιουργία σεναρίων βιομηχανικής διαδικασίας βάση αλλαγών στην τοπολογία της γραμμής παραγωγής.	Επιτυχές
2	Επιτυχής προσομοίωση της διαδικασίας παραγωγής στο ΨΔ και δημιουργία νέων προγραμμάτων ελέγχου.	Επιτυχές
3	Επιτυχής επαπρογραμματισμός των ελεγκτών του πραγματικού περιβάλλοντος.	Επιτυχές

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η επαλήθευση του συστήματος Ψηφιακού Διδύμου (ΨΔ) μέσω των καθορισμένων σεναρίων χρήσης, οδήγησε σε πλήρη επιτυχία όσον αφορά τους δύο βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs). Συγκεκριμένα, το ΨΔ επιτέλεσε επιτυχώς τη μοντελοποίηση και προσομοίωση τουλάχιστον 2 βιομηχανικών διαδικασιών (KPI1), με αυτόματη προσαρμογή στη γραμμή παραγωγής. Αυτό επιβεβαιώθηκε στα πρώτα σενάρια, όπου επιτεύχθηκε ο πλήρης συγχρονισμός ψηφιακού και φυσικού κόσμου, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής προσαρμογής σε αλλαγές όπως η προσθήκη νέας παραγωγικής μονάδας, διατηρώντας παράλληλα τη λειτουργική συνέχεια της παραγωγής. Επιπλέον, ολοκληρώθηκαν επιτυχώς 2 διαφορετικά σενάρια αναπροσαρμογής παραγωγικής διαδικασίας (KPI2) - αντί για 3 μιας και οι στόχοι 2 σεναρίων συγκεντρώθηκαν σε ένα - αποδεικνύοντας την ικανότητα του ΨΔ να διαχειρίζεται αποτελεσματικά έκτακτες καταστάσεις και γεωγραφικές αλλαγές στην παραγωγική τοπολογία. Κάθε σενάριο, από τη διαχείριση βλάβης σε μηχανές μέχρι την αναδιάταξη συστημάτων, επέδειξε την ακρίβεια και την ταχύτητα ανταπόκρισης του συστήματος, με αυτόματο επανασχεδιασμό και επαναπρογραμματισμό σε επιθυμητό χρόνο.

Τα αποδεικτικά στοιχεία της επιτυχίας περιλαμβάνουν την ακριβή συλλογή και παρουσίαση δεδομένων πραγματικού χρόνου, την ακριβή αντιστοίχιση ψηφιακών και φυσικών διαδικασιών, καθώς και την επιτυχή προσομοίωση και εκτέλεση των σεναρίων στο παραγωγικό περιβάλλον. Η συνολική εικόνα δείχνει ότι το σύστημα Ψηφιακού Διδύμου πληροί τις απαιτήσεις για αξιόπιστη χρήση στη βιομηχανική παραγωγή, προσφέροντας ευελιξία, προσαρμοστικότητα και ακριβή πρόβλεψη και διαχείριση των παραγωγικών διαδικασιών. Η επιτυχής εκπλήρωση των KPIs σηματοδοτεί την επιτυχή ολοκλήρωση της φάσης επαλήθευσης και την ετοιμότητα του συστήματος για πλήρη εφαρμογή σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Η επίδειξη της λειτουργίας της προτεινόμενης λύσης έγινε και ενώπιον εκπροσώπων και ειδικών από την τοπική βιομηχανία, όπως η GAIA ROBOTICS, η οποία διαθέτει σύγχρονη εγκατάσταση αυτοματοποιημένης υδροπονικής καλλιέργειας και ενδιαφέρεται για την εύκολη αναπροσαρμογή των παραγωγικών της διαδικασιών, και η οινοποιία «Κτήμα Ορφανός» που επιθυμεί την χρήση ψηφιακών διδύμων για την παρακολούθηση της γραμμής επεξεργασίας και εμφιάλωσης οίνου που διαθέτει. Οι παραβρισκόμενοι έδειξαν ενδιαφέρον για την προτεινόμενη λύση και επιβεβαίωσαν πως η ενσωμάτωση και αξιοποίηση ενός τέτοιου συστήματος στις δικές τους διαδικασίες θα οδηγούσε σε αύξηση της ευελιξίας της παραγωγής τους, βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων τους και μείωση του κόστους.

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

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

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

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

Για τον σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν τα ακόλουθα σενάρια ελέγχου:

#### Σενάριο 1 – Έλεγχος πολλαπλών αλγοριθμικών υπηρεσιών (KPI1)

Στο πρώτο σενάριο ελέγχθηκε η δυνατότητα της πλατφόρμας να υποστηρίζει και να εκτελεί περισσότερες από μία αλγοριθμικές υπηρεσίες ανάλυσης ταυτόχρονα. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το PLC (θερμοκρασία, πίεση, τάση, ένταση, θόρυβος, δόνηση, υγρασία) εισήχθησαν στην πλατφόρμα και υποβλήθηκαν σε:

- Υπηρεσία anomaly detection, για τον εντοπισμό απότομων αποκλίσεων
- Υπηρεσία trend analytics, για την ανάλυση της εξέλιξης των μεγεθών σε βάθος χρόνου

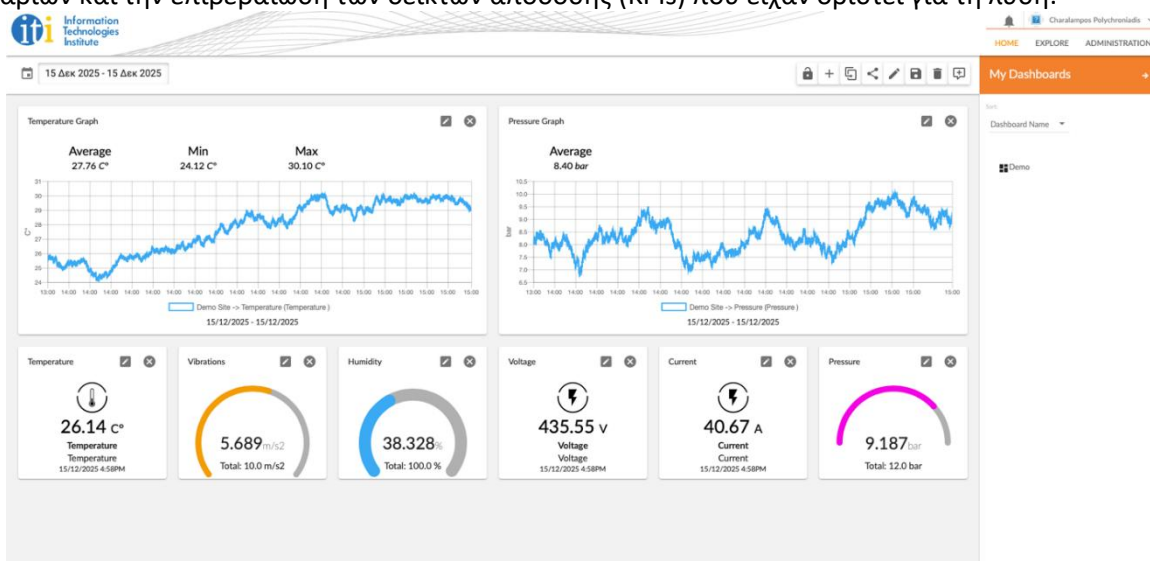
Στόχος του σεναρίου ήταν να επιβεβαιωθεί ότι οι υπηρεσίες αυτές λειτουργούν συνδυαστικά και ανεξάρτητα για διαφορετικά μεγέθη διεργασίας.

#### Σενάριο 2 – Υποστήριξη ταχύτερης λήψης αποφάσεων (KPI2)

Στο δεύτερο σενάριο ελέγχθηκε η συμβολή της πλατφόρμας στη μείωση του χρόνου λήψης αποφάσεων. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν καταστάσεις όπου οι τιμές συγκεκριμένων μεταβλητών οδηγούν σε συνθήκες alarm (π.χ. αυξημένη θερμοκρασία ή δόνηση). Η πλατφόρμα αξιολόγησε τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, συνδυάζοντας πληροφορία από πολλαπλά μεγέθη και παρουσιάζοντας συγκεντρωμένα αποτελέσματα στον χρήστη μέσω της web διεπαφής.

### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Η λειτουργία της πλατφόρμας αξιολογήθηκε με βάση την επιτυχή ολοκλήρωση των παραπάνω σεναρίων και την επιβεβαίωση των δεικτών απόδοσης (KPIs) που είχαν οριστεί για τη λύση.

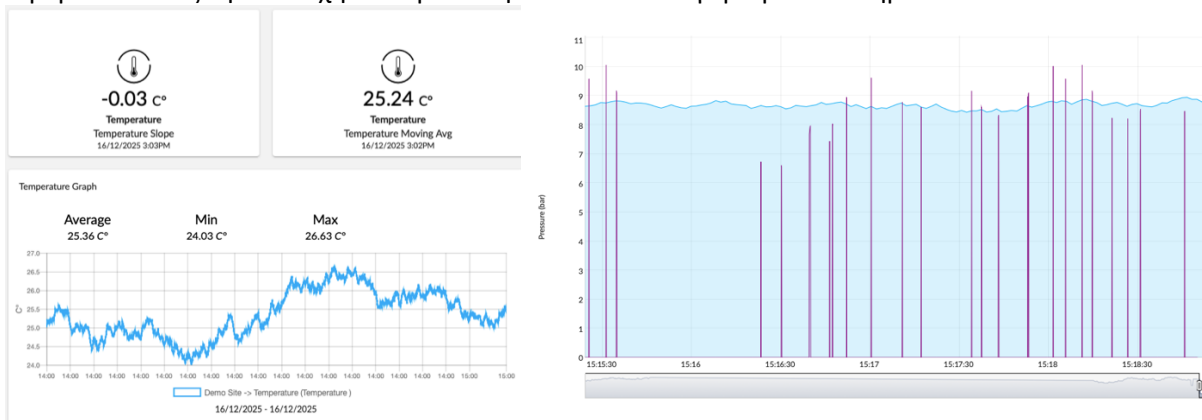


Εικόνα 17 Το Dashboard της πλατφόρμας

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### KPI1 – Ποικιλία ενσωματωμένων αλγοριθμικών υπηρεσιών

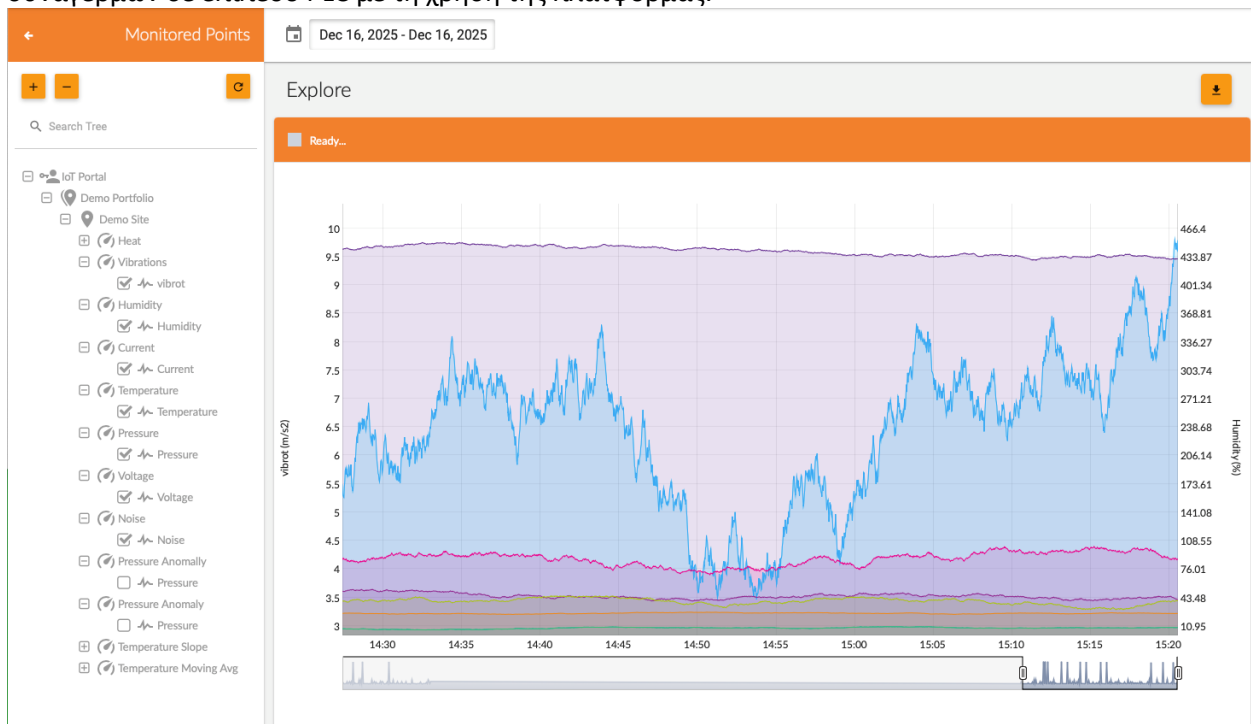
Η επιβεβαίωση του KPI1 πραγματοποιήθηκε μέσω της ταυτόχρονης λειτουργίας των υπηρεσιών anomaly detection και trend analytics πάνω στα δεδομένα που συλλέγονται από τον βιομηχανικό ελεγκτή. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάστηκαν στα dashboards της πλατφόρμας, όπου ήταν δυνατή η παρακολούθηση τόσο των στιγμιαίων τιμών όσο και της εξέλιξής τους στο χρόνο, επιβεβαιώνοντας την επιτυχή ενσωμάτωση πολλαπλών αλγοριθμικών υπηρεσιών.



Εικόνα 18 Trend Analytics και Anomaly Detection

#### KPI2 – Μείωση χρόνου λήψης αποφάσεων

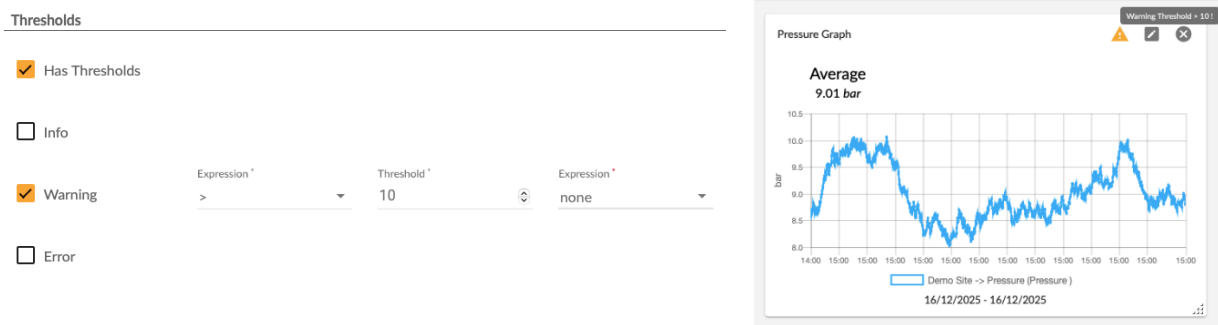
Η επιβεβαίωση του KPI2 βασίστηκε στη σύγκριση της παραδοσιακής διαδικασίας αξιολόγησης συναγερμών σε επίπεδο PLC με τη χρήση της πλατφόρμας.



Εικόνα 19 Συνολική παρακολούθηση δεδομένων

Μέσω της κεντρικής ανάλυσης και οπτικοποίησης των δεδομένων, ο χρήστης αποκτά άμεσα ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του συστήματος (ιστορικό τιμών, τάσεις, ανωμαλίες), χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης διερεύνησης ή φυσικής παρουσίας στον χώρο του PLC. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση του χρόνου που απαιτείται για την κατανόηση και αξιολόγηση κρίσιμων καταστάσεων.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 20 Δημιουργία και απεικόνιση συναγερμών

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της δοκιμής καταδεικνύουν ότι η πλατφόρμα IIoT λειτουργεί αξιόπιστα και ανταποκρίνεται στους στόχους που τέθηκαν για την πιλοτική φάση. Η συλλογή δεδομένων μέσω OPC UA από τον βιομηχανικό ελεγκτή, η ασφαλής μεταφορά τους στην πλατφόρμα και η επεξεργασία τους από τις ενσωματωμένες υπηρεσίες ανάλυσης πραγματοποιήθηκαν χωρίς προβλήματα, επιτρέποντας την απρόσκοπτη και συνεχή παρακολούθηση των βιομηχανικών μεγεθών.

Η επιτυχής εκτέλεση των σεναρίων ελέγχου επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία της συνολικής αλυσίδας δεδομένων, από το επίπεδο του εξοπλισμού πεδίου έως το επίπεδο της κεντρικής ανάλυσης και οπτικοποίησης. Ιδιαίτερα, η συνδυαστική χρήση υπηρεσιών anomaly detection και trend analytics επέτρεψε την έγκαιρη αναγνώριση τόσο στιγμιαίων ανωμαλιών όσο και σταδιακών μεταβολών στις τιμές των μετρήσεων, ενισχύοντας την επιχειρησιακή αξία της πλατφόρμας.

Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω των dashboards, όπως αποτυπώνεται στα αντίστοιχα στιγμιότυπα οθόνης, παρέχει σαφή, κατανοητή και συγκεντρωμένη πληροφόρηση προς τον χρήστη. Μέσω της κεντρικής απεικόνισης ιστορικών δεδομένων, τάσεων και συμβάντων, ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει άμεσα συνολική εικόνα της κατάστασης του συστήματος, χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης επεξεργασίας δεδομένων ή φυσικής παρουσίας στον χώρο εγκατάστασης του εξοπλισμού.

Συνολικά, η πιλοτική αξιολόγηση καταδεικνύει ότι η λύση μπορεί να λειτουργήσει ως αξιόπιστο εργαλείο ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων IIoT, υποστηρίζοντας τη μείωση του χρόνου λήψης αποφάσεων και την αποτελεσματικότερη εποπτεία βιομηχανικών διεργασιών. Τα αποτελέσματα της παρούσας φάσης θέτουν ισχυρές βάσεις για μελλοντική επέκταση της πλατφόρμας σε πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα, με δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπλέον πηγών δεδομένων και προηγμένων υπηρεσιών ανάλυσης.

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

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

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

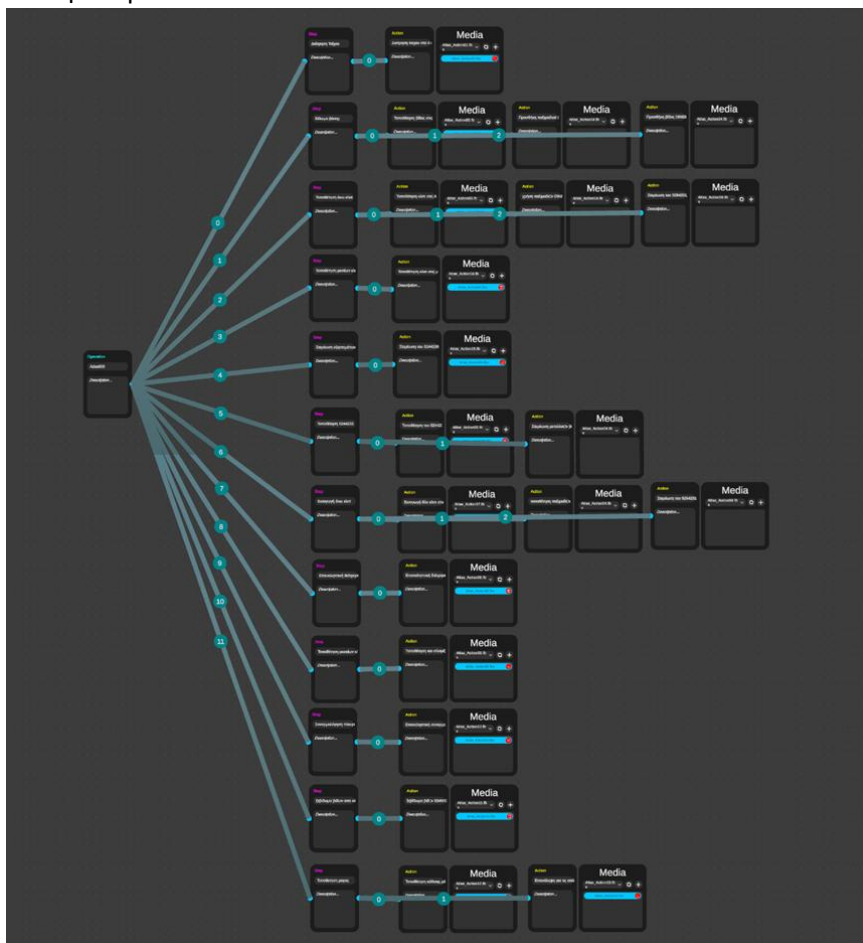
Για τη δοκιμή της τεχνολογικής λύσης πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένο σενάριο ελέγχου σε εργαστηριακό περιβάλλον, με στόχο την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων (XR-Creator, XR-Viewer, IIoT βάση δεδομένων) και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της λύσης σε πραγματικές συνθήκες εκπαίδευσης.

Το σενάριο αφορούσε τη διαδικασία συναρμολόγησης ανελκυστήρα σε άδειο φρεάτιο, όπως έχει καθοριστεί σε συνεργασία με ειδικούς από τη βιομηχανία. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις σύμφωνα με το παραδοτέο 3.1.

### Φάση 1 – Έλεγχος της εφαρμογής XR-Creator

Ένα σύνολο χρηστών κλήθηκε να δημιουργήσει το εκπαιδευτικό σενάριο χρησιμοποιώντας το XR-Creator. Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας καταγράφηκαν: α) Ο χρόνος ολοκλήρωσης, β) Η ευκολία χρήσης του περιβάλλοντος δημιουργίας και γ) Η εγκυρότητα του παραγόμενου αρχείου JSON.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλοι οι χρήστες ολοκλήρωσαν επιτυχώς το σενάριο, χωρίς να παραχθούν εσφαλμένα JSON αρχεία και χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες στην πλοήγηση. Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης ήταν περίπου 10 λεπτά, επιβεβαιώνοντας την ευχρηστία του εργαλείου και τη σταθερότητα της διαδικασίας εισαγωγής οπτικοακουστικού υλικού και 3D μοντέλων. Το παραγόμενο σενάριο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 21 Περιγραφή σεναρίου με χρήση Nodes στην εφαρμογή XR-Creator

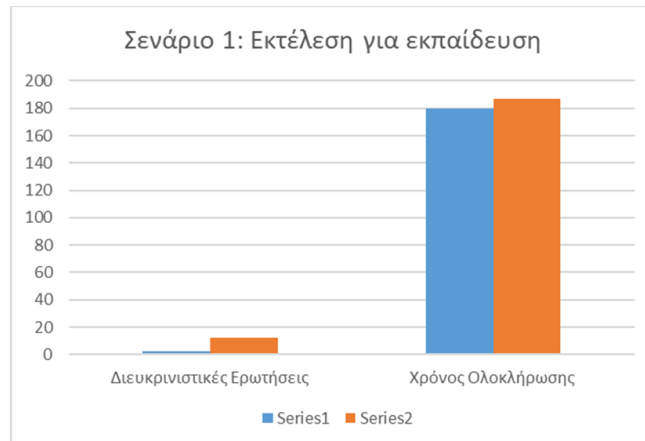
### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### Φάση 2 – Έλεγχος της διαδικασίας εκπαίδευσης μέσω XR-Viewer

Το ίδιο σενάριο χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση δύο μεθόδων εκπαίδευσης:

1. Παραδοσιακή εκπαίδευση μέσω εγχειριδίων
2. Εκπαίδευση μέσω XR-Viewer με επαυξημένη πραγματικότητα, χρησιμοποιώντας συσκευή Meta Quest 3, όπου ο χρήστης μπορούσε να δει τα βήματα, τα μοντέλα και το οπτικοακουστικό υλικό μέσω passthrough AR

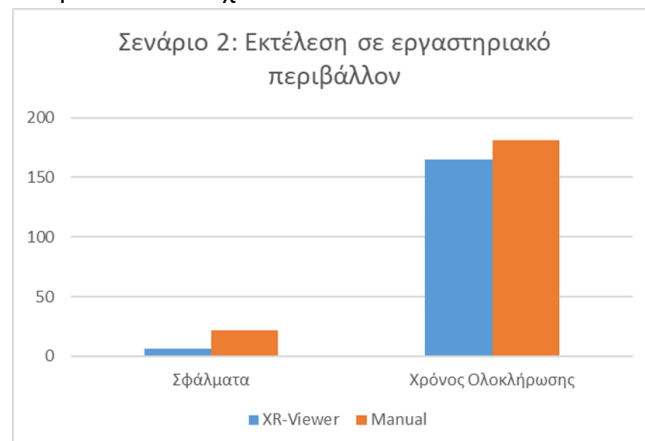
Στο πρώτο στάδιο της Φάσης 2 καταγράφηκε ο χρόνος εκπαίδευσης και το πλήθος ερωτήσεων προς ειδικούς. Οι δύο ομάδες εμφάνισαν παρόμοιο χρόνο, ωστόσο η ομάδα XR είχε σημαντικά μειωμένες διευκρινιστικές ερωτήσεις, λόγω της παρουσίας τρισδιάστατων μοντέλων και βελτιωμένης οπτικής πληροφόρησης.



Εικόνα 22 Διάγραμμα σύγκρισης χρηστών κατά την διαδικασία εκπαίδευσης

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η εκτέλεση της διαδικασίας συναρμολόγησης. Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης καταγράφηκαν ο χρόνος ολοκλήρωσης και τα σφάλματα.

Τα ευρήματα έδειξαν ότι η ομάδα που είχε εκπαιδευτεί μέσω XR-Viewer ολοκλήρωσε τη διαδικασία γρηγορότερα και με σαφώς λιγότερα λάθη, γεγονός που υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της λύσης στην κατανόηση και εκτέλεση σύνθετων τεχνικών διαδικασιών.



Εικόνα 23 Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Η επιβεβαίωση των δεικτών KPIs βασίστηκε στις απαιτήσεις που έχουν οριστεί στο Π1.1 και στην τελική αρχιτεκτονική του Π2.2. Οι κύριοι δείκτες που εξετάστηκαν ήταν:

#### KPI1 – Μείωση λαθών κατά την εκτέλεση της διαδικασίας

Η ομάδα XR-Viewer παρουσίασε αισθητά μειωμένα λάθη κατά την εκτέλεση του πρακτικού σεναρίου, επιβεβαιώνοντας την ενισχυμένη κατανόηση μέσω χωρικού και οπτικοποιημένου περιεχομένου.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### *KPI2 – Μείωση χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας*

Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης για την ομάδα XR ήταν μικρότερος, καταδεικνύοντας ότι η επαυξημένη πραγματικότητα επιταχύνει την εκμάθηση και την εφαρμογή διαδικασιών.

#### *KPI3 – Μείωση αναγκών καθοδήγησης από ειδικούς*

Οι χρήστες XR υπέβαλαν αισθητά λιγότερες ερωτήσεις στους ειδικούς κατά τη φάση εκπαίδευσης, κάτι που ενισχύει την αποτελεσματικότητα του XR-Viewer ως αυτοτελούς εκπαιδευτικού εργαλείου. Επιπλέον, οι ειδικοί μπορούν πλέον να καταγράψουν τις οδηγίες που θέλουν να δώσουν στους εκπαιδευόμενους με πιο εύχρηστα μέσα όπως τρισδιάστατα μοντέλα, ήχους και βίντεο, ενώ παράλληλα επιτρέπεται και η χρήση παραδοσιακών εγχειριδίων εκπαίδευσης.

#### *KPI4 – Ορθή λειτουργία συστημάτων XR-Creator / XR-Viewer / IIoT*

Επαληθεύτηκε πλήρως η επικοινωνία μεταξύ Creator–Server–Viewer, η ομαλή φόρτωση πολυμέσων (βίντεο, εικόνες, PDF, 3D μοντέλα) και η σωστή αναπαραγωγή των σεναρίων στη συσκευή Quest 3, συμπεριλαμβανομένου του hand tracking και του passthrough AR. Μέσω των δοκιμαστικών σεναρίων έγιναν πολλαπλές μικροδιορθώσεις που αρχικά επέφεραν προβλήματα καθώς και διορθώσεις σε κάποια σφάλματα στον κώδικα.

#### *Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων*

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης καταδεικνύουν ότι:

- Η λύση λειτουργεί πλήρως και σταθερά σε πραγματικές συνθήκες.
- Οι εφαρμογές XR-Creator και XR-Viewer έχουν επιτύχει λειτουργική ωριμότητα και ολοκληρωμένη διασύνδεση με τη βάση IIoT.
- Το εκπαιδευτικό σενάριο εκτελέστηκε επιτυχώς χωρίς αστοχίες λογισμικού ή ασυνέπειες στη ροή δεδομένων.
- Οι χρήστες που εκπαιδεύτηκαν μέσω AR εμφάνισαν σημαντικά βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο με χρήση απλών εγχειριδίων χρήσης και εγκατάστασης.
- Τα KPIs επιβεβαιώθηκαν σε όλα τα επίπεδα, αποδεικνύοντας ότι η λύση ενισχύει ουσιαστικά την ποιότητα, την ταχύτητα και την ακρίβεια της βιομηχανικής εκπαίδευσης.

Η συνολική αξιολόγηση αποδεικνύει ότι η Λύση 7 είναι έτοιμη για περαιτέρω πιλοτική ενσωμάτωση σε πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα, συμβάλλοντας στη βελτίωση δεξιοτήτων, στην ασφάλεια των εργαζομένων και στην αποτελεσματική μεταφορά τεχνικής γνώσης.

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

Η εργαλειοθήκη έχει αναπτυχθεί και τεκμηριωθεί στα προηγούμενα παραδοτέα του έργου, και ειδικότερα στα Π2.2 και Π3.1, όπου παρουσιάζονται η αρχιτεκτονική της λύσης, τα επιμέρους εργαλεία καθώς και τα αποτελέσματα της εργαστηριακής επαλήθευσης μέσω συγκριτικών προσομοιώσεων με περιβάλλον Matlab/Simulink.

Στο Π3.1 δόθηκε έμφαση στην εργαστηριακή επικύρωση της λύσης, μέσω αναλυτικής μοντελοποίησης γραμμής παραγωγής και σύγκρισης των αποτελεσμάτων της εργαλειοθήκης με ένα υπάρχον μοντέλο αναφοράς. Το Π3.2 αποτελεί το επόμενο βήμα ωρίμανσης, καθώς μεταφέρει την τεχνική λύση από το ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον σε ρεαλιστικό βιομηχανικό πλαίσιο (σε επίπεδο ελέγχου λειτουργίας μηχανών), σε κοινή εφαρμογή/ανάλυση με την επόμενη τεχνολογική λύση (τεχνολογική λύση 9, η οποία εστιάζει στην μοντελοποίηση διαδικασιών/διεργασιών): μια εταιρεία παραγωγής χυμού πορτοκαλιού που δραστηριοποιείται στην Ελλάδα. Στόχος είναι να ελεγχθεί κατά πόσο τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν μπορούν να αναπαραστήσουν με πιστό και χρήσιμο τρόπο την πραγματική διεργασία, να υποστηρίξουν την ανάλυση σεναρίων λειτουργίας και να παράγουν αξιόπιστους δείκτες απόδοσης (KPIs) που να έχουν νόημα για τη βιομηχανία.

Ειδικότερα, η πιλοτική εφαρμογή επικεντρώνεται σε σύστημα παραγωγής χυμού πορτοκαλιού, η οποία περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια επεξεργασίας (πλύση, αποχύμωση, φυγοκέντρηση) και παράγει τόσο τελικό προϊόν (κύρια ποσότητα παρακολούθησης) όσο και υποπροϊόντα και ροές αποβλήτων (δεν μελετώνται στην παρούσα εφαρμογή). Η εργαλειοθήκη αξιοποιείται για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση του συστήματος παραγωγής (εξοπλισμός, τρόπος διασύνδεσης και ελέγχου), τον ορισμό και εκτέλεση σεναρίων (ονομαστική λειτουργία, αυξημένος φόρτος, διαταραχές) και την ποσοτική αξιολόγηση των επιδόσεων ως προς ευελιξία και ανθεκτικότητα. Οι βασικοί στόχοι του παρόντος παραδοτέου είναι:

1. η εφαρμογή και δοκιμή της λύσης σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον,
2. η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας και των KPIs υπό ρεαλιστικές συνθήκες,
3. η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τόσο τεχνικά (ισορροπίες ροής προϊόντων) όσο και επιχειρησιακά (χρησιμότητα για τον προγραμματισμό και τη λήψη αποφάσεων) και
4. ο εντοπισμός ισχυρών σημείων και περιορισμών της λύσης, τα οποία τροφοδοτούν τον μελλοντικό οδικό χάρτη βελτίωσης και αξιοποίησής της.

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Για την επιστημονική και τεχνολογική αξιολόγηση της εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής, τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν στα Παραδοτέα 2.2 και 3.1 εφαρμόστηκαν σε επιλεγμένη εταιρεία παραγωγής χυμού πορτοκαλιού στην Ελλάδα. Στο πλαίσιο της παρούσας πιλοτικής εφαρμογής το ενδιαφέρον εστιάζει αποκλειστικά στον χυμό πορτοκαλιού ως βασικό τελικό προϊόν, ενώ τα παραπροϊόντα και ρεύματα αποβλήτων (έλαιο, CPWW, λύματα) δεν μοντελοποιούνται ρητά, αλλά ενσωματώνονται έμμεσα μέσω των συνολικών ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Το δίκτυο παραγωγής που εξετάζεται αποτελείται από τρεις διαδοχικές διεργασίες:

1. Πλύση πορτοκαλιών (Orange washing)
2. Αποχύμωση (Extraction)
3. Φυγοκέντρηση (Centrifuge)

και μοντελοποιείται ως σειριακή γραμμή παραγωγής (production line) με τρεις σταθμούς επεξεργασίας (αναφέρονται στο εξής ως «μηχανές») και ενδιάμεσες ποσότητες προς επεξεργασία, με τελικό ελεγχόμενο μέγεθος τον παραγόμενο χυμό πορτοκαλιού. Οι βασικές εισροές του μοντέλου είναι η ποσότητα πορτοκαλιών και νερού, ενώ οι βασικές εκροές που παρακολουθούνται είναι ο όγκος παραγόμενου χυμού (lt) και η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) ανά παρτίδα ή ανά μονάδα προϊόντος.

Για τον έλεγχο και την αξιολόγηση της λύσης ορίστηκαν τα ακόλουθα σενάρια, τα οποία συνδυάζουν τις έννοιες της ευελιξίας/ανθεκτικότητας (KPIs Λύσης 8) με πρόσθετους δείκτες ενεργειακής απόδοσης:

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

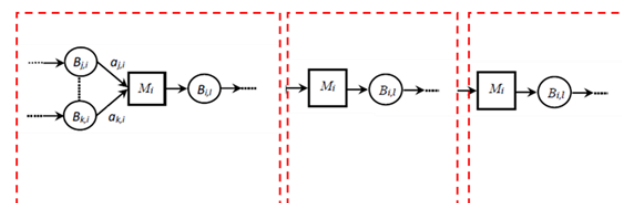
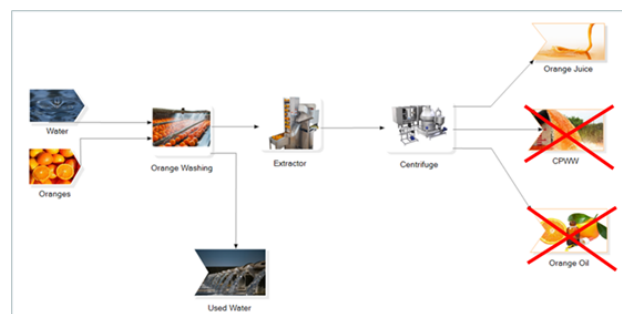
#### Σενάριο Α – Βασική παρτίδα αναφοράς

- Περιγραφή: Προσομοίωση μιας τυπικής παρτίδας παραγωγής με 500 kg πορτοκάλια και 50 lt νερό. Οι τρεις διεργασίες (πλύση, αποχύμωση/συμπύεση, φυγοκέντρηση) λειτουργούν με τις ονομαστικές τους παραμέτρους (ρυθμός επεξεργασίας, χρόνους κύκλου, ενέργεια ανά στάδιο).
- Σκοπός:
  - Επιβεβαίωση της ορθής αναπαράστασης της γραμμής παραγωγής χυμού στο εργαλείο.
  - Έλεγχος ότι οι ποσότητες τελικού χυμού και η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά παρτίδα βρίσκονται εντός των αναμενόμενων ορίων, όπως αυτά προκύπτουν από τα πραγματικά δεδομένα της βιομηχανίας.
- Ενδεικτικοί δείκτες:
  - Παραγόμενος χυμός (lt ανά 500 kg πορτοκαλιών).
  - Συνολική κατανάλωση ενέργειας (kWh ανά παρτίδα / kWh ανά lt χυμού).
  - Χρόνος διέλευσης παρτίδας από την είσοδο έως την έξοδο της γραμμής.

#### Σενάριο Β – Αυξημένος φόρτος και έλεγχος παραγωγικής ικανότητας

- Περιγραφή: Αύξηση της συνολικής ποσότητας πορτοκαλιών ανά χρονική περίοδο (π.χ. διπλασιασμός εισροής ή συμπύκνωση περισσότερων παρτίδων στον ίδιο ορίζοντα), ώστε να προσομοιωθεί περίοδος αιχμής. Οι παράμετροι των διεργασιών (ρυθμοί, χρόνοι κύκλου) παραμένουν ίδιες, ενώ η εργαλειοθήκη χρησιμοποιείται για να μελετηθούν:
  - η εξέλιξη του WIP (Work-In-Progress) ανά στάδιο,
  - η αξιοποίηση των τριών μηχανών,
  - η μεταβολή στον ρυθμό παραγωγής χυμού.
- Σκοπός:
  - Αξιολόγηση της ικανότητας της λύσης να αναδείξει «στενά σημεία» της γραμμής υπό αυξημένο φόρτο.
  - Εκτίμηση της σχέσης μεταξύ αύξησης παραγωγής και αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα προϊόντος.
- Ενδεικτικοί δείκτες:
  - Ρυθμός παραγωγής χυμού (lt/ώρα).
  - Μέση και μέγιστη αξιοποίηση των μηχανών (%).
  - WIP ανά στάδιο (kg/lt σε αναμονή).
  - Ενέργεια ανά lt παραγόμενου χυμού (kWh/lt) σε σύγκριση με το Σενάριο Α.

Η παραπάνω δέσμη σεναρίων καλύπτει τόσο την λειτουργική διάσταση (WIP, παραγωγή, αξιοποίηση, ανθεκτικότητα) όσο και την ενεργειακή απόδοση της γραμμής παραγωγής χυμού, επιτρέποντας μία ολοκληρωμένη αξιολόγηση της εργαλειοθήκης ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων για ευέλικτο και ενεργειακά αποδοτικό προγραμματισμό παραγωγής. Το δίκτυο παραγωγής σε μορφή γραφικής αναπαράστασης διασυνδεδεμένων κόμβων και σχεδιασμού σε «λευκό χαρτί»



Μηχανή έκπλυσης  
(στοιχείο  
συναρμολόγησης)

Μηχανή συμπύεσης  
(στοιχείο γραμμής  
μεταφοράς)

Μηχανή φυγοκέντρησης  
(στοιχείο γραμμής  
μεταφοράς)

Εικόνα 24 Αποτύπωση δικτύου παραγωγής βιομηχανικού σεναρίου εφαρμογής τρέχουσας τεχνολογικής λύσης: (πάνω) γραφική αναπαράσταση κόμβων, (κάτω) σχεδίαση με συνδυασμό βασικών δομικών στοιχείων

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

με την χρήση των 3 βασικών δομικών στοιχείων (γραμμή μεταφοράς, μονάδα συναρμολόγησης κι αποσυναρμολόγησης) περιγράφεται συνοπτικά στην **Error! Reference source not found.**

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

##### Σενάριο A

Ο στόχος είναι να οριστεί ένα βασικό σενάριο αναφοράς για μια τυπική παρτίδα παραγωγής χυμού πορτοκαλιού, ώστε να ελεγχθεί εάν η εργαλειοθήκη αποτυπώνει σωστά τη ροή εργασιών και τους βασικούς δείκτες απόδοσης (παραγόμενος χυμός, ενέργεια, αξιοποίηση).

Η αντιστοίχιση της πραγματικής παρτίδας στο εργαλείο γίνεται με την παραδοχή ότι: **1 job = 1 kg πορτοκάλια**. Έτσι, μια παρτίδα 500 kg πορτοκαλιών αναπαρίσταται ως 500 "jobs" που διατρέχουν τη γραμμή. Στο δομημένο περιβάλλον της εργαλειοθήκης η γραμμή του Σεναρίου A υλοποιείται με τα εξής δομικά διαγράμματα:

- OrderSource (πηγή εντολών / πρώτης ύλης),
- τρία διαδοχικά Workstation blocks που αναπαριστούν τα στάδια πλύσης, αποχύμωσης και φυγοκέντρησης,
- KPISink στο τέλος της γραμμής, για τη συλλογή και ανάλυση δεικτών απόδοσης.

Η σειριακή ροή ορίζεται ως εξής:

- OrderSource.out0 → Washing.in0
- Washing.out0 → Extractor.in0
- Extractor.out0 → Centrifuge.in0
- Centrifuge.out0...out3 → KPISink.in0...in3

Το priority port (in1) των workstation blocks αφήνεται ασύνδετο στο baseline, ώστε η λειτουργία να είναι όσο γίνεται πιο «καθαρή», χωρίς πρόσθετη λογική dispatching ή έλεγχο προτεραιοτήτων. Οι αποθηκευτικοί χώροι (buffers) μεταξύ των σταθμών θεωρούνται πρακτικά απεριόριστοι, με `buffer_capacity = 0` ( $\infty$ ) και `on_overflow = "drop"`, ώστε στο Σενάριο A να μην εμφανίζεται φραγή/αποκλεισμός (blocking) λόγω κορεσμού ενδιάμεσων αποθηκών.

Η παρτίδα 500 kg εισάγεται στο σύστημα με μία άφιξη, χωρίς να χρειάζεται ξεχωριστό πρόγραμμα αφίξεων (schedule). Στο OrderSource επιλέγεται λειτουργία `mode = "expr"` και ορίζεται έκφραση της μορφής: `expr: 500 if t == 0 else 0`. Έτσι, στο χρόνο **t = 0** δημιουργούνται 500 jobs, τα οποία σταδιακά επεξεργάζονται από τα τρία στάδια. Για τους τρεις σταθμούς επεξεργασίας δίνονται ενδεικτικές παράμετροι επεξεργασίας:

- **Washing:** `servers = 1, proc_time = 1`
- **Extractor:** `servers = 1, proc_time = 2`
- **Centrifuge:** `servers = 1, proc_time = 1`

Με αυτές τις τιμές, ο εκχυμωτής/συμπιεστής (Extractor) λειτουργεί ως πιθανό σημείο αποκλεισμού (bottleneck), κάτι που είναι ρεαλιστικό για βασικό σενάριο και επιτρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά της γραμμής παραγωγής σε συνήθεις συνθήκες χωρίς πολύπλοκο έλεγχο.

Ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης (διάρκεια) επιλέγεται επαρκώς μεγάλος, τυπικά της τάξης των 1200–1500 βημάτων (ticks), ώστε να εξασφαλιστεί ότι και τα 500 jobs προλαβαίνουν να διατρέξουν πλήρως τη γραμμή, ακόμη και με φραγή στον Extractor.

Για το Σενάριο A, η συλλογή δεικτών απόδοσης γίνεται μέσω του KPISink, ο οποίος συνδέεται στα τέσσερα outputs του τελευταίου σταδίου (Φυγοκέντρηση):

- out0 → KPISink.in0: πλήθος ολοκληρωμένων jobs (completed),
- out1 → KPISink.in1: WIP ή jobs «εν κινήσει»,
- out2 → KPISink.in2: jobs σε ουρά (queue),
- out3 → KPISink.in3: αξιοποίηση (utilization) του τελευταίου σταδίου.

Στον KPI editor του KPISink ενεργοποιούνται και πρόσθετοι, προσαρμοσμένοι δείκτες (Custom KPIs), ώστε να μεταφραστεί ο αριθμός jobs σε φυσικά μεγέθη σχετιζόμενα με το σενάριο παραγωγής χυμού:

- `juice_L_tick = completed * 0.5`

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- ο μετατροπή από jobs (kg πορτοκαλιών) σε παραγόμενο χυμό (lt), με ενδεικτικό συντελεστή απόδοσης **0,5 lt/kg**,
- energy\_kWh\_tick = completed \* 0.035
  - ο εκτίμηση καταναλισκόμενης ενέργειας ανά job, με ενδεικτική τιμή **0,035 kWh/kg**, που αντιπροσωπεύει τη μέση ενεργειακή δαπάνη της γραμμής ανά κιλό πρώτης ύλης,
- surplus\_cap = 1.0 - util
  - ο εκτίμηση «περιθωρίου δυναμικότητας» (capacity surplus) ως συμπλήρωμα της αξιοποίησης.

Στο tab *Plot* του KPISink επιλέγεται **Accumulate = ON**, ώστε οι παραπάνω δείκτες να εμφανίζονται και σε σωρευτική μορφή (cumulative), δίνοντας:

- cum(completed) → συνολικά ολοκληρωμένα jobs (στόχος ~500),
- cum(juice\_L\_tick) → συνολικά lt χυμού της παρτίδας,
- cum(energy\_kWh\_tick) → συνολική ενέργεια (kWh) που αντιστοιχεί στην επεξεργασία της παρτίδας.

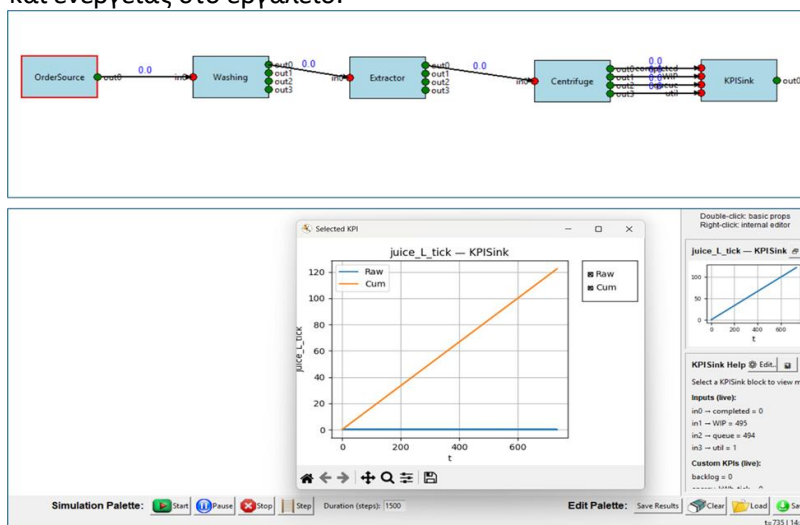
#### Έλεγχοι στο τέλος της προσομοίωσης

Στο τέλος της εκτέλεσης του Σεναρίου A, ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας γίνεται κυρίως μέσα από το KPI dashboard και τις cumulative καμπύλες, με ενδεικτικούς ελέγχους:

- Πληρότητα παρτίδας:
  - cum(completed) ≈ 500 jobs → επιβεβαιώνεται ότι όλη η παρτίδα έχει περάσει από τη γραμμή.
- Απόδοση χυμού:
  - cum(juice\_L\_tick) ≈ 500 \* yield → η συνολική ποσότητα παραγόμενου χυμού συμφωνεί με την αναμενόμενη απόδοση (π.χ. 0,5 lt/kg).
- Ενέργεια ανά παρτίδα / ανά lt:
  - cum(energy\_kWh\_tick) ≈ 500 \* kWh\_per\_kg και υπολογισμός δείκτη kWh/lt → έλεγχος ότι οι τιμές βρίσκονται σε ρεαλιστικά επίπεδα σε σχέση με τα στοιχεία της βιομηχανίας.
- Συμπεριφορά αξιοποίησης:
  - η καμπύλη util δείχνει το πώς «φορτώνεται» χρονικά η γραμμή και αν ο Extractor λειτουργεί πράγματι ως bottleneck στο baseline.

Εφόσον οι παραπάνω έλεγχοι επιβεβαιωθούν, το Σενάριο A θεωρείται ότι ισχύει ως βασικό αναφοράς και μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- ως σημείο σύγκρισης για πιο σύνθετα σενάρια (π.χ. αυξημένος φόρτος, διαταραχές),
- ως τεκμηριωμένο παράδειγμα που δείχνει τη σωστή ροή από φυσική διεργασία → μοντέλο → KPIs χυμού και ενέργειας στο εργαλείο.



Εικόνα 25 (Πάνω) Σχηματική αναπαράσταση δικτύου παραγωγής για το σενάριο A μέσω της εργαλειοθήκης, (Κάτω) Παρακολούθηση δείκτη κατά την διάρκεια προσομοίωσης (735 από 1500 θήματα)

### Σενάριο Β

Ο στόχος είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά της γραμμής παραγωγής χυμού υπό αυξημένο φόρτο και να αξιολογηθεί η παραγωγική ικανότητα του συστήματος, αναδεικνύοντας το θέμα αποκλεισμού (bottleneck) και τη διαφορά ανάμεσα σε δύο πολιτικές διαχείρισης overflow (απώλειες έναντι blocking). Το σενάριο χρησιμοποιείται ως «stress test» σε σχέση με τη βασική συμπεριφορά του Σεναρίου Α.

### Μοντέλο, χρονική βάση και τοπολογία

Η τοπολογία του δικτύου και η διαδοχή των εργασιών παραμένει ίδια με το Σενάριο Α:

- OrderSource → Washing → Extractor → Centrifuge → KPISink

ενώ το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ορίζεται ρητά ως:

- 1tick = 1sec.

Με αυτόν τον ορισμό, οι ρυθμοί παραγωγής μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε lt/ώρα, και οι δείκτες ενέργειας σε kWh ανά lt.

Τα δομικά διαγράμματα παραμένουν τα ίδια (OrderSource, τρία Workstation, KPISink) και οι συνδέσεις ροής και KPI wiring είναι ακριβώς αυτές του Σεναρίου Α, ώστε οποιαδήποτε διαφοροποίηση στα αποτελέσματα να οφείλεται αποκλειστικά:

- στον αυξημένο φόρτο εισόδου και
- στη διαφορετική πολιτική overflow (drop vs block) στον bottleneck σταθμό/μηχανή.

### Παράμετροι σταθμών εργασίας και φόρτος εισόδου

Οι παράμετροι επεξεργασίας των σταθμών (Workstation) διατηρούνται όπως στο Σενάριο Α:

- **Washing:** servers = 1, proc\_time = 1sec
- **Extractor:** servers = 1, proc\_time = 2 sec (bottleneck)
- **Centrifuge:** servers = 1, proc\_time = 1sec

Με αυτή τη ρύθμιση, ο Extractor παραμένει η σαφής στένωση της γραμμής, κάτι που επιτρέπει να αναδειχθούν ουρές και φαινόμενα συμφόρησης όταν αυξηθεί ο φόρτος. Ο φόρτος εισόδου δεν είναι πλέον μία ενιαία παρτίδα, αλλά τρεις διαδοχικές “mini-batches” μέσα σε ένα 10λεπτο (600sec). Στο OrderSource χρησιμοποιείται έκφραση της μορφής (ενδεικτικά):

- `expr = 150 if (t in {0, 200, 400}) else 0`

με αποτέλεσμα:

- τρεις αφίξεις 150 jobs (kg πορτοκαλιών) στα  $t = 0$ ,  $t = 200\text{sec}$  και  $t = 400\text{sec}$ ,
- συνολικά 450 jobs σε σχετικά μικρό χρονικό παράθυρο.

Η διάρκεια της προσομοίωσης ορίζεται σε 600sec (ή λίγο παραπάνω, π.χ. 700sec για «καθάρισμα» της ουράς), ώστε να ολοκληρωθούν οι βασικές δυναμικές της γραμμής υπό αυξημένο φόρτο.

### Πολιτικές overflow στο bottleneck: drop vs block

Η ουσιαστική διαφοροποίηση του Σεναρίου Β είναι η μελέτη δύο εναλλακτικών πολιτικών όταν γεμίζει η ουρά (buffer) μπροστά από τον bottleneck σταθμό (Extractor):

- Πολιτική B-drop (overflow = απώλειες)
- Στο Workstation που αντιστοιχεί στον Extractor ορίζεται:
- `buffer_capacity = 10`
- `on_overflow = "drop"`
- Όταν ο buffer φτάσει τα 10 jobs, οποιαδήποτε επιπλέον άφιξη απορρίπτεται (χαμένο υλικό).
- Αναμενόμενα αποτελέσματα:
- μειωμένος συνολικός αριθμός ολοκληρωμένων jobs,
- πιθανή «αραίωση» φόρτου downstream,
- χαρακτηριστικά ίχνη starvation/υποτροφοδότησης προς τα επόμενα στάδια.
- Πολιτική B-block (overflow = backpressure)
- Στο ίδιο Workstation διατηρείται `buffer_capacity = 10`, αλλά αλλάζει η πολιτική σε:
- `on_overflow = "block"`

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- Όταν ο buffer γεμίσει, ο upstream σταθμός παύει προσωρινά να «σπρώχνει» jobs, μέχρι να αδειάσει χώρος στον buffer.
- Δεν χάνεται υλικό, αλλά εμφανίζεται blocking προς τα πάνω (π.χ. ο Washing περιμένει μέχρι να μπορέσει να παραδώσει στον Extractor).
- Αναμενόμενα αποτελέσματα:
- υψηλότερος συνολικός αριθμός ολοκληρωμένων jobs,
- εμφανή φαινόμενα blocking και διαφοροποιημένη αξιοποίηση upstream σταθμών.

Και στις δύο περιπτώσεις κρατούνται σταθερές όλες οι λοιπές ρυθμίσεις, ώστε η σύγκριση να αφορά καθαρά τη στρατηγική διαχείρισης overflow στον bottleneck.

#### *KPIs για throughput και ενεργειακή ένταση*

Στο KPISink παραμένουν οι βασικές συνδέσεις από το Centrifuge (out0..out3 → in0..in3) και, επιπρόσθετα, ορίζονται τα εξής KPIs:

- Παραγόμενος χυμός ανά tick
- $\text{juice\_L\_tick} = \text{completed} * \text{YIELD}$  (όπου YIELD είναι ο συντελεστής μετατροπής από jobs (kg πορτοκαλιών) σε lt χυμού (όπως στο Σενάριο A)).
- Ρυθμός παραγωγής σε lt/ώρα
- $\text{juice\_L\_per\_hour} = \text{ma}(\text{juice\_L\_tick}, 60) * 3600$
- χρήση κινητού μέσου (moving average) σε παράθυρο 60sec και αναγωγή σε βάση ώρας, ώστε να φανούν τοπικές κορυφώσεις και πτώσεις στον ρυθμό παραγωγής.
- Ενέργεια ανά tick
- $\text{energy\_kWh\_tick} = \text{completed} * \text{KWH\_PER\_KG}$  (όπου KWH\_PER\_KG είναι η μέση ενέργεια ανά kg πορτοκαλιών, σε συνέπεια με τα δεδομένα του Σεναρίου A.)
- Ενεργειακή ένταση kWh/lt
- $\text{energy\_per\_l} = \text{cum}(\text{energy\_kWh\_tick}) / \text{max}(\text{cum}(\text{juice\_L\_tick}), 1e-9)$  (δείκτης που δείχνει πόση ενέργεια καταναλώνεται ανά lt παραγόμενου χυμού, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.)

Παράλληλα παρακολουθούνται τα κλασικά λειτουργικά μεγέθη:

- cum (completed) και cum (juice\_L\_tick) – συνολικός όγκος παραγωγής,
- queue και WIP – συμπεριφορά ουράς και ενδιάμεσης εργασίας, ειδικά γύρω από τον Extractor,
- util – αξιοποίηση, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο bottleneck στάδιο.

#### *Τι συγκρίνεται μεταξύ B-drop και B-block*

Η αξιολόγηση του Σεναρίου B βασίζεται σε δύο runs με ακριβώς τις ίδιες ρυθμίσεις φόρτου, αλλά διαφορετική πολιτική overflow στον Extractor:

- Run 1: on\_overflow = "drop"
- Run 2: on\_overflow = "block"

Για κάθε run εξετάζονται:

- ο τελικός αριθμός ολοκληρωμένων εργασιών (jobs) και τα αντίστοιχα lt χυμού (cum(completed), cum(juice\_L\_tick)),
- η εξέλιξη της ουράς μπροστά από τον Extractor (ποσοτικά και ποιοτικά – αν μεγιστοποιείται και πότε),
- η χρησιμοποίηση (utilization) του bottleneck και των upstream σταθμών,
- οι δείκτες ενεργειακής έντασης (kWh/lt).

Ενδεικτικά, αναμένεται:

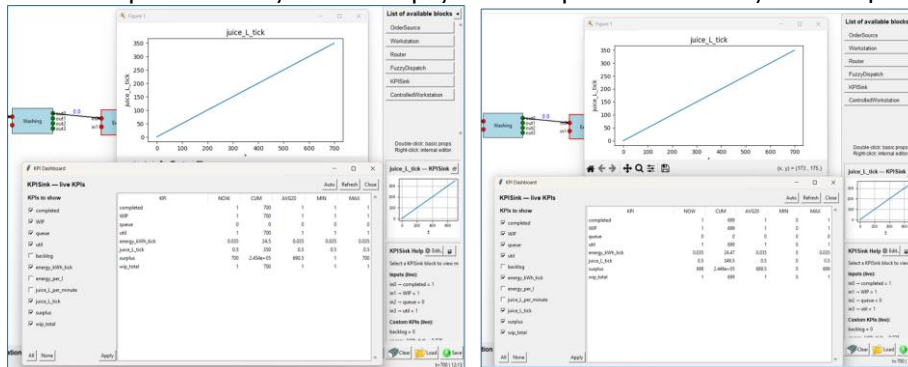
- στο σενάριο B-drop οι συνολικές ολοκληρωμένες μονάδες να είναι σημαντικά χαμηλότερες (π.χ. περίπου 250–260 jobs), με αντίστοιχα χαμηλότερο ρυθμό παραγωγής αλλά και χαμένες ποσότητες λόγω drop,
- στο σενάριο B-block το σύστημα να ολοκληρώνει περισσότερες μονάδες (π.χ. περίπου 295–300 jobs), με εμφανές blocking upstream αλλά χωρίς απώλεια υλικού.

Αν τα αποτελέσματα κινούνται σε αυτά τα ενδεικτικά εύρη και εμφανίζουν την αναμενόμενη διαφοροποίηση σε WIP/queue/throughput, τεκμηριώνεται ότι:

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- το bottleneck έχει αναδειχθεί σωστά,
- οι πολιτικές drop vs block λειτουργούν όπως αναμένεται,
- και η εργαλειοθήκη παρέχει αξιόπιστη βάση για τη μελέτη συμβιβασμών μεταξύ παραγωγικότητας, σταθερότητας και ενεργειακής έντασης σε συνθήκες αυξημένου φόρτου.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα από τις δύο επιλογές του σεναρίου B απεικονίζονται στην Εικόνα 26.

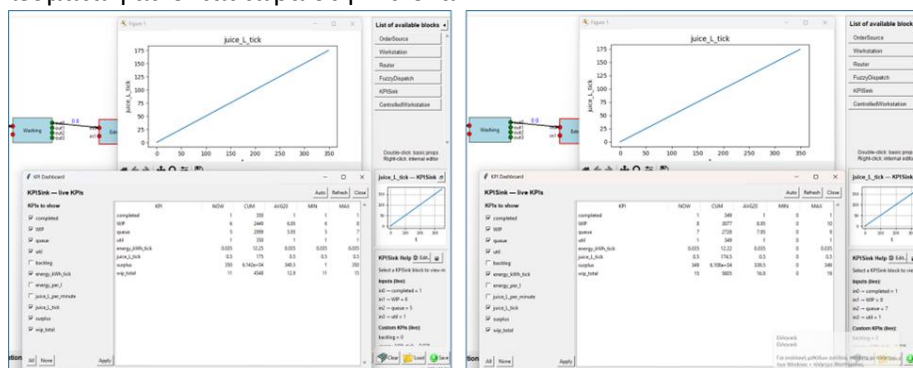


Εικόνα 26 (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B με την πολιτική drop για την μηχανή Χυμοποίησης (700 θήματα προσομοίωσης), (Δεξιά) - (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B με την πολιτική block για την μηχανή Χυμοποίησης (700 θήματα προσομοίωσης)

Δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο πολιτικών επειδή με τις τωρινές ρυθμίσεις ο αποχυμωτής/συμπιεστής είναι ο κυρίαρχος περιορισμός και αναλώνει όλη τη διαθέσιμη χωρητικότητα και στα δύο σενάρια, οπότε το overflow policy αλλάζει πού «κάθεται» η πίεση (drop vs backlog/blocking), αλλά όχι τόσο το πόσο τελικό προϊόν προλαβαίνει να βγει στον δοσμένο χρόνο. Ας δούμε την ίδια διάταξη με πιο «επιθετικές» ρυθμίσεις:

- Washing: servers = 1, proc\_time = 0.5 sec (γρήγορο στάδιο, δεν περιορίζει τη γραμμή)
- Extractor: servers = 1, proc\_time = 3 sec → ισχυρό bottleneck
- Centrifuge: servers = 1, proc\_time = 1 sec. Έτσι, ο Extractor μπορεί θεωρητικά να επεξεργαστεί ~1 job κάθε 3 sec, δηλαδή ~20 jobs/λεπτό, ενώ ο Washing μπορεί να «φτύνει» δουλειά πολύ γρηγορότερα.
- Ρυθμός άφιξης παραγγελιών = 3 if  $0 \leq t < 200$  else 0, οπότε ο φόρτος είναι 3 jobs/sec × 200 sec = 600 jobs και ο Extractor, με ρυθμό 1 job/3 sec, μπορεί στο ίδιο διάστημα να ολοκληρώσει μόλις ~66–70 jobs. Επομένως, ο υπόλοιπος φόρτος είτε συσσωρεύεται σε ουρές (block) ή χάνεται όταν γεμίσει ο buffer (drop).
- Μείωση χωρητικότητας buffer του Extractor σε 5 μονάδες, συνολική διάρκεια προσομοίωσης 300–400 sec

Τα νέα αποτελέσματα φαίνονται τώρα στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27 (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B με την πολιτική drop για την μηχανή Χυμοποίησης (700 θήματα προσομοίωσης) με πιο «επιθετικά κριτήρια», (Δεξιά) - (Αριστερά) Εξαγόμενοι δείκτες κατά την εκτέλεση του σεναρίου B

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Στο stress Σενάριο Β η μηχανή συμπίεσης bottleneck δουλεύει πρακτικά στο μέγιστο και στις δύο πολιτικές, επομένως η συνολική ποσότητα παραγωγής περιορίζεται κυρίως από τη δυναμικότητα της μηχανής και όχι από το αν το overflow γίνεται με drop ή με block. Η ουσιαστική διαφορά των δύο πολιτικών αποτυπώνεται κυρίως στη δομή της ροής: στο σενάριο drop εμφανίζονται περισσότερες απώλειες υλικού και «χαμένη» ενέργεια upstream, ενώ στο σενάριο block συσσωρεύεται περισσότερο WIP και εμφανές blocking πριν το bottleneck, χωρίς όμως απώλεια jobs. Κατά συνέπεια, οι δείκτες που διαφοροποιούνται έντονα είναι το WIP, οι ουρές και η ενεργειακή ένταση (kWh/lt), ενώ το τελικό συνολικό παραγόμενο προϊόν μπορεί να παραμένει παρόμοιο στις δύο προσομοιώσεις.

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η πιλοτική εφαρμογή της εργαλειοθήκης προγραμματισμού ευέλικτης και ανθεκτικής παραγωγής στη βιομηχανία χυμού πορτοκαλιού έδειξε ότι η τεχνική λύση είναι λειτουργικά ώριμη για χρήση σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον, τουλάχιστον σε επίπεδο ανάλυσης και υποστήριξης αποφάσεων. Στο Σενάριο Α (βασική παρτίδα 500 kg) επιβεβαιώθηκε ότι η εργαλειοθήκη μπορεί να αναπαράγει με συνέπεια τη ροή της γραμμής πλύσης-αποχύμωσης-φυγοκέντρωσης, να μεταφράζει ορθά την αντιστοίχιση 1 job = 1 kg πορτοκάλια και να υπολογίζει αξιόπιστους δείκτες όπως συνολικός παραγόμενος χυμός, χρόνος διέλευσης παρτίδας, αξιοποίηση μηχανών και ενεργειακή κατανάλωση ανά παρτίδα/ανά λίτρο. Το βασικό σενάριο λειτούργησε ως σημείο αναφοράς, επιτρέποντας να ελεγχθεί ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται αριθμητικά και ποιοτικά σε σχέση με ρεαλιστικές τιμές.

Στο Σενάριο Β (αυξημένος φόρτος), καθώς και στην πιο «επιθετική» παραλλαγή stress, η εργαλειοθήκη χρησιμοποίησε το ίδιο μοντέλο γραμμής για να διερευνήσει τη συμπεριφορά της παραγωγής υπό συνθήκες έντονης φόρτισης και περιορισμένης χωρητικότητας buffer. Μέσα από την εναλλαγή των πολιτικών overflow (drop έναντι block) αναδείχθηκαν με σαφήνεια ο ρόλος του bottleneck (Extractor) και τα διαφορετικά προφίλ λειτουργίας: στην πολιτική drop εμφανίζονται περισσότερες απώλειες υλικού και χαμηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα (kWh/lt), ενώ στην πολιτική block το σύστημα διατηρεί το υλικό αλλά με αυξημένο WIP και blocking στα upstream στάδια. Ακόμη και στις περιπτώσεις όπου το συνολικό throughput παραμένει παρόμοιο, η εργαλειοθήκη επιτρέπει να αναλυθεί σε βάθος η δομή της ροής (ουρές, αξιοποίηση, backlog), παρέχοντας μια πολύ πιο πλούσια εικόνα από ό,τι ένας απλός συγκεντρωτικός δείκτης παραγωγής.

Σε επιχειρησιακό επίπεδο, η συγκεκριμένη προσέγγιση παρέχει αποτελέσματα που είναι ερμηνεύσιμα και χρήσιμα σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον: η γραμμή όπως εμφανίζεται στο εργαλείο είναι εύκολα αναγνωρίσιμη από στελέχη παραγωγής, οι τιμές των KPIs κινούνται σε ρεαλιστικά επίπεδα και η δυνατότητα γρήγορης παραμετροποίησης (αλλαγές buffer, ρυθμών, πολιτικών overflow) διευκολύνει τη διερεύνηση ερωτημάτων τύπου «τι θα συμβεί αν αυξήσω τον φόρτο;», «τι κερδίζω/χάνω με μία πιο “σφιχτή” πολιτική;», «πώς επηρεάζεται η ενεργειακή ένταση;». Η εργαλειοθήκη δεν αντικαθιστά τα υπάρχοντα πληροφοριακά συστήματα, αλλά λειτουργεί ως εργαλείο ψηφιακού πειραματισμού πάνω στη γραμμή παραγωγής, συμβάλλοντας στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η πιλοτική εφαρμογή ανέδειξε και συγκεκριμένα περιθώρια βελτίωσης και μελλοντικά βήματα. Ενδεικτικά:

- Η μοντελοποίηση εστιάζει στο παρόν στάδιο μόνο στον τελικό χυμό· μελλοντική εξέλιξη θα μπορούσε να επεκτείνει το μοντέλο ώστε να συμπεριλάβει ρητά τις ροές υποπροϊόντων και αποβλήτων (CPWW, έλαιο, λύματα), επιτρέποντας ολοκληρωμένη ανάλυση υλικών και ενεργειακών ροών.
- Η εισαγωγή δεδομένων γίνεται κυρίως χειροκίνητα από λειτουργικά στοιχεία και πίνακες. Ένας επόμενος στόχος είναι η ανάπτυξη μηχανισμών διασύνδεσης με υπάρχοντα συστήματα (π.χ. ERP, MES, SCADA) ή αισθητήρες για ημι-αυτόματη τροφοδότηση πραγματικών δεδομένων στο μοντέλο.
- Σε επίπεδο ελέγχου, η εργαλειοθήκη έχει ήδη αποδείξει ότι υποστηρίζει ευρετικές και ασαφείς πολιτικές. Επόμενο βήμα είναι η ενσωμάτωση πιο προηγμένων προσεγγίσεων (π.χ. βελτιστοποίηση με AI/ML ή metaheuristics) πάνω στο ίδιο υπόβαθρο μοντελοποίησης.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- Τέλος, σε επίπεδο χρήσης, προτείνεται η αξιοποίηση της εργαλειοθήκης και ως εκπαιδευτικό εργαλείο για τη βιομηχανία (εκπαίδευση νέων στελεχών) και η σταδιακή γενίκευση της προσέγγισης σε άλλες γραμμές και κλάδους (π.χ. εμφιάλωση, συσκευασία, άλλες μορφές τροφίμων).

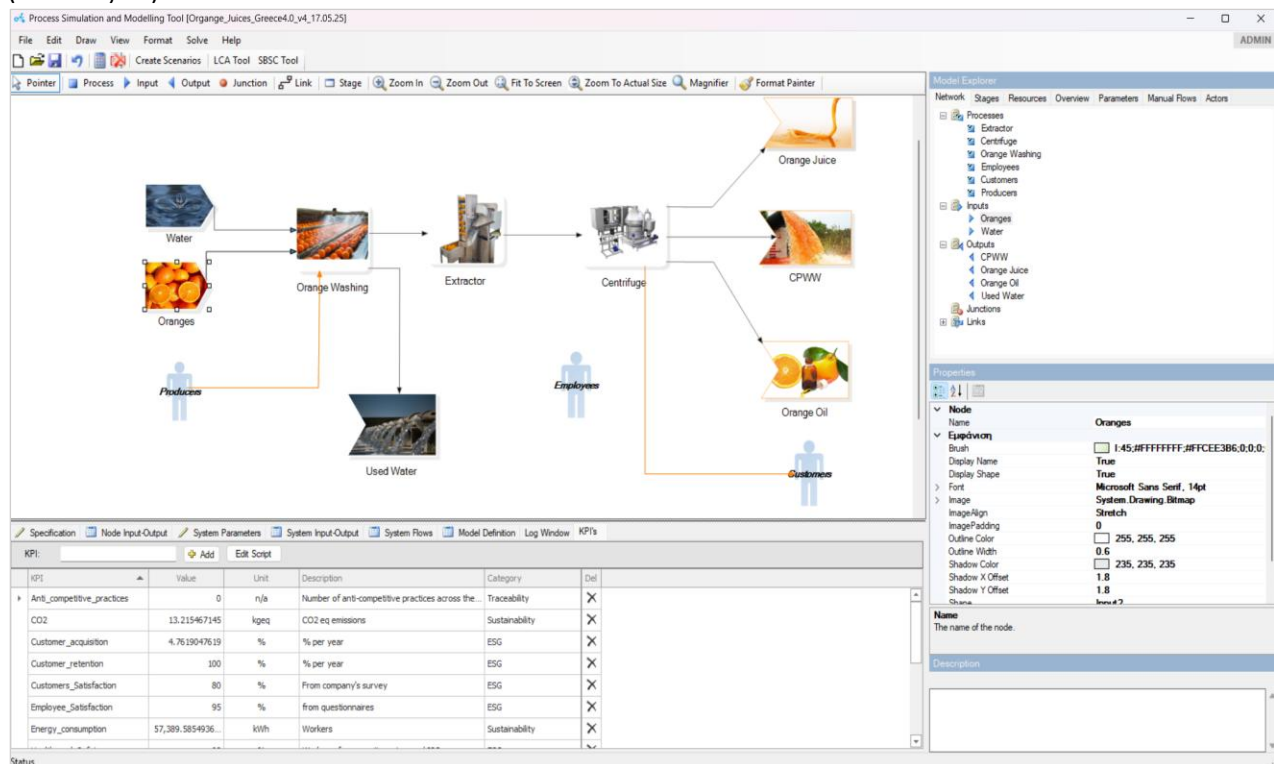
Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής δείχνουν ότι η εργαλειοθήκη μπορεί να αποτελέσει τον πυρήνα για μια πλήρως ανεπτυγμένη λύση υποστήριξης προγραμματισμού και ανάλυσης ευέλικτης/ανθεκτικής παραγωγής. Τα επόμενα βήματα εστιάζουν στην περαιτέρω εμβάθυνση της μοντελοποίησης, στη διασύνδεση με πραγματικά δεδομένα και στην κλιμάκωση της προσέγγισης σε περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές, ανοίγοντας τον δρόμο για ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό δίδυμο παραγωγής στον κλάδο των τροφίμων και πέρα από αυτόν.

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

Η Τεχνολογική Λύση 9 σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε με γνώμονα τη δυνατότητα οριζόντιας εφαρμογής σε οποιαδήποτε μεταποιητική βιομηχανία επιθυμεί να εστιάσει στην αλυσίδα αξίας της μέσω διαχείρισης και παρακολούθησης δευτερογενών υλικών, κυκλικότητας και διαφάνειας. Τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν και υλοποιήθηκαν στην παρούσα τεχνολογική λύση, όπως παρουσιάζονται αναλυτικά στα Παραδοτέο 2.2 και 3.1, προκειμένου να αξιολογηθούν και επικυρωθούν επιστημονικά και τεχνολογικά, εφαρμόστηκαν σε επιλεγμένη εταιρεία παραγωγής χυμού πορτοκαλιού που δραστηριοποιείται στην Ελλάδα. Λόγω της φύσης και των χαρακτηριστικών της Τεχνολογικής Λύσης 9, η προσέγγιση στην συγκεκριμένη εταιρεία έλαβε χώρα από τα πρώτα στάδια υλοποίησης του έργου, καθώς ήταν ζωτικής σημασίας: (1) η αποτύπωση των διεργασιών παραγωγής για την δημιουργία του ψηφιακού αντιγράφου της, (2) ο καθορισμός των στόχων και προτεραιοτήτων της ως προς την κυκλικότητα της αλυσίδας αξίας για την επιλογή των κατάλληλων δεικτών (KPIs).

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Το κύριο προϊόν παραγωγής της επιλεγμένης βιομηχανίας είναι ο χυμός πορτοκαλιού χύδην, ο οποίος αποθηκεύεται σε ασκούς και μεταφέρεται σε άλλη τοποθεσία για να συσκευαστεί σε χάρτινες, πλαστικές και άλλες συσκευασίες. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελείται από επιμέρους παραγωγικές γραμμές: την παραγωγή χυμού χύδην, την παραγωγή και διαχείριση υποπροϊόντων όπως το έλαιο πορτοκαλιού, τα απόβλητα από τον φλοιό, καθώς και τα λύματα από τον φλοιό. Στο πλαίσιο υλοποίησης του έργου Greece4.0 η γραμμή που επιλέχθηκε να εξεταστεί είναι η γραμμή παραγωγής χυμού. Οι επιμέρους διεργασίες οι οποίες μοντελοποιήθηκαν μέσω του εργαλείου PSM, απεικονίζονται στην Εικόνα 28, ενώ η πλήρης αποτύπωση των ροών εισόδου και εξόδου για όλο το σύστημα, καθώς και για κάθε επιμέρους διεργασία ξεχωριστά, και των υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10).



Εικόνα 28 Γραμμή Παραγωγής Χυμού της ελληνικής βιομηχανίας (μοντελοποίηση μέσω του εργαλείου PSM)

Πίνακας 10 Αποτύπωση των ροών εισόδου -εξόδου για τη γραμμή παραγωγής και τις επιμέρους διεργασίες, και αποτελέσματα

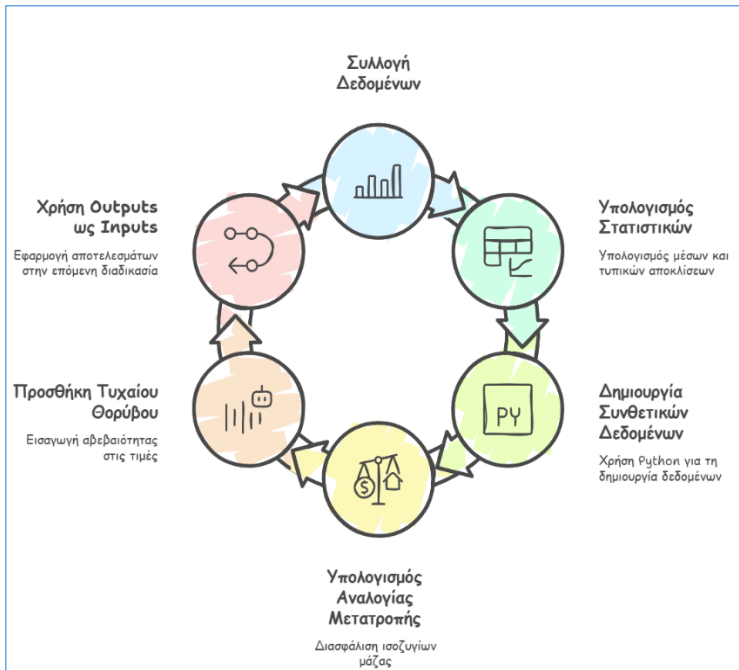
**Μοντελοποίηση & Προσομοίωση Διεργασιών: Ροές, Παράμετροι & Αποτελέσματα**

Είσοδος (πόροι)		Τιμή	
Νερό		50lt	
Πορτοκάλια		500kg	
<b>Διεργασίες</b>	<b>Είσοδος της διεργασίας</b>	<b>Έξοδος της διεργασίας</b>	<b>Παράμετρος Διεργασίας</b>
Πλύση πορτοκαλιών Orange washing	Πορτοκάλια: 500 kg Νερό: 28,05lt	Καθαρά Πορτοκάλια: 484,97kg Χρησιμοποιημένο νερό: 28,29lt	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ενέργεια: 1.965,27 kWh</li> <li>– pH: 8</li> <li>– Θερμοκρασία: 20°C</li> <li>– Ενέργεια: 54.664,17 kWh</li> <li>– pH: 8</li> <li>– Θερμοκρασία: 20°C</li> <li>– Ενέργεια: 760,15 kWh</li> <li>– pH: 8</li> <li>– Θερμοκρασία: 20°C</li> </ul>
Αποχύμωση Extractor	Πορτοκάλια: 484,97kg	Χυμός πορτοκαλιού: 152,96lt	
Φυγοκέντρηση Centrifuge	Χυμός πορτοκαλιού: 152,96lt	<ul style="list-style-type: none"> <li>– CPWW*: 111,96 kg</li> <li>– Orange juice: 28,49lt</li> <li>– Orange oil: 12.44lt</li> </ul>	
Έξοδος (υπό-προϊόντα και τελικά προϊόντα)		Τιμή	
Χυμός πορτοκαλιού		28,49lt	
CPWW*		111,96kg	
Έλαιο πορτοκαλιού		12.44lt	
Απόβλητα (έξοδος)		Τιμή	
Χρησιμοποιημένο νερό		28.29lt	
Παράμετροι Συστήματος	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ενέργεια (Ηλεκτρική): 1.179,16kWh</li> <li>– Ενέργεια (Πετρέλαιο): 196,52kWh</li> <li>– Ενέργεια (LPG): 589,58 kWh</li> <li>– Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια: 57.389,58kWh</li> <li>– Ποσότητα πορτοκαλιών για επεξεργασία (είσοδος): 500kg</li> <li>– pH: 8</li> <li>– Θερμοκρασία: 20°C</li> </ul>		

\*CPWW-Citrus Peels Wastewater/Απόβλητα του φλοιού πορτοκαλιού

Το μοντέλο της γραμμής παραγωγής του χυμού δημιουργήθηκε στο εργαλείο PSM με την ανάπτυξη εξισώσεων παλινδρόμησης (regression equation models), και τον καθορισμό των εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών και συντελεστών για κάθε μία από τις διεργασίες της γραμμής παραγωγής του χυμού. Για να δημιουργηθούν οι εξισώσεις, σύνολα δεδομένων (datasets) ήταν απαραίτητα, ιδανικά χρονοσειρές δεδομένων με βήμα μίας (1) ώρας. Η βιομηχανία παρείχε μία σειρά από δεδομένα, τα οποία ωστόσο δεν ήταν αρκετά για να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες χρονοσειρές για όλα τα δεδομένα που ζητήθηκαν (ροών, καταναλώσεων, παραμέτρων, κτλ.). Επομένως, για να καλυφθούν τα κενά στα δεδομένα, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα (synthetic data) μέσω Python, έχοντας ως βάση τα

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 29 Βήματα δημιουργίας συνθετικών δεδομένων μέσω python

Εικόνα 30 Βήματα δημιουργίας συνθετικών δεδομένων μέσω Python

πραγματικά δεδομένα που είχαμε από τη βιομηχανία. Η διαδικασία ξεκινάει με μία βασική είσοδο τιμής, και στη συνέχεια εισαγωγή τυχαίων μεταβολών (βάσει κατανομής Gauss), λαμβάνοντας υπόψη ιστορικές τιμές και τυπικές αποκλίσεις. Οι εκροές υπολογίστηκαν με συντελεστές μετατροπής (Conversion Ratios), οι οποίοι βασίστηκαν σε κανονικές κατανομές.

Για να διασφαλιστεί η αρχή διατήρησης της ύλης, οι συνολικές εκροές προσαρμόστηκαν ώστε να αντιστοιχούν στην είσοδο, ενώ προστέθηκε μια μικρή σταθερά ( $1e-6$ ) για την αποφυγή σφαλμάτων. Οι τιμές περικυπτόταν σε εύρος 0%-120% της βασικής τους τιμής, ώστε να αποφευχθούν μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Επιπλέον,

εφαρμόστηκε θόρυβος Gauss στις εκροές για την προσομοίωση της φυσικής μεταβλητότητας των διεργασιών. Για την αποφυγή επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε δυναμικός σπόρος (seed) τυχαιότητας, ο οποίος εξαρτάται από την τρέχουσα χρονική στιγμή του συστήματος.

Τέλος, εκπαιδεύτηκαν μοντέλα παλινδρόμησης για την ανάλυση των σχέσεων μεταξύ εισροών, εκροών και κατανάλωσης πόρων, βελτιώνοντας την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου και η επιβεβαίωση των τιμών έγινε με βάση τα πραγματικά δεδομένα που είχαν χορηγηθεί από τη βιομηχανία, σχετικά με τις ποσότητες παραγωγής χυμού ως προς την αρχική ποσότητα προϊόντος που εισήχθη στην αλυσίδα (ποσότητα πορτοκαλιών που εισάγεται/orange input).

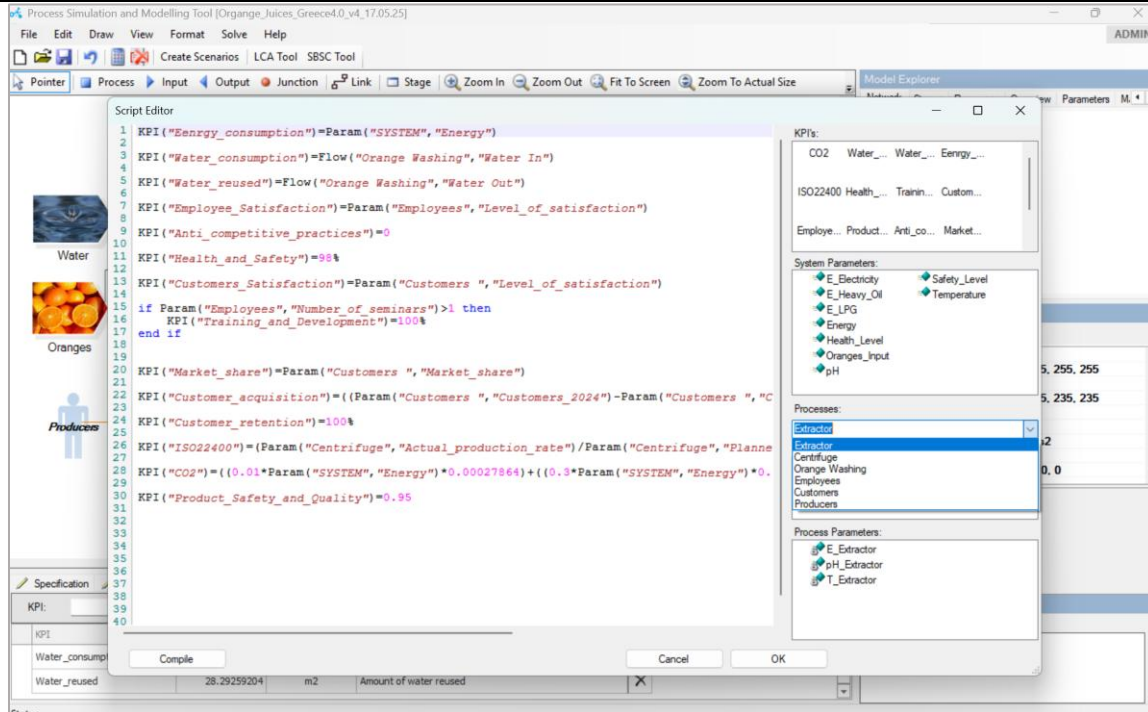
Το επόμενο στάδιο, περιλάμβανε την επιλογή δεικτών από τη βιομηχανία, μέσα από μία εκτενή λίστα, η οποία διαμορφώθηκε ακολουθώντας τη μεθοδολογική προσέγγιση για τα Sustainability Balanced Scorecards (SBSC), όπως περιεγράφηκε στα παραδοτέα στις ΕΕ1. Η λίστα περιλάμβανε δείκτες περιβαλλοντικούς, οικονομικούς, διακυβέρνησης και κοινωνικούς. Σύμφωνα με τις προτεραιότητες και στόχους της βιομηχανίας, η λίστα των επιλεγμένων KPIs για να υπολογιστούν μέσω του SBSC στο εργαλείο PSM, απεικονίζεται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 11). Ο υπολογισμός του κάθε δείκτη πραγματοποιήθηκε με την κατάλληλη αντίστοιχη εξίσωση μέσα στο PSM, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31.

Πίνακας 11 Λίστα Επιλεγμένων Key Performance Indicators για υπολογισμό μέσω του PSM Tool

Κατηγορία SCSB	Δείκτης	Αποτέλεσμα	Κατηγορία DPP
Περιβαλλοντικός	Κατανάλωση Ενέργειας	57,39MWh	Βιωσιμότητα
Περιβαλλοντικός	Διοξείδιο του Άνθρακα	13,21kgeq	Βιωσιμότητα
Περιβαλλοντικός	Κατανάλωση Νερού	28,05m <sup>2</sup>	Βιωσιμότητα
Περιβαλλοντικός	Επαναχρησιμοποίηση Νερού	28,29m <sup>2</sup>	Βιωσιμότητα
Κοινωνικός	Ικανοποίηση Πελατών	80%	ESG
Κοινωνικός	Ικανοποίηση Εργαζομένων	95%	ESG
Κοινωνικός	Επιμόρφωση και Ανάπτυξη	100%	ESG
Διακυβέρνησης	Πρακτικές Αθέμιτου Ανταγωνισμού	0	Ιχνηλασιμότητα

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Διακυβέρνησης	Δείκτης ISO22400	95 (scale 0-100)	Δίκτυο/Network
Κοινωνικός	Υγιεινή και Ασφάλεια	98%	ESG
Οικονομικός	Διατήρηση Πελατών	100%	ESG
Οικονομικός	Μερίδιο Αγοράς	45%	ESG
Οικονομικός	Απόκτηση Πελατών	4,76% (annual)	ESG
Κοινωνικός	Ποιότητα & Ασφάλεια Προϊόντος	0,95 (scale 0-1)	Δίκτυο/Network



Εικόνα 31 Δημιουργία εξισώσεων για τον υπολογισμό των SBSC δεικτών στο περιβάλλον του PSM Editor

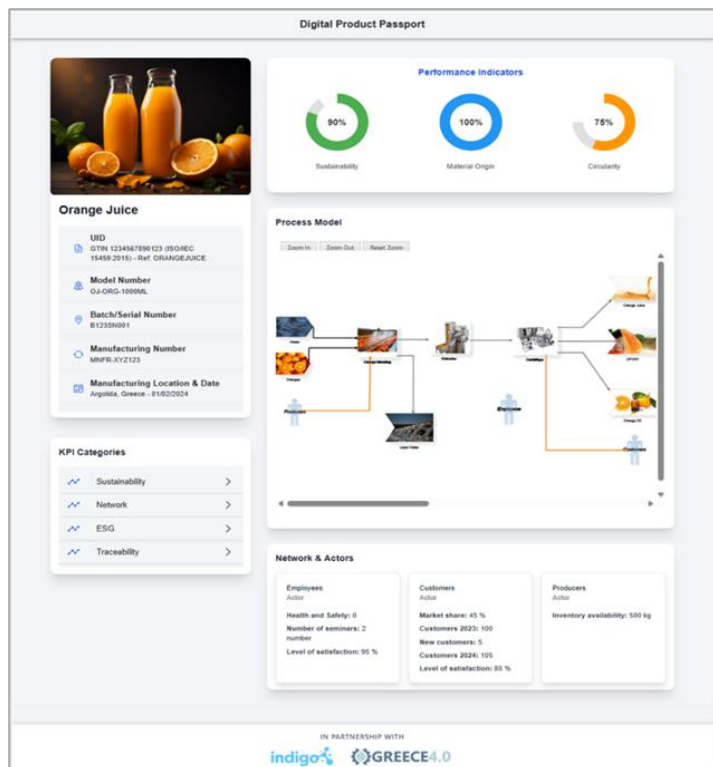
Το τελευταίο στάδιο της εξέτασης του βιομηχανικού αυτού σεναρίου, ήταν η δημιουργία του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος-Digital Product Passport (DPP). Το DPP λαμβάνει όλες τις πληροφορίες, δεδομένα και αποτελέσματα μέσω του PSM API, οι οποίες αφορούν την συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία και το παραγόμενο προϊόν, η μοντελοποίηση του οποίου είχε υλοποιηθεί κατά το πρώτο στάδιο, μέσω του εργαλείου PSM. Το DPP ουσιαστικά, αποτελεί ένα εργαλείο οπτικοποίησης, διαμοιρασμού και δημοσιοποίησης κρίσιμων πληροφοριών για το προϊόν, που μπορούν να συνεισφέρουν στη βιομηχανία σε δύο επίπεδα: (1) Στη διαφάνεια του προϊόντος, διαμοιράζοντας πληροφορία για το προϊόν με τους καταναλωτές και συνεργάτες, (2) Στον εντοπισμό κρίσιμων σημείων τα οποία μπορούν να βελτιωθούν ή διαχειριστούν, ώστε η συνολική απόδοση της βιομηχανίας (σε θέματα οικονομίας, κοινωνίας και περιβαλλοντικά), να αναβαθμιστεί.

Υπό αυτό το πλαίσιο, στο εξεταζόμενο βιομηχανικό σενάριο της βιομηχανίας παραγωγής χυμού, το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος δημιουργήθηκε με σκοπό να διαμοιράσει πληροφορία μέσω μίας στοχευμένης εφαρμογής, με λειτουργικότητα τόσο σε υπολογιστή όσο και σε έξυπνη εφαρμογή. Η πρόσβαση στην εφαρμογή γίνεται με ενσωματωμένο αναγνώστη RFID-Radio Frequency Identification επάνω στο τελικό προϊόν, στην προκειμένη περίπτωση στη συσκευασία του χυμού πορτοκαλιού. Στην Εικόνα 32 απεικονίζεται το περιβάλλον του Ψηφιακού Διαβατηρίου για το τελικό προϊόν της εξεταζόμενης βιομηχανίας, καθώς και τα σχετικά αποτελέσματα από το εργαλείο PSM, όσο και από το C-SBSC (Circular- Sustainability Balanced Scorecard).

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος για τον χυμό πορτοκαλιού χωρίζεται σε 4 διακριτά μέρη:

- Στο άνω αριστερό μέρος της οθόνης διακρίνονται πληροφορίες για το προϊόν όπως η τοποθεσία και ημερομηνία παραγωγής του (Αργολίδα, Ελλάδα), το μοντέλο, τον διακριτικό αριθμό παραγωγής (κατηγοριοποίηση με βάση τη βιομηχανία), και όποιες άλλες συμπληρωματικές πληροφορίες παρέχει η βιομηχανία για τη συγκεκριμένη παρτίδα παραγωγής και την προέλευση της πρώτης ύλης, σε αυτή την περίπτωση των πορτοκαλιών.
- Στο άνω δεξιό μέρος της οθόνης υπάρχει η συνολική εικόνα για τον παραγόμενο χυμό, και πιο συγκεκριμένα, οι υπολογιζόμενοι δείκτες

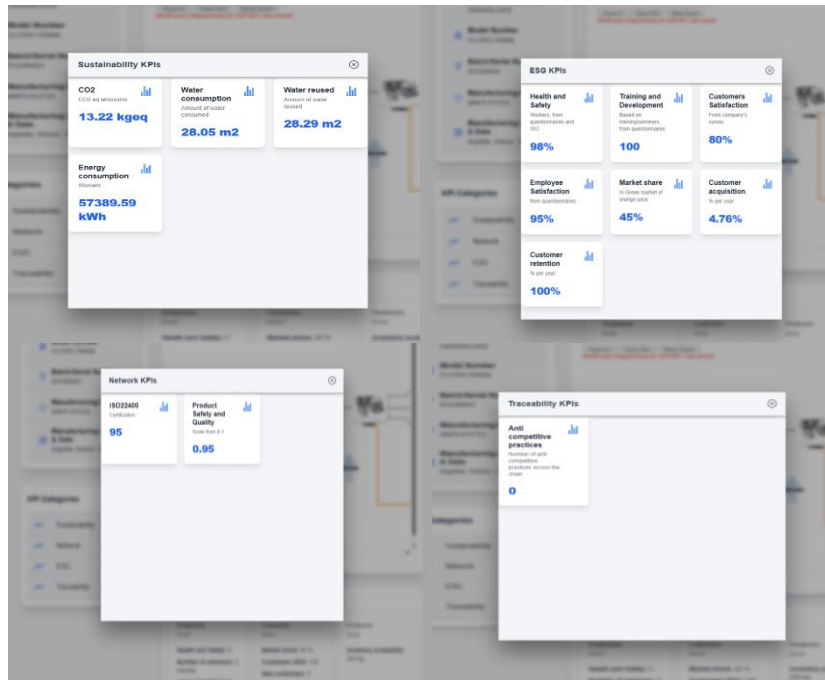


Εικόνα 32 Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος

- κατέδειξαν βιωσιμότητα στην παραγωγή της τάξης του 90% (συγκρίνοντας τους καταναλισκόμενους πόρους, αλλά και τον τρόπο λειτουργίας της παραγωγικής γραμμής), 100% των πρώτων υλών (πορτοκάλια) προέρχονται από τοπικές καλλιέργειες στην Αργολίδα, περιφερειακά της βιομηχανίας, ενώ οι δείκτες κυκλικότητας σημείωσαν συνολική απόδοση της τάξης του 75%, γεγονός που καταδεικνύει την υλοποίηση κυκλικών διεργασιών εντός της βιομηχανίας (επεξεργασία και περαιτέρω εκμετάλλευση των παραπροϊόντων, του χρησιμοποιημένου νερού, κτλ.), αλλά και τις δυνατότητες για περαιτέρω βελτίωση.
- Στο μεσαίο μέρος του Ψηφιακού Διαβατηρίου χυμού διακρίνεται το i-frame του μοντέλου που προσομοιώνει τις διεργασίες παραγωγής του χυμού (πλύση, αποχύμωση, φυγοκέντρηση), καθώς και τους σχετιζόμενους φορείς/εμπλεκόμενα μέρη στην αλυσίδα (παραγωγοί πορτοκαλιών, εργαζόμενοι στη βιομηχανία). Με mouse-over στην γραμμή παραγωγής, ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε περαιτέρω πληροφορίες για κάθε διεργασία, όπως υπολογίζονται και μεταφέρονται από το PSM.
  - Στο κάτω μέρος του Ψηφιακού Διαβατηρίου αποτυπώνονται βασικά αποτελέσματα δεικτών στην κατηγορία Δίκτυο/Network, και πιο συγκεκριμένα, μία σύντομη άλλα άμεση εικόνα για τους εργαζόμενους, οι οποίοι όπως διακρίνεται έχουν πρόσβαση σε συνεχή εκπαίδευση και κατάρτιση με 2 (κατά μέσο όρο) σεμινάρια κάθε χρόνο, και επίπεδο ικανοποίησης από την εργασία τους στο 95%. Σχετικά με τους καταναλωτές, το μερίδιο αγοράς της βιομηχανίας στην παραγωγή και διάχυση σε χύδην χυμό ανέρχεται στο 45%, με 100% διατήρηση των πελατών και την εισαγωγή 5 νέων (συγκριτικά στοιχεία 2023 & 2024). Σύμφωνα με έρευνα που έχει εκπονήσει η βιομηχανία, το επίπεδο ικανοποίησης των πελατών ανέρχεται στο 80%. Τέλος, για τους παραγωγούς, σημειώνεται ότι πρόκειται για Έλληνες παραγωγούς από την Αργολίδα, οι οποίοι παρείχαν, για τη συγκεκριμένη παραγωγή, 500 kg πορτοκάλια.
  - Στο κάτω αριστερό μέρος διακρίνεται ένα από τα σημαντικότερα τμήματα του Ψηφιακού Διαβατηρίου, και συγκεκριμένα των επιλεγμένων από τη βιομηχανία δεικτών, υπολογισμένων μέσω του SBSC στο PSM, και χωρισμένα ανά κατηγορία. Οι δείκτες για την παραγωγή χυμού, παρουσιάστηκαν παραπάνω στον Πίνακα 11: στην 3<sup>η</sup> στήλη διακρίνονται τα αποτελέσματα και στην 4<sup>η</sup> ο διαχωρισμός ανά κατηγορία στο DPP. Μετά τον υπολογισμό τους μέσω του PSM (Εικόνα

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

12), τα αποτελέσματα «μεταφέρονται» μέσω του PSM API στο DPP, και παρουσιάζονται ανά κατηγορία Εικόνα 33.



Εικόνα 33 Αποτελέσματα Δεικτών ανά κατηγορία στο DPP (Βιωσιμότητας, ESG, Δίκτυο & Ιχνηλασιμότητας)

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Τα τρία εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη αυτή της Τεχνολογικής Λύσης, είναι αποτελέσματα έρευνας και ανάπτυξης της ερευνητικής ομάδας indigo-Industrial and Digital Innovation Research Group της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης ([LINK](#)). Το εργαλείο PSM-Process Modelling & Simulation Tool είναι ένα stand-alone εργαλείο στον κεντρικό server στις εγκαταστάσεις της indigo στο Πολυτεχνείο Κρήτης, ενώ στο C-SBSC είναι ενσωματωμένο module στο PSM, που αναπτύχθηκε από τους ερευνητές που συμμετέχουν στην ομάδα εργασίας του Greece4.0. Ομοίως, το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος, διαθέσιμο τόσο για υπολογιστή όσο και για έξυπνες συσκευές (smartphones, tablets), αναπτύχθηκε και δημιουργήθηκε από την ομάδα, και φιλοξενείται στον ακόλουθο σύνδεσμο [LINK](#), ενώ ο δέκτης RFID, για την διεκπεραίωση της ερευνητικής διαδικασίας και τον απαιτούμενο έλεγχο λειτουργίας, έχει ενσωματωθεί σε συσκευασία χυμού που παραχωρήθηκε από τη βιομηχανία. Η λειτουργία όλων των εργαλείων έχει ελεγχθεί από την ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης, ενώ μέσω του PSM API, οποιοσδήποτε επικαιροποιήσεις/αναβαθμίσεις στους δείκτες ή σε οποιοδήποτε τμήμα του μοντέλου της γραμμής παραγωγής, μπορούν να εμφανιστούν αυτόματα στο Ψηφιακό Διαβατήριο κάνοντας update το μοντέλο στο PSM. Οι δείκτες αξιολόγησης της συγκεκριμένης λύσης, όπως σημειώθηκαν στο Παραδοτέο 1.1, περιλαμβάνουν:

- KPI1: Βελτίωση παρακολούθησης και διαχείρισης των βιομηχανικών μονάδων που μοντελοποιούνται, και βελτιστοποίηση λειτουργίας της γραμμής παραγωγής μέσω στοχευμένων προτεινόμενων ενεργειών. Πλήρης και λεπτομερής αποτύπωση της λειτουργικότητας και χαρακτηριστικών των βιομηχανικών μονάδων.
- KPI2: Βελτιωμένη διαχείριση των αλυσίδων αξίας με ενσωμάτωση του αντίκτυπου των εμπλεκόμενων μερών (stakeholders, external actors).
- KPI3: Ανάπτυξη ψηφιακού διαβατηρίου του παραγόμενου προϊόντος για την άμεση πληροφόρηση και διαφάνεια του αντίκτυπου του προϊόντος σε περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία.

Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα του παρόντος παραδοτέου, αλλά και στα παραδοτέα της Ενότητας Εργασίας 2 και 3, οι δείκτες αξιολόγησης, έχουν στο σύνολό τους επιτευχθεί.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Πιο συγκεκριμένα, η παρακολούθηση και η διαχείριση της βιομηχανικής μονάδας παραγωγής χυμού υλοποιήθηκε μέσω της ανάπτυξης του μοντέλου της αλυσίδας παραγωγής στο εργαλείο PSM. Το μοντέλο αναπαριστά την ακριβή λειτουργία της γραμμής παραγωγής, με δεδομένα από τη βιομηχανία, αλλά και τη δημιουργία συνθετικών δεδομένων αξιοποιώντας ταυτόχρονα με τα πραγματικά, ιστορικά δεδομένα και δεδομένα βιβλιογραφίας. Οποιοδήποτε σενάριο ή αλλαγή στο σύστημα ή σε κάποια συγκεκριμένη διεργασία δύναται να υλοποιηθεί, για να εξεταστούν διαφορετικές παράμετροι λειτουργίας και τα αποτελέσματά τους, παραδείγματος χάρη, η εισαγωγή διπλάσιας ποσότητας πορτοκαλιού, και τα αποτελέσματα αυτής της ενέργειας σε κατανάλωση πόρων (πρώτων υλών, ενέργειας, νερού, κτλ.).

Η εκτίμηση της βιωσιμότητας της αλυσίδας, εστιάζοντας στην κυκλικότητα, πραγματοποιήθηκε με την επιλογή από την ίδια τη βιομηχανία, συγκεκριμένων δεικτών αξιολόγησης, όπως προέκυψαν από την μεθοδολογία και το πλαίσιο εφαρμογής του Circular-Sustainability Balanced Scorecard. Η επιλογή έγινε με βάση τους στόχους και προτεραιότητες της βιομηχανίας. Στην μοντελοποίηση και αξιολόγηση της αλυσίδας, συμπεριλήφθηκαν επίσης τα σχετικά εμπλεκόμενα μέρη, και συγκεκριμένα οι παραγωγοί και οι εργαζόμενοι. Συγκεκριμένα δεδομένα συλλέχθηκαν από την εταιρεία σχετικά με τα εμπλεκόμενα αυτά μέρη, ενώ επιλεγμένοι δείκτες υπολογίστηκαν και ενσωματώθηκαν στο Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος, ώστε ο εκάστοτε ενδιαφερόμενος χρήστης, να μπορεί να έχει πρόσβαση σε πληροφορίες που αφορούν το σύνολο του προϊόντος και της αλυσίδας παραγωγής του: περιβαλλοντικές, οικονομικές, κοινωνικές επιδόσεις, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την διακυβέρνηση. Η παρουσίαση του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος σε φορείς και εκπροσώπους της βιομηχανίας, έτυχε θερμής αποδοχής και θετικών σχολίων, ως προς την αμεσότητα της πρόσβασης (μέσω RFID στη συσκευασία) και της ευκολίας της διάδοσης χρήσιμης πληροφορίας του προϊόντος, για ένα μεγάλο εύρος άμεσα ενδιαφερόμενων μελών: συνεργατών, τελικών χρηστών, καταναλωτών.

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η ανάπτυξη της παρούσας τεχνολογικής λύσης, στοχεύει στην δημιουργία ενός πιστού ψηφιακού αντιγράφου της παραγωγικής διαδικασίας, τον υπολογισμό δεικτών για την απόδοση της βιωσιμότητας και κυκλικότητας της βιομηχανίας, και την άμεση οπτικοποίηση και πρόσβαση σε κρίσιμη πληροφορία για το προϊόν (χυμός πορτοκαλιού), σε πλήθος ενδιαφερόμενων μελών.

##### 2.6.1.1. Οφέλη για τη Βιομηχανία

Για την βιομηχανία, το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος δύναται να λειτουργήσει ως μία ισχυρή επενδυτική κάρτα στον τομέα της κυκλικής οικονομίας. Οπτικοποιεί και παρέχει με πραγματικά δεδομένα τις βιώσιμες πρακτικές της εταιρείας, ενισχύοντας την αξιοπιστία της απέναντι σε πελάτες, ρυθμιστικούς φορείς και επενδυτές. Παράλληλα, απλοποιεί τη συμμόρφωση με αυστηρούς κανονισμούς, όπως η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, μειώνοντας τους κινδύνους νομικών κυρώσεων.

Οι επιχειρηματικοί συνεργάτες και οι τελικοί καταναλωτές αποκτούν άμεση πρόσβαση σε επαληθεύσιμες πληροφορίες σχετικά με την προέλευση, την ενεργειακή επίδοση και την κυκλικότητα των προϊόντων. Αυτή η ενέργεια, ενισχύει την εμπιστοσύνη των εμπλεκόμενων μελών και συνεργατών στην επωνυμία, και αποτρέπει τη δημιουργία αμφιβολιών για τις αλυσίδες παραγωγής της βιομηχανίας. Οι διαφανείς διαδικασίες μπορούν να δημιουργήσουν νέες προοπτικές και δυνατότητες σε αγορές που προτιμούν βιώσιμες και διακριτικές αλυσίδες προμήθειας.

##### 2.6.1.2. Ευκαιρίες Αγοράς

Το Ψηφιακό Διαβατήριο δεν περιορίζεται στην τωρινή βελτίωση της διαχείρισης – είναι μια στρατηγική επένδυση στο μέλλον. Σύντομα, οι ευρωπαϊκοί κανονισμοί θα το καθιστούν υποχρεωτικό, δίνοντας στις επιχειρήσεις που ήδη το αξιοποιούν, όπως η βιομηχανία χυμού, ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι των ανταγωνιστών. Επιπλέον, η δυνατότητα σύνδεσης με παγκόσμια συστήματα ψηφιακών διαβατηρίων διευκολύνει την είσοδο σε διεθνείς αγορές υψηλής προστιθέμενης αξίας.

##### 2.6.1.3. Μαθήματα από την Πιλοτική Εφαρμογή

Η εφαρμογή της ολοκληρωμένης λύσης στην βιομηχανία χυμού, με την αξιοποίηση των επιμέρους εργαλείων που αναπτύχθηκαν στοχευμένα στην παραγωγική της διαδικασία (PSM & C-SBSC) και στο τελικό της προϊόν (Ψηφιακό Διαβατήριο), έδωσε τη δυνατότητα συλλογής χρήσιμων αποτελεσμάτων και ανατροφοδότησης σχετικά με την αποτελεσματικότητα της, την γνώση που αποκτήθηκε και τις

Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

μελλοντικές προκλήσεις και δυνατότητες. Παρακάτω (Πίνακας 12) παρουσιάζονται συνοπτικά προκλήσεις που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια ανάπτυξης της παρούσας λύσεις, οι διορθωτικές ενέργειες που υλοποιήθηκαν για να αντιμετωπιστούν, καθώς και η γνώση που αποκτήθηκε μέσω της διαδικασίας, και θα είναι εξαιρετικά χρήσιμη για ενδεχόμενη επέκταση και περαιτέρω ανάπτυξη της λύσης, στο μέλλον.

Πίνακας 12 Λίστα προκλήσεων κατά την ανάπτυξη της Λύσης 9 και τρόποι αντιμετώπισής τους.

Πρόκληση	Διορθωτική Ενέργεια/Λύση	Αποκτηθείσα Γνώση
Διασύνδεση συστημάτων και δεδομένων	Ανάπτυξη ενδιάμεσου API για αυτοματοποίηση ροής δεδομένων.	Η προετοιμασία μιας ενιαίας αρχιτεκτονικής δεδομένων πριν την υλοποίηση είναι κρίσιμη.
Ελλιπή/αβέβαια δεδομένα στο PSM. Ιστορικά δεδομένα ελλιπή ή μεταβλητά.	Χρήση συνθετικών δεδομένων (Python) και ευέλικτων μοντέλων παλινδρόμησης.	Σε περιπτώσεις έλλειψης συνόλων δεδομένων, τα μοντέλα πρέπει να είναι προσαρμοστικά και να ενσωματώνουν αβεβαιότητα.
Ασφάλεια δεδομένων και διαχείρισης τους για προσομοιώσεις και λοιπές ενέργειες.	Αποθήκευση δεδομένων σε server της ομάδας και εργασίας και περιορισμένη πρόσβαση.	Σε περιπτώσεις υλοποίησης σε άγνωστες βιομηχανίες ή ενσωμάτωσης σε ήδη ανεπτυγμένα συστήματα καταγραφής δεδομένων, η εξασφάλιση της αξιοπιστίας καλύπτεται με τη χρήση blockchains.
Επικοινωνία DPP – Δυσκολία ερμηνείας δεδομένων από ενδιαφερόμενους φορείς.	Απλοποιημένα dashboards με οπτικοποιήσεις και διάδοση στοχευμένης πληροφορίας.	Ο διαμοιρασμός πληροφοριών και η διαφάνεια κατά μήκος της αλυσίδας χωρίς κατανοητή παρουσίαση, δεν επιτυγχάνει τον στόχο.

## 2.10<sup>α</sup>. Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων

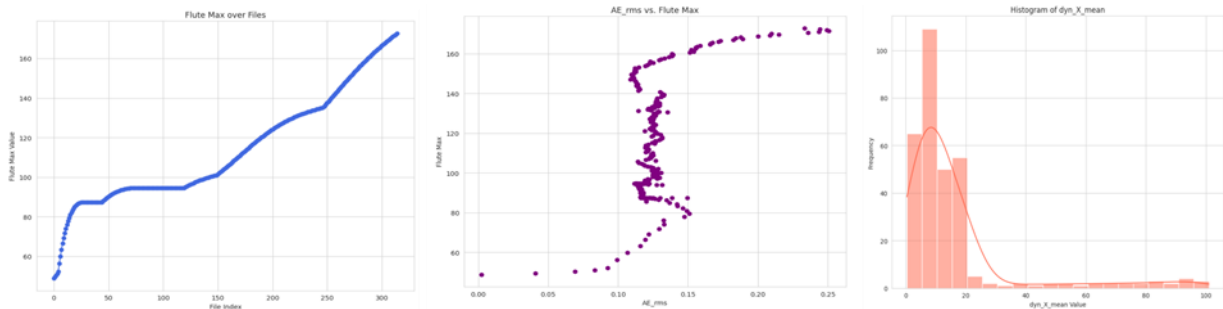
### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Η λύση αξιολογείται σε 2 σενάρια χρήσης για την πρόβλεψη της κατάστασης υγείας του εξοπλισμού: η μέθοδος που βασίζεται στην Ενισχυτική Μάθηση αξιολογείται σε μια εφαρμογή κοπτικών εργαλείων φρέζας, ενώ η μέθοδος που βασίζεται στην Αυτοματοποιημένη Μηχανική Μάθησης σε μια εφαρμογή ψυχρής έλασης.

#### Σενάριο κοπτικών εργαλείων

Κάθε αρχείο κοπής του συνόλου δεδομένων περιέχει περίπου 250.000 γραμμές, με καθεμία να περιέχει 7 παραμέτρους, οδηγώντας σε έναν εξαιρετικά πολύπλοκο χώρο παρατήρησης 1.750.000 διαστάσεων για τον πράκτορα RL. Για την αντιμετώπιση της «κατάρας της διαστασιμότητας» και την εξαγωγή ουσιαστικών χαρακτηριστικών, η ανάλυση επικεντρώθηκε στην εξαγωγή χαρακτηριστικών στο πεδίο του χρόνου για κάθε μετρούμενη παράμετρο από τους αισθητήρες. Μέσω αυτής της διαδικασίας, προέκυψαν 42 χαρακτηριστικά ανά κοπή (7 παράμετροι × 6 χαρακτηριστικά χρόνου ανά μία). Ακολούθησε κανονικοποίηση στην περιοχή [0, 1] για την εξασφάλιση ομοιομορφίας και τη βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων μάθησης. Η κανονικοποίηση πραγματοποιήθηκε με χρήση της μεθόδου min-max scaling, η οποία προσαρμόζει τις τιμές κάθε χαρακτηριστικού ώστε να εμπίπτουν στο συγκεκριμένο εύρος, ενισχύοντας τον ρυθμό σύγκλισης κατά την εκπαίδευση. Στη συνέχεια, οι τιμές φθοράς (wear flute) ενσωματώθηκαν στο σύνολο δεδομένων, δημιουργώντας ένα πλήρες σύνολο που περιλαμβάνει τόσο τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά όσο και τις μετρήσεις φθοράς.

Επιπλέον, για την καλύτερη κατανόηση των δεδομένων και της εξέλιξης της φθοράς των φτερών μετά από κάθε κοπή, αναλύθηκαν τα αρχεία wear του συνόλου δεδομένων. Αναπτύχθηκε μια συνάρτηση που διατρέχει τα αρχεία φθοράς κάθε εργαλείου και εντοπίζει τη μέγιστη διαφορά φθοράς μεταξύ διαδοχικών κοπών. Η πληροφορία αυτή είναι κρίσιμη και αξιοποιείται στη διαδικασία πρόβλεψης του πράκτορα Ενισχυτικής Μάθησης. Η μέγιστη καταγεγραμμένη διαφορά φθοράς χρησιμοποιήθηκε ως υπερπάρаметρος σε κάθε μοντέλο MDP (Markov Decision Process). Πραγματοποιήθηκε επίσης Εξερευνητική Ανάλυση Δεδομένων (EDA) για την ανάδειξη προτύπων και σχέσεων εντός του συνόλου δεδομένων. Η Εικόνα 34 παρουσιάζει ενδεικτικές οπτικοποιήσεις.



Εικόνα 34 Οπτικοποίηση EDA

Χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Gymnasium (πρώην OpenAI Gym), σχεδιάστηκε ένα προσαρμοσμένο περιβάλλον για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με Ενισχυτική Μάθηση. Το περιβάλλον αυτό προσομοιώνει ένα σύστημα στο οποίο ένας πράκτορας προβλέπει τη φθορά σε συγκεκριμένα εξαρτήματα (τα λεγόμενα "φτερά") κατά τη διάρκεια μιας κατασκευαστικής διαδικασίας. Αναπτύχθηκαν τέσσερα περιβάλλοντα εκπαίδευσης RL: Corrective - with Delay, Corrective - No Delay, Non-Corrective - with Delay, Non-Corrective - No Delay.

Τα περιβάλλοντα προσομοιώνουν το πρόβλημα πρόβλεψης φθοράς στη CNC μηχανή. Στόχος του πράκτορα είναι να προβλέψει με ακρίβεια τη φθορά σε τρία συγκεκριμένα εξαρτήματα (φτερά), με βάση ιστορικά δεδομένα αισθητήρων που έχουν υποστεί επεξεργασία. Ο χώρος καταστάσεων αποτελείται από

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

42 χαρακτηριστικά χρόνου από τους αισθητήρες, προσφέροντας μια λεπτομερή αποτύπωση της κατάστασης της μηχανής μετά από κάθε κοπή. Ο χώρος ενεργειών είναι ένας συνεχής διανυσματικός χώρος τριών διαστάσεων, όπου κάθε διάσταση (στην περιοχή από 0 έως 1) αντιστοιχεί στην πρόβλεψη του πράκτορα για τη φθορά ενός από τα τρία φτερά. Οι ανταμοιβές υπολογίζονται βάσει της ακρίβειας των προβλέψεων, με τη συνάρτηση ανταμοιβής να ευνοεί πιο ακριβείς προβλέψεις και να τιμωρεί μεγάλες αποκλίσεις.

Το περιβάλλον επανεκκινείται στην αρχική του κατάσταση στην αρχή κάθε επεισοδίου, εξασφαλίζοντας συνεπή γραμμή βάσης για τη μαθησιακή διαδικασία του πράκτορα. Η συνάρτηση step εκτελεί ένα βήμα στον περιβάλλον, ενημερώνει την κατάσταση, υπολογίζει την ανταμοιβή και καθορίζει αν το επεισόδιο θα τερματιστεί ή θα διακοπεί.

#### Σενάριο ψυχρής έλασης

Η μονάδα ψυχρής έλασης είναι εξοπλισμένη με δίκτυο αισθητήρων που περιλαμβάνει δέκα επιταχυνσιόμετρα, με το καθένα να καταγράφει τέσσερις μεταβλητές που σχετίζονται με δονήσεις: συνολική επιτάχυνση, συνολική ταχύτητα, δείκτη κραδασμών (shock finder) και συνολική φθορά ρουλεμάν (overall bearing defect). Ο Πίνακας 13 παρουσιάζει τα σημεία μέτρησης και τη διεύθυνση των αισθητήρων για καθένα από αυτά τα επιταχυνσιόμετρα. Το δίκτυο αισθητήρων περιλαμβάνει επίσης ένα ταχύμετρο (tachometer) και έναν αισθητήρα ρεύματος. Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει ένα δείγμα από το σύνολο δεδομένων που προκύπτει από τους αισθητήρες.

Πίνακας 13 Τα σημεία μέτρησης και οι κατευθύνσεις των αισθητήρων για τα επιταχυνσιόμετρα

Sensor ID	Measurement Point	Sensor Direction
1	Upper Backup Roll – DE Side	Vertical
2	Upper Backup Roll – DE Side	Axial
3	Upper Backup Roll – NDE Side	Vertical
4	Upper Working Roll – DE Side	Reverse Horizontal
5	Upper Working Roll – NDE Side	Horizontal
6	Down Working Roll – DE Side	Reverse Horizontal
7	Down Working Roll – NDE Side	Horizontal
8	Down Backup Roll – DE Side	Vertical
9	Down Backup Roll – DE Side	Axial
10	Down Backup Roll – NDE Side	Vertical

Πίνακας 14 Δείγμα συνόλου δεδομένων από τις μετρήσεις των αισθητήρων

Timestamp	Acceleration	Overall Bearing	Velocity
1566971119266	0.00380	0.00241	0.04416
1566971129563	0.15308	2.23442	0.15353
1566971139850	0.15308	2.23442	0.15353
1566971150154	0.15308	2.23442	0.15353
1566971160439	0.15308	2.23442	0.15353
1566971170720	0.15308	2.23442	0.15353
1566971182632	0.98491	3.49737	0.48424
1566971192925	0.98491	3.49737	0.48424
1566971203219	0.98491	3.49737	0.48424

Πριν από την εγκατάσταση του συστήματος αισθητήρων, οι εργασίες συντήρησης πραγματοποιούνταν με βάση προκαθορισμένο χρονικό πρόγραμμα: εξαρτήματα της μηχανής, όπως οι κύλινδροι, αντικαθίσταντο κάθε οκτώ ώρες, ταυτόχρονα με την αλλαγή βάρδιας. Η προσέγγιση αυτή συχνά οδηγούσε είτε σε πρόωρες αντικαταστάσεις—όπου τα εξαρτήματα αφαιρούνταν ανεξαρτήτως της πραγματικής τους κατάστασης— είτε σε αιφνίδιες αστοχίες, όταν τα εξαρτήματα παρουσίαζαν βλάβη πριν

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

από την προγραμματισμένη συντήρηση. Τα εξαρτήματα επιθεωρούνταν οπτικά μετά την αφαίρεσή τους και, ανάλογα με την κατάστασή τους, επισκευάζονταν ή απορρίπτονταν.

Η Εικόνα 35 παρουσιάζει ένα δείγμα δεδομένων που περιλαμβάνει πληροφορίες για τους επάνω (backup) και κάτω (work) κυλίνδρους: το αναγνωριστικό τους (ID), τη χρονική στιγμή εγκατάστασης, τη διάμετρό τους, τη χρονική στιγμή αφαίρεσης και το συμβάν, δηλαδή είτε τη βλάβη είτε την προγραμματισμένη αντικατάσταση λόγω φυσιολογικής φθοράς. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν επίσης τον αριθμό διελεύσεων (passes) στις οποίες χρησιμοποιήθηκε κάθε κύλινδρος και τον λόγο για την εκτέλεση κάθε ενέργειας συντήρησης έτσι διακρίνεται η κανονική συντήρηση (π.χ. λόγω πτώσης απόδοσης) από άλλες περιπτώσεις, όπως η εμφάνιση σημαδιών στους κυλίνδρους.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΡΑΟΥΛΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΛΑΣΤΡΟΥ 2							
Θέση	Αριθμός Ράουλου	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ			ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ		
		Ημερομηνία	Ωρα Έναρξης	Διάμετρος (mm)	Ημερομηνία	Ωρα Λήξης	Αιτία Εξαγωγής
Κάτω	82287	29/7/20	15:00	123.50	29/7/20	22:25	Φυσιολογική Φθορά
Πάνω	82513	29/7/20	23:00	122.90	30/7/20	1:00	Σκάσιμο
Κάτω	82514	29/7/20	23:00	122.90	30/7/20	1:00	Σκάσιμο
Πάνω	82285	30/7/20	1:30	122.60	30/7/20	10:40	Φυσιολογική Φθορά
Κάτω	82511	30/7/20	1:30	122.60	30/7/20	10:40	Φυσιολογική Φθορά
Πάνω	82282	30/7/20	11:30	116.20	30/7/20	19:20	Σπάσιμο
Κάτω	71076	30/7/20	11:30	116.20	30/7/20	19:20	Ζευγάρι σε Σπάσιμο
Πάνω	82285	30/7/20	19:50	122.40	31/7/20	2:30	Φυσιολογική Φθορά
Κάτω	82511	30/7/20	19:50	122.40	31/7/20	2:30	Φυσιολογική Φθορά
Πάνω	82286	3/8/20	7:00	123.30	3/8/20	14:15	Φυσιολογική Φθορά

Εικόνα 35 Δείγμα συνόλου δεδομένων από τις εγγραφές συμβάντων

Αν και το χρονοσειριακό σύνολο δεδομένων από τους αισθητήρες δονήσεων δεν περιείχε ελλιπή πακέτα, το αρχικό σήμα επηρεάζεται από λειτουργικό θόρυβο, προερχόμενο από εκκεντρότητα των κυλίνδρων, ροή ψυκτικού υγρού και μηχανικές κρούσεις από προηγούμενα στάδια, επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση των μοντέλων μηχανικής μάθησης. Αντιθέτως, το αρχείο καταγραφής βλαβών διατηρούνταν χειροκίνητα σε υπολογιστικό φύλλο Excel, παρουσιάζοντας τα συνήθη σφάλματα, όπως κενά πεδία, ασυνέπειες στα χρονικά σημεία, καθυστερημένες ή ενδεχομένως ανακριβείς καταγραφές βλαβών κ.λπ. Επειδή οι καταγραφές αυτές καλύπτουν μόνο 5 από τους 18 μήνες του αρχείου αισθητήρων, έγινε ευθυγράμμιση των δύο πηγών δεδομένων, με περικοπή του χρονολογικού εύρους των αισθητήρων ώστε να ταιριάζει με το κοινό χρονικό παράθυρο και απορρίφθηκαν 17 εσφαλμένα επισημασμένα συμβάντα μέσω ελέγχων λογικής συνέπειας.

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Η λειτουργία του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων ελέγχεται και αξιολογείται με βάση τα παρακάτω KPIs:

- **KPI 1:** Αριθμός αλγορίθμων (AutoML και RL) που θα υλοποιηθούν και θα συγκριθούν σε διαφορετικά ML pipelines.
- **KPI 2:** Ακρίβεια ML αλγορίθμων με κατάλληλες μετρικές.
- **KPI 3:** Χρόνος εκτέλεσης και απόκρισης των ML αλγορίθμων.
- **KPI 4:** Διάρκεια συντήρησης και Mean Time Between Failures (MTBF)

Στις ακόλουθες υποενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου λειτουργίας και επιβεβαίωσης των προαναφερθέντων KPIs.

#### KPI 1: Αριθμός αλγορίθμων (AutoML και RL) που θα υλοποιηθούν και θα συγκριθούν σε διαφορετικά ML pipelines

Στην συγκεκριμένη λύση, δίνεται η δυνατότητα να δημιουργηθούν δυναμικές αναλύσεις μέσα από την υλοποίηση διαφορετικών ML pipelines και περιβαλλόντων εκπαίδευσης και αξιολόγησης, τα οποία

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

μπορούν να αξιοποιούν αλγόριθμους RL και AutoML. Για αυτόν τον λόγο, υλοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στην πλατφόρμα 4 RL αλγόριθμοι (PPO, SAC, DDPG, A2C) και 7 AutoML αλγόριθμοι (TPOT, AutoGluon, AutoKeras, H2O, AutoSklearn, FastAI, MLJar).

*KPI 2 & KPI3: Ακρίβεια και χρόνος εκτέλεσης ML αλγορίθμων με κατάλληλες μετρικές*

#### Ακρίβεια και χρόνος εκτέλεσης RL αλγορίθμων

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε μια συνοπτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων αξιολόγησης των RL αλγορίθμων στην πρόβλεψη της κατάστασης υγείας του εξοπλισμού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης μέσω Ενισχυτικής Μάθησης επιλύεται εντός ενός προσαρμοσμένου περιβάλλοντος, το οποίο προσομοιώνει ένα σύστημα όπου ένας πράκτορας πραγματοποιεί προβλέψεις για τη φθορά συγκεκριμένων εξαρτημάτων σε μια κατασκευαστική διαδικασία. Τα περιβάλλοντα που δημιουργήθηκαν για τη μοντελοποίηση της Μαρκοβιανής Διαδικασίας Αποφάσεων (MDP) και την εκπαίδευση του αλγορίθμου RL είναι τέσσερα, προκύπτοντας από τους δυνατούς συνδυασμούς ανάμεσα στις δύο εναλλακτικές μεθόδους πρόβλεψης (Corrective, Non-Corrective) και στους δύο τρόπους υπολογισμού της ανταμοιβής (With Delay, No Delay).

Η Μέθοδος Πρόβλεψης διακρίνεται σε:

1. Διορθωτική Πρόβλεψη (Corrective Prediction), όπου οι προβλέψεις του πράκτορα διορθώνονται με βάση τις πραγματικές τιμές φθοράς που παρατηρούνται και
2. Μη Διορθωτική Πρόβλεψη (Non-Corrective Prediction), όπου οι προβλέψεις ενημερώνονται σταδιακά με βάση τις προηγούμενες χωρίς άμεση διόρθωση από τις πραγματικές τιμές φθοράς.

Ο Υπολογισμός Ανταμοιβής διακρίνεται σε:

1. Χωρίς Καθυστέρηση (No Delay), όπου η ανταμοιβή υπολογίζεται άμεσα βάσει της διαφοράς μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής τιμής φθοράς, χωρίς συντελεστή κλιμάκωσης επικεντρώνεται στην άμεση ακρίβεια, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη μακροπρόθεσμη επίδραση των ενεργειών, και
2. Με Καθυστέρηση (With Delay), όπου η ανταμοιβή τροποποιείται από έναν «συντελεστή καθυστέρησης» που την κλιμακώνει με βάση το βήμα εντός του επεισοδίου, ενισχύοντας έτσι τις ενέργειες που αποδίδουν θετικά αποτελέσματα σε μεταγενέστερο στάδιο του επεισοδίου.

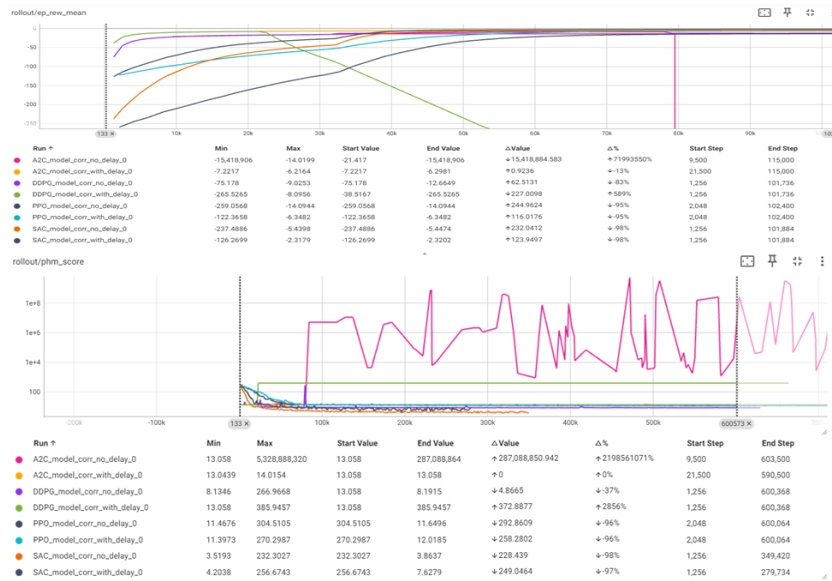
Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων RL σε κάθε περιβάλλον, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μετρικές:

- Μέσο Μήκος Επεισοδίου (Mean Episode Length): Αντιπροσωπεύει τη μέση διάρκεια ενός επεισοδίου μέχρι την επίτευξη τελικής κατάστασης. Στο πλαίσιο της προγνωστικής συντήρησης, ένα επεισόδιο μπορεί να θεωρηθεί ως η λειτουργική περίοδος ενός μηχανήματος πριν χρειαστεί συντήρηση. Μεγαλύτερο μέσο μήκος επεισοδίου υποδηλώνει ότι η πολιτική που έμαθε ο πράκτορας είναι αποτελεσματική στην πρόληψη βλαβών και στην παράταση του χρόνου λειτουργίας του εξοπλισμού.
- Μέση Ανταμοιβή Επεισοδίου (Mean Episode Reward) (Ladosz et al., 2022): Εκφράζει τη μέση συνολική ανταμοιβή που λαμβάνεται ανά επεισόδιο. Στο πλαίσιο της προγνωστικής συντήρησης, η συνάρτηση ανταμοιβής μπορεί να λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως λειτουργική αποδοτικότητα, κόστος συντήρησης, χρόνος διακοπής και εμφάνιση βλαβών. Υψηλότερη μέση ανταμοιβή δείχνει ότι η πολιτική είναι αποτελεσματική στην εξισορρόπηση αυτών των παραγόντων.
- Συνάρτηση Σκορ (Score Function): Η συνάρτηση αυτή παρέχει ανατροφοδότηση στον πράκτορα με βάση την ακρίβεια των προβλέψεών του, εστιάζοντας ιδιαίτερα στην αυστηρότερη τιμωρία των υπερεκτιμήσεων σε σύγκριση με τις υποεκτιμήσεις. Αυτό διασφαλίζει ότι ο πράκτορας μαθαίνει να αποφεύγει την πρόβλεψη υπερβολικά υψηλών τιμών φθοράς, οι οποίες μπορεί να είναι πιο δαπανηρές και επιζήμιες. Η χρήση εκθετικών συναρτήσεων παρέχει ομαλή κλίση μάθησης, επιτρέποντας σταδιακή και αποτελεσματική προσαρμογή των προβλέψεων.

Η Εικόνα 36 απεικονίζει τη συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων από τους τέσσερις αλγόριθμους RL που ενσωματώθηκαν στα μοντέλα 'χωρίς καθυστέρηση' και 'με καθυστέρηση' για τη Μέθοδο Διορθωτικής Πρόβλεψης (Corrective Prediction Method). Ο Πίνακας 15 παρουσιάζει συγκεντρωτικές

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

μετρικές που σχετίζονται με την απόδοσή τους στα διορθωτικά περιβάλλοντα. Η Εικόνα 37 παρουσιάζει την αντίστοιχη συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων από τους τέσσερις αλγόριθμους RL που ενσωματώθηκαν στα μοντέλα 'χωρίς καθυστέρηση' και 'με καθυστέρηση' για τη Μέθοδο Μη Διορθωτικής Πρόβλεψης (Non-Corrective Prediction Method). Ο Πίνακας 16 περιλαμβάνει συγκεντρωτικές μετρικές που αφορούν την απόδοσή τους στα μη διορθωτικά περιβάλλοντα.

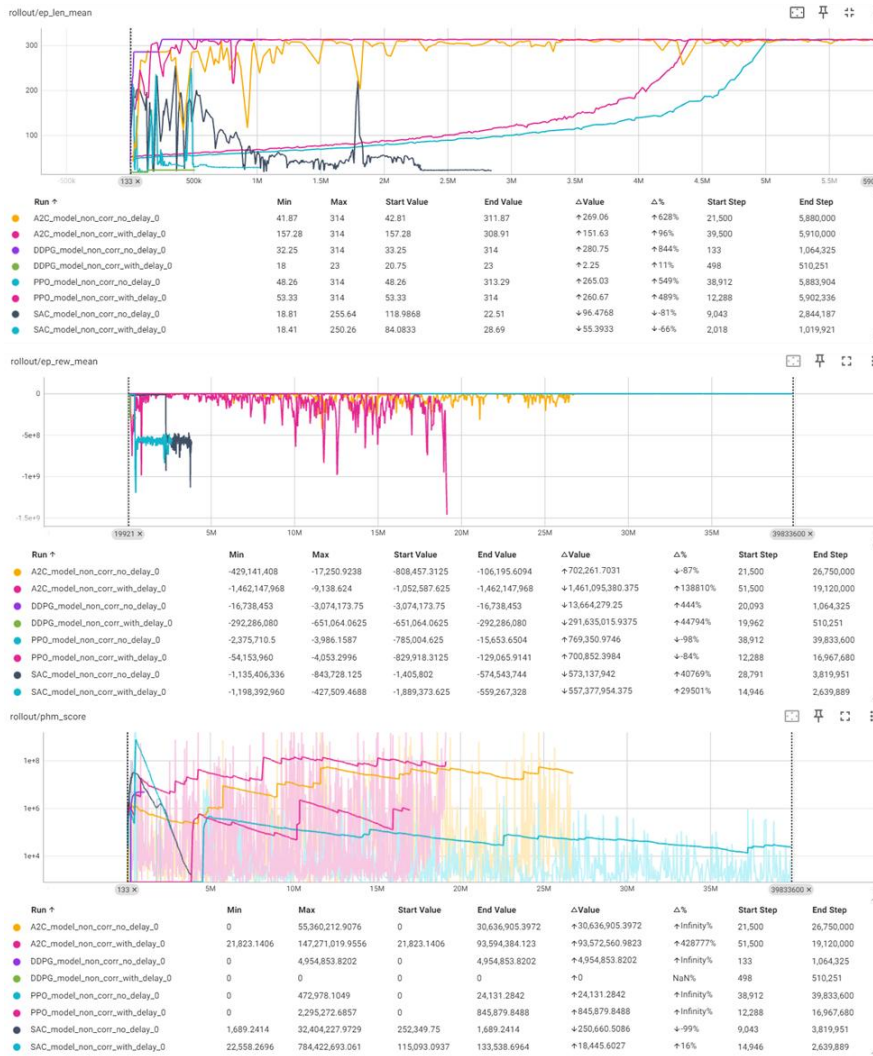


Εικόνα 36 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για τη Διορθωτική Πρόβλεψη (Corrective Prediction)

Πίνακας 15 Απόδοση Αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης (RL) σε Διορθωτικά Περιβάλλοντα (Corrective Environments)

Corrective Prediction							
RL algorithm	Environment & Dataset (Cutters)		Max Reward		Min PHM Score		Training Time & Total Timesteps
			Value	Timestep	Value	Timestep	
PPO	No	c4	-17.21	40,000	16.99	40,000	3 hours
	Delay	c6	-16.21	70,000	18	70,000	1,117,000 steps
	With	c4	-8.98	20,000	15.73	20,000	2 hours
SAC	Delay	c6	-8.23	1,460,000	17.85	670,000	2,160,000 steps
	No	c4	-37.37	90,000	45.76	90,000	6.2 hours
	Delay	c6	-14.8	30,000	16.36	30,000	349,420 steps
DDPG	With	c4	-10.94	20,000	23,07	20,000	5.3 hours
	Delay	c6	-8,21	110,000	16,22	110,000	279,374 steps
	No	c4	-18.84	20,000	19.32	20,000	12.67 hours
A2C	Delay	c6	-17.04	250,000	18.55	520,000	629,256 steps
	With	c4	-10.75	20,000	19.36	20,000	11.5 hours
	Delay	c6	-8.83	20,000	18.12	20,000	452,160 steps
A2C	No	c4	-17.84	700,000	18.33	700,000	13.7 hours
	Delay	c6	-16.33	7,000,000	18.12	7,000,000	19,120,000 steps
	With	c4	-10.75	14,640,000	19.36	14,640,000	17.2 hours
	Delay	c6	-8.83	14,640,000	18.12	14,640,000	14,640,000 steps

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 37 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για τη Μη Διορθωτική Πρόβλεψη (Non-Corrective Prediction)

Πίνακας 16 Απόδοση Αλγορίθμων Ενισχυτικής Μάθησης (RL) σε Μη Διορθωτικά Περιβάλλοντα (Non-Corrective Environments)

Non-Corrective Prediction						
RL algorithm	Environment & Dataset (Cutters)	Max Reward Value	Max Reward Timestep	Min PHM Score Value	Min PHM Score Timestep	Training Time & Total Timesteps
PPO	No Delay c4	-25,255,715	38,730,000	35,497,029	38,730,000	17 hours
	Delay c6	163,762,286	20,000	233,645,404	20,000	39,833,600 steps
	With Delay c4	544,135,308	20,000	726,430,945	20,000	19,2 hours
	Delay c6	583,253,362	20,000	876,304,975	20,000	16,967,680 steps
SAC	No Delay c4	-643	400,000	752	390,000	43.3 hours
	Delay c6	-5,679	410,000	3140	460,000	3,819,951 steps
	With Delay c4	-23,455	200,000	11,418	200,000	32.1 hours
DDPG	Delay c6	-15,048	470,000	7,712	190,000	2,639,889 steps
	No Delay c4	-	1,050,000	735,266,738	1,050,000	19.5 hours
	Delay c4	563,092,188				1,064,325 steps

Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

	c6	-	1,050,000	910,064,743	1,050,000	
		637,838,860				
With	c4	DNF	-	DNF	-	13.5 hours
Delay	c6	DNF	-	DNF	-	510,251 steps
No	c4	-50,834,200	30,000	3,469,607	30,000	26.1 hours
Delay	c6	-28,469,419	30,000	39,536,971	30,000	26,750,000 steps
A2C						
	c4	-	19,110,000	735,266,790	19,110,000	
With		550,755,354				22.8 hours
Delay	c6	-	19,110,000	910,064,743	19,110,000	19,120,000 steps
		606,030,553				

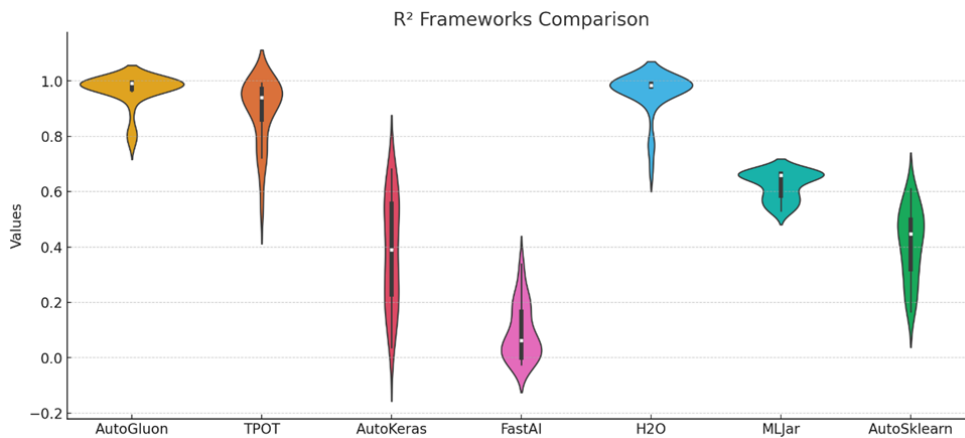
Η συγκριτική αξιολόγηση των αλγορίθμων PPO, SAC, A2C και DDPG ανέδειξε σημαντικές διαφορές στην απόδοσή τους ανάλογα με το περιβάλλον και την παρουσία καθυστέρησης στην ανταμοιβή. Ο PPO ξεχώρισε ως ο πιο σταθερός και αποδοτικός αλγόριθμος, με υψηλή γενίκευση, γρήγορη σύγκλιση και ανθεκτικότητα, ιδίως σε Διορθωτικά περιβάλλοντα. Ο SAC, αν και πιο πολύπλοκος και απαιτητικός, επέδειξε εξαιρετική απόδοση σε δομημένα περιβάλλοντα αλλά υποχώρησε σημαντικά σε Μη-Διορθωτικά, παρουσιάζοντας αστάθεια και μειωμένη ικανότητα μάθησης. Ο A2C σημείωσε αργή αλλά σταθερή βελτίωση, με καλύτερη απόδοση χωρίς διόρθωση καθυστέρησης, ενώ ο DDPG απέτυχε σχεδόν σε όλα τα σενάρια λόγω κακής εξερεύνησης και πρώιμης σύγκλισης σε τοπικά άκρα. Γενικά, τα καλύτερα αποτελέσματα για όλους τους αλγορίθμους παρατηρούνται στα μέσα της εκπαίδευσης, υποδεικνύοντας κίνδυνο υπερεκπαίδευσης σε παρατεταμένη μάθηση. Η διόρθωση καθυστέρησης βελτίωσε την απόδοση των PPO και A2C, αλλά επιδείνωσε εκείνη του DDPG και δεν αντιστάθμισε την πτώση του SAC σε αδόμητα περιβάλλοντα. Οι διαφορές αυτές τονίζουν τη σημασία επιλογής κατάλληλου αλγορίθμου με βάση τη φύση του περιβάλλοντος και των δεδομένων.

#### Ακρίβεια και χρόνος εκτέλεσης AutoML αλγορίθμων

Η Εικόνα 38 παρουσιάζει ένα διάγραμμα βιολιού (violin plot) για τη σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης μεταξύ των πλαισίων AutoML για όλα τα μοντέλα. Το διάγραμμα βιολιού αποτελεί συνδυασμό διαγράμματος κουτιού (box plot) και εκτίμησης πυκνότητας μέσω πυρήνα (kernel density plot), καθώς απεικονίζει τόσο τα βασικά στατιστικά μέτρα όσο και την κατανομή της πυκνότητας των τιμών. Πιο συγκεκριμένα, το διάγραμμα συγκρίνει τις τιμές  $R^2$  ανάμεσα στα διάφορα AutoML frameworks για όλους τους συνδυασμούς χαρακτηριστικών. Κάθε «βιολί» αντιπροσωπεύει την κατανομή των τιμών  $R^2$  για ένα συγκεκριμένο πλαίσιο AutoML. Το πλάτος του βιολιού δείχνει την πυκνότητα των μοντέλων που πέτυχαν συγκεκριμένες τιμές  $R^2$ . Το λευκό σημείο στο εσωτερικό του βιολιού δείχνει τη διάμεσο τιμή  $R^2$  για το αντίστοιχο πλαίσιο, ενώ η παχιά μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει το ενδοτεταρτημοριακό εύρος (IQR), παρέχοντας εικόνα για τη μεταβλητότητα στην απόδοση.

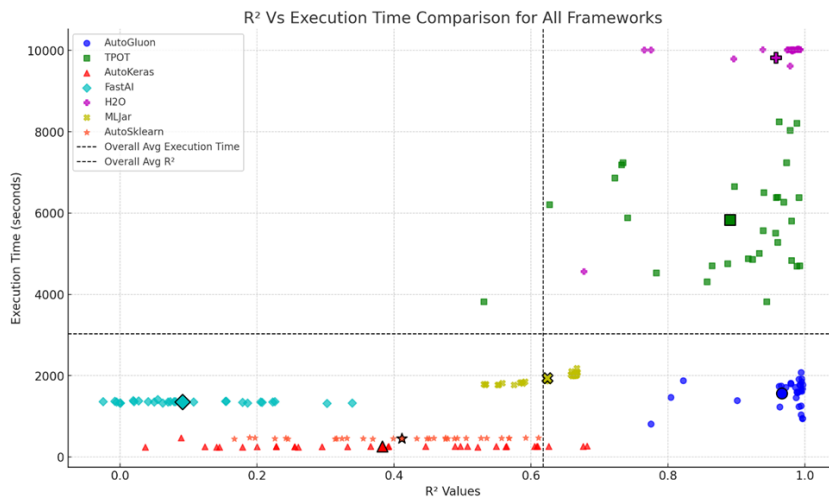
Η οπτικοποίηση αυτή αναδεικνύει τη διασπορά στην απόδοση των πλαισίων: Το AutoGluon παρουσιάζει συγκεντρωμένη κατανομή σε υψηλές τιμές  $R^2$ , επιτυγχάνοντας σταθερά σχεδόν άριστη ακρίβεια. Τα TPOT, H2O και MLjar εμφανίζουν ανταγωνιστικές διάμεσες τιμές  $R^2$ , αλλά με μεγαλύτερη διακύμανση στις επιδόσεις τους. Τα AutoKeras και FastAI παρουσιάζουν ευρύτερες κατανομές, με σημαντικό ποσοστό των τιμών  $R^2$  να βρίσκονται κάτω από τη διάμεσο, γεγονός που υποδηλώνει λιγότερο συνεπή απόδοση μεταξύ των μοντέλων τους.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 38 Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης μεταξύ των πλαισίων AutoML για όλα τα μοντέλα

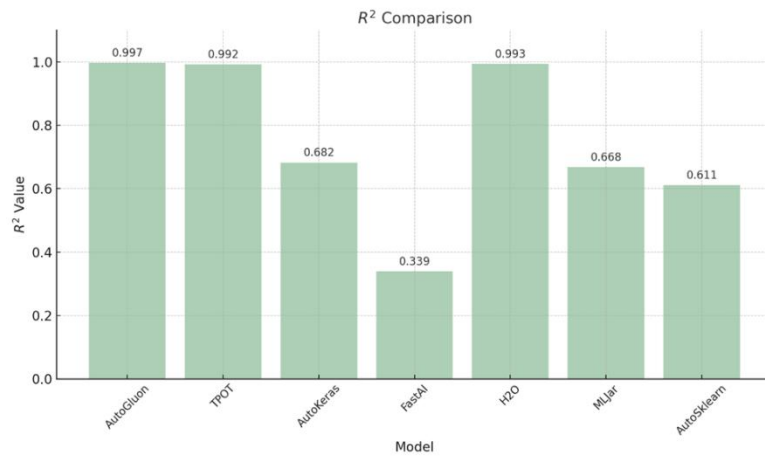
Η Εικόνα 39 παρουσιάζει ένα διάγραμμα διασποράς (scatter plot) για τη σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης και της προβλεπτικής ακρίβειας μεταξύ των πλαισίων AutoML. Το διάγραμμα απεικονίζει τη σύγκριση βάσει δύο βασικών μετρικών: Ακρίβεια ( $R^2$ ) στον άξονα Χ, Χρόνος εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) στον άξονα Υ. Κάθε πλαίσιο AutoML απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα και σχήμα δείκτη, ώστε να είναι ευδιάκριτο. Οι διακεκομμένες κατακόρυφες και οριζόντιες γραμμές αντιπροσωπεύουν, αντίστοιχα, τον μέσο όρο της ακρίβειας ( $R^2$ ) και τον μέσο χρόνο εκτέλεσης για όλα τα μοντέλα. Για την αξιολόγηση της απόδοσης των πλαισίων, θεωρούμε ως βέλτιστα τα μοντέλα που παρουσιάζουν υψηλή ακρίβεια (δηλαδή  $R^2$  μεγαλύτερο από τον μέσο όρο) και απαιτούν μικρότερο από τον μέσο χρόνο εκτέλεσης. Αυτό μεταφράζεται σε μοντέλα που εντοπίζονται στο κάτω δεξί τεταρτημόριο του διαγράμματος. Μεταξύ όλων των πλαισίων, το AutoGluon (μπλε κύκλοι) αναδεικνύεται ως το πλέον αποδοτικό.



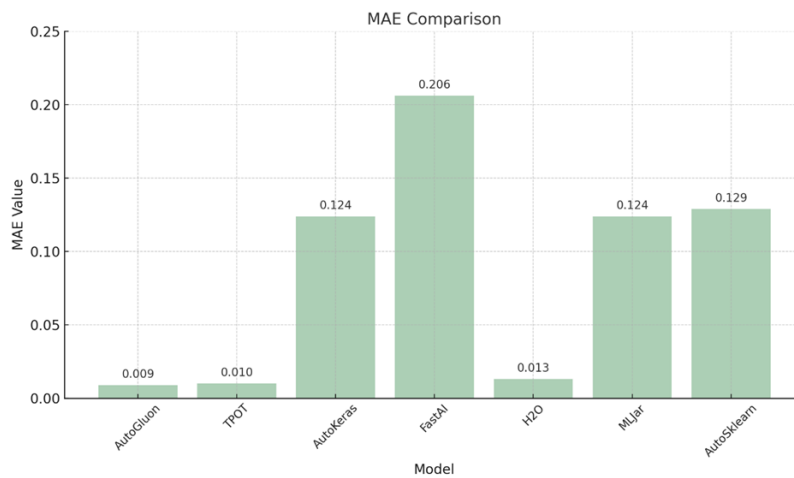
Εικόνα 39 Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML σε σχέση με την ακρίβεια πρόβλεψης

Η Εικόνα 40 παρουσιάζει τη σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης ( $R^2$ ) μεταξύ των πλαισίων AutoML, για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών (features) που επιτεύχθηκαν σε καθένα από αυτά. Η Εικόνα 41 παρουσιάζει τη σύγκριση του σφάλματος πρόβλεψης (MAE – Mean Absolute Error) για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών σε κάθε πλαίσιο AutoML. Η Εικόνα 42 παρουσιάζει τη σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών σε κάθε πλαίσιο AutoML.

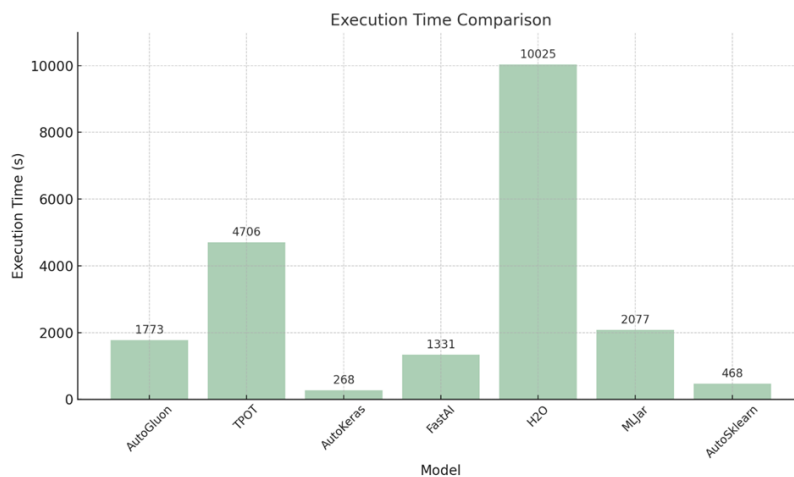
### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 40 Σύγκριση της ακρίβειας μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών



Εικόνα 41 Σύγκριση του σφάλματος μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών



Εικόνα 42 Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών

Εικόνα 20 Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης μεταξύ των πλαισίων AutoML για τους καλύτερους συνδυασμούς χαρακτηριστικών

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν το AutoGluon ως το πλαίσιο AutoML με την πιο ισορροπημένη απόδοση, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή ακρίβεια ( $R^2$  έως 0.997), χαμηλό σφάλμα ( $MAE \approx 0.009$ ) και σύντομο χρόνο εκτέλεσης. Η επιτυχία του οφείλεται στη στρατηγική πολυεπίπεδου συνδυασμού

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

μοντέλων (stacked ensembling), στη δυναμική επιλογή υπερπαραμέτρων και στη δυνατότητά του να επεξεργάζεται θορυβώδη και ετερογενή δεδομένα χωρίς εκτενή προεπεξεργασία. Το TPOΤ επίσης παρουσίασε υψηλή ακρίβεια, όμως ο μεγάλος χρόνος εκτέλεσης το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Το H2O AutoML εμφάνισε καλή ισορροπία μεταξύ απόδοσης και χρόνου, με επιπλέον πλεονέκτημα την ερμηνεία των μοντέλων του. Αντίθετα, τα AutoKeras και FastAI δεν απέδωσαν το ίδιο καλά, πιθανώς λόγω της έμφασης τους σε βαθιά μάθηση, η οποία δεν ευνοείται από τα συγκεκριμένα δομημένα δονητικά δεδομένα. Το MLJar είχε σταθερή, αλλά μέτρια απόδοση, με έμφαση στην ευχρηστία και στην ερμηνευσιμότητα. Το Auto-sklearn, παρότι αξιόπιστο για βασικά σενάρια, περιορίστηκε από την αποκλειστική χρήση μοντέλων scikit-learn και απουσία πιο σύγχρονων τεχνικών.

#### 2.10<sup>ο</sup>.2.3. KPI 4: Διάρκεια συντήρησης και Mean Time Between Failures (MTBF)

Πέρα από την προβλεπτική ακρίβεια, αξιολογήσαμε την επίδραση της λύσης σε βασικούς δείκτες συντήρησης και λειτουργίας κατά την υπό εξέταση περίοδο, στο σενάριο χρήσης ψυχρής έλασης το οποίο αφορούσε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον, ώστε να αναδειχθεί η πρακτική της αξία στη βιομηχανική ροή εργασίας. Μετά την εφαρμογή, ο αριθμός των αστοχιών μειώθηκε κατά περίπου 28% (από 96 σε 69 συμβάντα), οδηγώντας σε σημαντική μείωση του προγραμματιστού χρόνου διακοπής λειτουργίας. Η συνολική μηνιαία διάρκεια της προγραμματισμένης συντήρησης μειώθηκε από 2.340 λεπτά σε 1.670 λεπτά, υποδεικνύοντας πιο αποδοτικές και στοχευμένες παρεμβάσεις.

Επιπλέον, ο Μέσος Χρόνος Μεταξύ Βλαβών (MTBF) αυξήθηκε από 2.140 λεπτά σε 2.920 λεπτά, αντανakλώντας τη βελτιωμένη αξιοπιστία του εξοπλισμού, ενώ ο Μέσος Χρόνος Επισκευής (MTTR) μειώθηκε από 117 λεπτά σε 89 λεπτά, καταδεικνύοντας ταχύτερη αποκατάσταση μετά από βλάβες. Τέλος, η Συνολική Αποτελεσματικότητα του Εξοπλισμού (OEE) αυξήθηκε από 59,43% σε 64,46%, δηλαδή παρουσιάστηκε αύξηση κατά 5,03%.

Πριν από την εγκατάσταση του δικτύου αισθητήρων, οι εργασίες συντήρησης πραγματοποιούνταν με βάση χρονικό προγραμματισμό, με την αντικατάσταση εξαρτημάτων της μηχανής, όπως οι κύλινδροι, κάθε 8 ώρες. Σε περιπτώσεις πρόωρης αστοχίας, γινόταν επείγουσα αντικατάσταση. Δεδομένου ότι κάθε κύλινδρος κοστίζει περίπου 8.000 ευρώ, οι προβλεπόμενες εξοικονομήσεις κόστους σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα μπορεί να είναι σημαντικές. Οι μετρήσιμες αυτές βελτιώσεις επιβεβαιώνουν ότι η ενισχυμένη προβλεπτική ικανότητα συμβάλλει άμεσα τόσο στη λειτουργική αποδοτικότητα όσο και στη μείωση του κόστους συντήρησης, ενισχύοντας τα πρακτικά οφέλη και τη βιομηχανική σημασία της προτεινόμενης προσέγγισης.

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα, το σύστημα προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των απρογραμματιστων διακοπών λειτουργίας (downtime), γεγονός που μεταφράζεται σε αυξημένη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και μεγαλύτερη αξιοποίηση της παραγωγικής δυναμικότητας. Παράλληλα, επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση των κύκλων συντήρησης, με αποτέλεσμα λιγότερες αλλά πιο στοχευμένες παρεμβάσεις, και αποτελεσματικότερη χρήση ανταλλακτικών και ανθρώπινων πόρων.

Η δυνατότητα πρόβλεψης της φθοράς με μεγαλύτερη ακρίβεια οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού, αφού αποφεύγονται τόσο οι πρόωρες αντικαταστάσεις όσο και οι καθυστερημένες επεμβάσεις που οδηγούν σε βλάβες. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται μείωση του τεχνικού ρίσκου, καθώς οι μέθοδοι αυτές προσφέρουν βελτιωμένη πρόβλεψη σφαλμάτων και φθοράς, ακόμα και σε πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα εξοπλισμού. Η χρήση AutoML ενισχύει περαιτέρω αυτή την κατεύθυνση, καθώς επιτρέπει τη δημοκρατικοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης στη βιομηχανία, δίνοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης προηγμένων προγνωστικών μοντέλων χωρίς την ανάγκη για εξειδικευμένους μηχανικούς μηχανικής μάθησης.

Η αυτοματοποίηση ολόκληρης της διαδικασίας μηχανικής μάθησης επιταχύνει σημαντικά την υλοποίηση λύσεων predictive maintenance, καθιστώντας την εφαρμογή τους εφικτή σε μεγαλύτερη κλίμακα και σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται σημαντική αύξηση της λειτουργικής αποδοτικότητας, με βελτίωση του δείκτη OEE (Overall Equipment Effectiveness) και μείωση

Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον του συνολικού κόστους συντήρησης. Ο Πίνακας 17 παρουσιάζει μια σύνοψη του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων.

*Πίνακας 17 Συνεισφορά του συστήματος προβλεπτικής αναλυτικής δεδομένων*

<b>Πτυχή</b>	<b>Συνεισφορά</b>
Αξιοπιστία εξοπλισμού	Πρόβλεψη φθοράς με ακρίβεια και έγκαιρη παρέμβαση
Κόστος συντήρησης	Μείωση μέσω στοχευμένων επεμβάσεων και λιγότερων αστοχιών
Αξιοποίηση ανθρώπινου δυναμικού	Μειωμένη ανάγκη για συνεχή εμπλοκή ειδικών
Απόδοση παραγωγής	Μικρότερο downtime, μεγαλύτερη διαθεσιμότητα
Εκδημοκρατισμός ψηφιακών τεχνολογιών	AutoML επιτρέπει τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης από μη ειδικούς
Ανταγωνιστικότητα	Επιτάχυνση ψηφιακού μετασχηματισμού και βελτιστοποίηση λειτουργιών

## 2.10<sup>β</sup>. Μέθοδοι λήψης αποφάσεων στην παραγωγική διαδικασία – Σύστημα προβλεπτικού ελέγχου

Η συγκεκριμένη τεχνολογική λύση προσφέρει μια ολοκληρωμένη εργαλειοθήκη με στόχο τον σχεδιασμό και την υλοποίηση συστημάτων αυτόματου ελέγχου με χρήση μη γραμμικού ελεγκτή προβλεπτικού μοντέλου (Nonlinear Model Predictive Controller, NMPC) σε βιομηχανικό περιβάλλον. Η αρχιτεκτονική της λύσης και τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν γύρω από αυτή παρουσιάστηκαν εκτενώς στα παραδοτέα 2.1 και 2.2, ενώ η αναλυτική περιγραφή του συστήματος πιλοτικής εφαρμογής δόθηκε στο παραδοτέο 3.1. Στο παρόν παραδοτέο, θα επιχειρηθεί η αξιολόγηση και επικύρωση της τεχνολογικής λύσης πάνω στο εικονικό σύστημα παραγωγής νανοσωματιδίων αργύρου (Ag) μέσα από τρία σενάρια ελέγχου.

Η καινοτομία της εν λόγω λύσης εντοπίζεται κυρίως στην τεχνολογία αυτόματου ελέγχου που επιστρατεύτηκε, η οποία συνδυάζει αλγορίθμους μηχανικής μάθησης με μη γραμμικό προβλεπτικό έλεγχο. Μέσω αυτής της διάταξης, το σύστημα έχει τη δυνατότητα να αξιοποιεί δεδομένα πεδίου για τη δημιουργία πολύπλοκων δυναμικών μοντέλων υψηλής ακρίβειας και ταυτόχρονα να εφαρμόζει προηγμένες στρατηγικές ελέγχου που μπορούν να προσαρμοστούν σε μη γραμμικές και μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Παρόλο που στην ανάπτυξη της λύσης συμπεριλαμβάνεται και η συνδεσμολογία του ελεγκτή MPC-RBF με τη διεργασία μέσω συμβατών βιομηχανικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, η αξιολόγηση θα επικεντρωθεί στο θεωρητικό υπόβαθρο της λύσης, και ειδικότερα στη συμπεριφορά του προτεινόμενου ελεγκτή στα τρία σενάρια ελέγχου. Τα υπόλοιπα μέρη της αρχιτεκτονικής, αν και κρίσιμα για την ολοκλήρωση του συστήματος, δεν αποτελούν το αντικείμενο ανάλυσης εδώ.

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Ένα από τα θεμελιώδη κριτήρια αξιολόγησης των συστημάτων αυτόματου ελέγχου είναι η ικανότητά τους να παρακολουθούν το σημείο αναφοράς (set-point tracking) που επιβάλλει ο χρήστης, οδηγώντας τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή με μικρό σφάλμα, γρήγορη απόκριση και χωρίς υπερβολικές ταλαντώσεις. Στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής, επιλέξαμε να εξετάσουμε τρία σενάρια που καλύπτουν διαφορετικές πτυχές του set-point tracking:

1. Παρακολούθηση σημείου αναφοράς (κλασικό σενάριο), το οποίο αξιολογεί τη βασική ικανότητα του ελεγκτή να ακολουθεί μεταβολές στην επιθυμητή τιμή.
2. Παρακολούθηση σημείου αναφοράς με θόρυβο μέτρησης (measurement noise), ώστε να εκτιμηθεί η ανθεκτικότητα του συστήματος σε σήματα με αβεβαιότητα και διαταραχές.
3. Παρακολούθηση σημείου αναφοράς με σφάλμα μοντέλου (model mismatch), όπου εξετάζεται η απόδοση του ελεγκτή όταν το μαθηματικό μοντέλο διαφέρει από τη δυναμική της πραγματικής διεργασίας.

### Σενάριο 1: Set-point Tracking με επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm

Το σύστημα πιλοτικής εφαρμογής που παρουσιάστηκε στο παραδοτέο 3.1 αφορά διεργασία παραγωγής νανοσωματιδίων Ag, η οποία υλοποιείται σε εικονικό περιβάλλον προσομοίωσης στο MATLAB. Στο πλαίσιο αυτό, ο ελεγκτής καλείται να παρακολουθεί την τιμή αναφοράς της μέσης διαμέτρου των παραγόμενων νανοσωματιδίων (ρυθμιζόμενη μεταβλητή), εξασφαλίζοντας ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία.

Η αρχική κατάσταση ισορροπίας του συστήματος αντιστοιχεί σε διάμετρο 62,98 nm. Γύρω από αυτή την περιοχή συλλέχθηκαν τα δεδομένα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου RBF το οποίο τροφοδοτεί τον ελεγκτή. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε ένα περιορισμένο εύρος λειτουργίας, αντανακλώντας την τυπική συμπεριφορά της διεργασίας κοντά στο σημείο ισορροπίας. Για τα σενάρια δοκιμών που εξετάζονται (1, 2 και 3), ορίζεται ως τιμή αναφοράς η διάμετρος των 80 nm. Η επιλογή αυτή έχει ως στόχο τη διερεύνηση της απόδοσης του ελεγκτή σε μια περιοχή αρκετά απομακρυσμένη από την περιοχή μοντελοποίησης.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### Σενάριο 2: Set-point Tracking με επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm παρουσία θορύβου

Στο σενάριο 2 χρησιμοποιείται η ίδια τιμή αναφοράς για τη διάμετρο (80 nm), αλλά στη μέτρηση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής που διαβάζει ο ελεγκτής MPC-RBF,  $d_{measured}$ , προστίθεται τυχαίος θόρυβος, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$d_{measured}(t) = d(t) + \sigma \cdot \eta(t)$$

Όπου  $d(t)$  είναι η πραγματική διάμετρος,  $\sigma = 0.5\text{nm}$  η τυπική απόκλιση του θορύβου και  $\eta(t) \sim N(0,1)$  τυχαία μεταβλητή από κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή μηδέν και διασπορά ίση με 1.

Με τον τρόπο αυτό, κάθε μέτρηση αποκτά μια τυχαία απόκλιση γύρω από την πραγματική τιμή, προσομοιώνοντας τις αβεβαιότητες που συναντώνται σε πραγματικές συνθήκες μέτρησης.

#### Σενάριο 3: Set-point Tracking με επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm με σφάλμα μοντέλου

Στο τρίτο σενάριο εξετάζεται η ανθεκτικότητα (robustness) του ελεγκτή απέναντι σε μόνιμο σφάλμα μοντελοποίησης (model mismatch). Για να επιτύχουμε αυτή τη συνθήκη, μεταβάλλουμε κατά +20% μια κινητική σταθερά που επηρεάζει τον ρυθμό αύξησης της διαμέτρου των νανοσωματιδίων στο μοντέλο της διεργασίας (plant), επηρεάζοντας κατ' επέκταση την ταχύτητα με την οποία το σύστημα φθάνει στη νέα ισορροπία. Χωρίς επανεκπαίδευση, το μοντέλο RBF που χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή έχει αναπτυχθεί πάνω σε διαφορετική δυναμική από εκείνη που συναντά στην πράξη.

Με αυτά τα τρία σενάρια που συνοψίζονται και στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 18) καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα συνθηκών που επιτρέπουν ουσιαστική αξιολόγηση της λύσης, τόσο σε ιδανικές όσο και σε πιο ρεαλιστικές καταστάσεις λειτουργίας.

Πίνακας 18 Σενάρια Χρήσης και Επίδειξης Λειτουργίας για την λύση 10B

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

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ελεγκτή, εκτός από τα διαγράμματα αποκρίσεων που προσφέρει η πλατφόρμα διεπαφής με τον χρήστη, θα χρησιμοποιηθούν και τέσσερις δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) που παρουσιάζονται παρακάτω:

1. KPI1 - Τελική απόκλιση από το σημείο αναφοράς (Offset): Εκφράζει το τελικό μόνιμο σφάλμα μεταξύ της πραγματικής τιμής της ρυθμιζόμενης μεταβλητής και της επιθυμητής τιμής αναφοράς (setpoint).
2. KPI2 - Τυπική απόκλιση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής (Standard Deviation, SD): Αξιολογεί τη διασπορά της μεταβλητής γύρω από τη μέση τιμή, ως μέτρο ευστάθειας και ομαλότητας της διεργασίας.
3. KPI3 - Χρόνος αποκατάστασης (Settling Time): Ο χρόνος που απαιτείται ώστε η απόκριση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής να παραμείνει εντός προκαθορισμένης ζώνης σφάλματος γύρω από το σημείο αναφοράς μετά από μεταβολή ή διαταραχή (επιλέγεται ζώνη σφάλματος 2%).

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

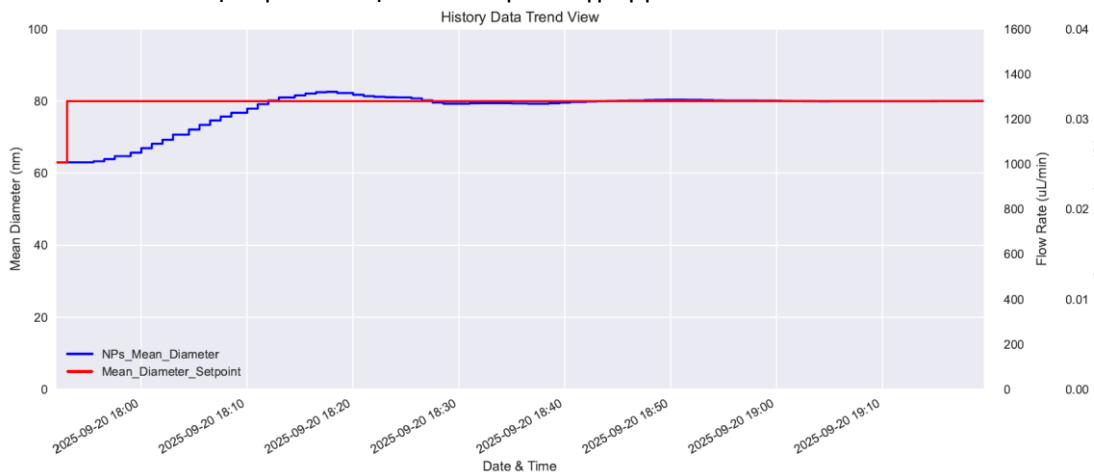
4. KPI4 - Υπερύψωση/Υποβύθιση (%) (Overshoot/Undershoot, O/U): Εκφράζει τη μέγιστη θετική ή αρνητική απόκλιση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής κατά τη μετάβαση στη νέα κατάσταση ισορροπίας, ως ποσοστό του νέου σημείου αναφοράς.

Για την αξιολόγηση της απόδοσης μέσω των KPIs γίνεται σύγκριση των δεικτών για τα τρία σενάρια του MPC-RBF με δείκτες που προκύπτουν από την εφαρμογή κλασικών ελεγκτών PID πάνω στο ίδιο μοντέλο προσομοίωσης. Οι ελεγκτές PID χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία λόγω της απλότητας, του χαμηλού τους κόστους και της ικανοποιητικής απόδοσης σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Ωστόσο, σε συστήματα με μεγάλες καθυστερήσεις, ισχυρές μη γραμμικές ή και πολλαπλές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις μεταβλητές, η βαθμονόμηση τους είναι ιδιαίτερα απαιτητική και η εφαρμογή τους μπορεί να οδηγήσει σε αστάθειες. Αντίθετα, ο ελεγκτής MPC που παρουσιάζεται στην προτεινόμενη λύση μπορεί να χειριστεί έντονες αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεταβλητών και να ενσωματώσει σύνθετους περιορισμούς, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών λύσεων.

Για τους PID ελεγκτές θα παρουσιαστούν οι τιμές των KPI πάνω στα ίδια σενάρια ελέγχου, χρησιμοποιώντας το περιβάλλον προσομοίωσης της διεργασίας που έχει αναπτυχθεί στο MATLAB. Η συγκριτική αυτή ανάλυση έχει ως στόχο να αναδείξει τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης προσέγγισης σε σχέση με πιο παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου που εφαρμόζονται στον βιομηχανικό χώρο.

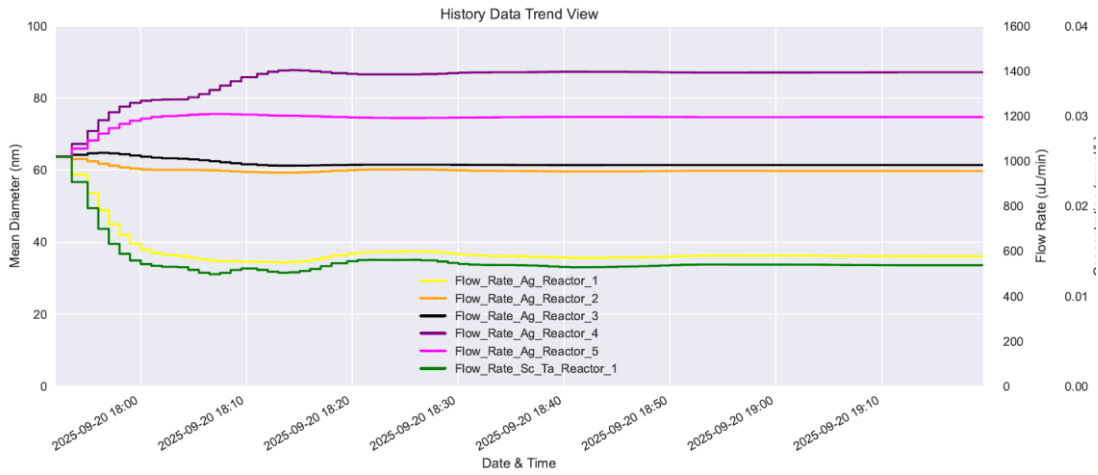
#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Γίνεται η προσομοίωση και των τριών σεναρίων ελέγχου στη πλατφόρμα διεπαφής με το χρήστη, και μέσω του περιβάλλοντος SCADA που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια της λύσης, αποθηκεύονται τα διαγράμματα των αποκρίσεων για τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή και τις μεταβλητές εκ χειρισμού για τον ελεγκτή MPC-RBF. Ακολουθεί η παρουσίαση των εν λόγω διαγραμμάτων.



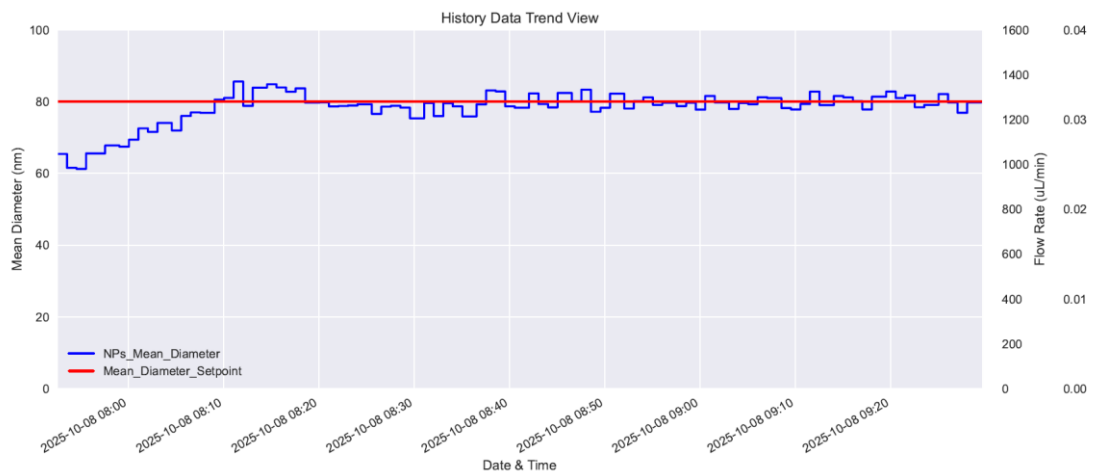
(α) Απόκριση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής (αριστερός κατακόρυφος άξονας με μονάδες μέτρησης 'nm')

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

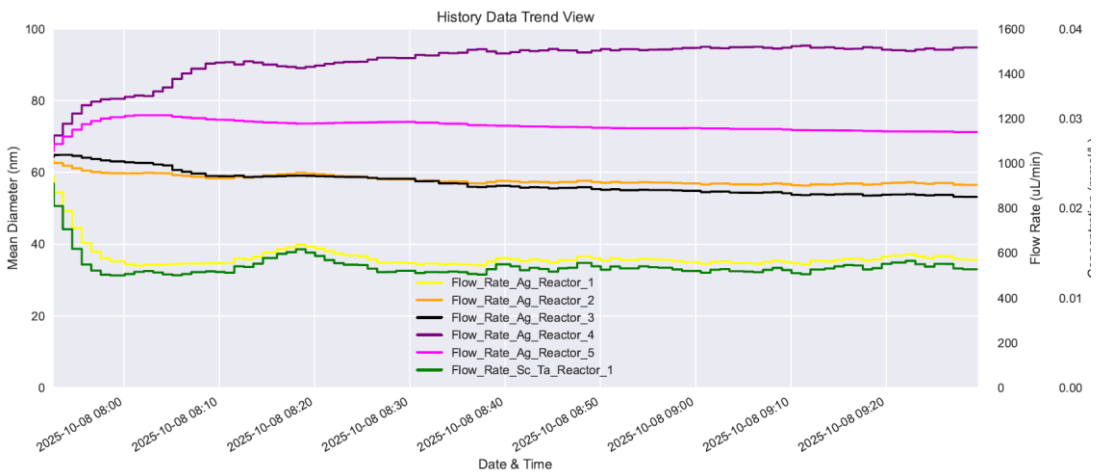


(β) Απόκριση των μεταβλητών εκ χειρισμού (μεσαίος κατακόρυφος άξονας με μονάδες μέτρησης 'uL/min')

Εικόνα 43 Σενάριο 1 - Set-point Tracking για επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm.



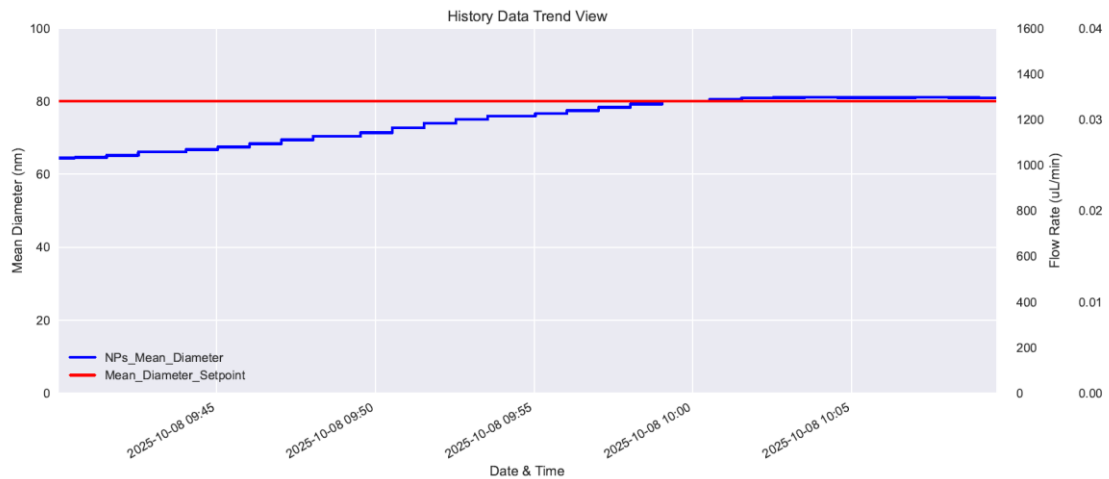
(α) Απόκριση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής (αριστερός κατακόρυφος άξονας με μονάδες μέτρησης 'nm')



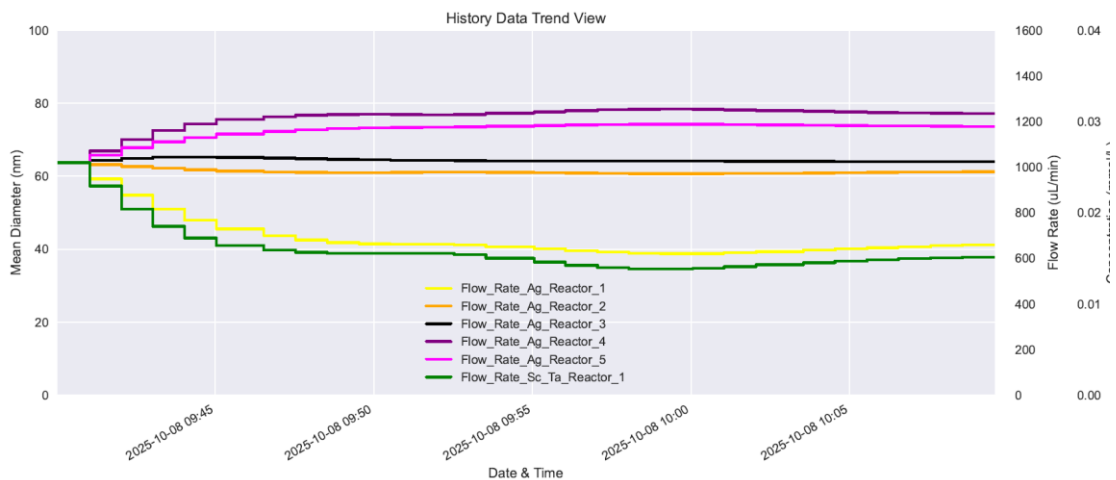
(β) Απόκριση των μεταβλητών εκ χειρισμού (μεσαίος κατακόρυφος άξονας με μονάδες μέτρησης 'uL/min')

Εικόνα 44 Σενάριο 2 - Set-point Tracking για επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm παρουσία θορύβου στη μέτρηση.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



(α) Απόκριση της ρυθμιζόμενης μεταβλητής (αριστερός κατακόρυφος άξονας με μονάδες μέτρησης 'nm')



(β) Απόκριση των μεταβλητών εκ χειρισμού (μεσαίος κατακόρυφος άξονας με μονάδες μέτρησης 'uL/min')

Εικόνα 45 Σενάριο 3 - Set-point Tracking για επιθυμητή διάμετρο ίση με 80nm με σφάλμα μοντελοποίησης.

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τα ιστορικά δεδομένα που καταγράφει η πλατφόρμα υπολογίζονται οι δείκτες KPI που παρουσιάστηκαν παραπάνω, και συγκρίνονται με τους αντίστοιχους δείκτες για το σύστημα ελέγχου με ελεγκτές PID που υλοποιείται σε περιβάλλον προσομοίωσης. Η συνολική καταγραφή των δεικτών γίνεται στον παρακάτω πίνακα και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

Πίνακας 19 Τιμές δεικτών απόδοσης KPI για την αξιολόγηση του ελεγκτή και σύγκριση με παραδοσιακούς ελεγκτές τύπου PID

KPIs	Σενάρια Ελέγχου					
	1) Set-point Tracking		2) Set-point Tracking παρουσία θορύβου		3) Set-point Tracking με σφάλμα μοντελοποίησης	
	NMPC-RBF	PIDs	NMPC-RBF	PIDs	NMPC-RBF	PIDs
KP1 (nm)	-0.14	-0.28	-0.54	-0.91	-0.13	-0.15
KP2 (nm)	4.35	5.92	4.39	5.93	4.25	5.46
KP3 (min)	15	52	30	75	20	34
KP4 (%)	O = 1.49%	O = 5.64%	O = 2.17%	O = 5.89%	O = 2.48%	O = 5.02%
	U = 0.53%	U = 2.58%	U = 1.56%	U = 3.78%	U = 0.55%	U = 1.82%

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Στα διαγράμματα των τριών σεναρίων φαίνεται ότι ο ελεγκτής MPC-RBF καταφέρνει με συνέπεια να οδηγήσει τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή στο σημείο αναφοράς. Στο Σενάριο 1 που παρουσιάζεται στην

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Εικόνα 43, η μέση διάμετρος προσεγγίζει γρήγορα την επιθυμητή τιμή (80 nm), με ελάχιστο σφάλμα και χωρίς υπερβολικές ταλαντώσεις. Αντίστοιχα, στο Σενάριο 3 στην Εικόνα 45, παρόλο που υπάρχει σφάλμα μοντελοποίησης, ο ελεγκτής προσαρμόζεται χρησιμοποιώντας το σήμα ανατροφοδότησης και οδηγεί εν τέλει το σύστημα στην επιθυμητή κατάσταση ισορροπίας. Αυτή η ανθεκτικότητα απέναντι σε αποκλίσεις μεταξύ του μοντέλου και της διεργασίας οφείλεται στη φύση του MPC, ο οποίος επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης κάθε χρονική στιγμή, αναπροσαρμόζοντας τη λύση με βάση τις πραγματικές συνθήκες. Όσον αφορά το Σενάριο 2 στην Εικόνα 44, παρά τη παρουσία τυχαίου θορύβου στη μέτρηση της διαμέτρου, ο ελεγκτής καταφέρνει να καθοδηγήσει και να διατηρήσει τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή κοντά στον στόχο των 80 nm, αποφεύγοντας ακραίες ταλαντώσεις στα σήματα ελέγχου. Σε κάθε σενάριο, οι μεταβλητές εκ χειρισμού διατηρούνται μέσα στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας, καταδεικνύοντας την ικανότητα του MPC να συμπεριλαμβάνει πολλαπλούς, γραμμικούς και μη γραμμικούς, περιορισμούς στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Τα αποτελέσματα που συγκεντρώνονται στον Πίνακα 19 για τους δείκτες KPI επιβεβαιώνουν την υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης έναντι των PID πάνω σε ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης, με πολλαπλές μη γραμμικές αλληλεξαρτήσεις και περιορισμούς. Σε καθένα από τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν, ο MPC-RBF σημειώνει μικρότερη τελική απόκλιση ανάμεσα στην επιθυμητή τιμή αναφοράς και το τελικό σημείο ισορροπίας της ρυθμιζόμενης μεταβλητής (δείκτης KPI1). Αντίστοιχα, η ρυθμιζόμενη μεταβλητή στον MPC παρουσιάζει χαμηλότερη τυπική απόκλιση από την αναφορά (δείκτης KPI2), ενώ οι χρόνοι αποκατάστασης στους παραδοσιακούς PID είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους χρόνους της προτεινόμενης μεθοδολογίας (KPI3). Τέλος, οι μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις της διαμέτρου είναι σταθερά μικρότερες για τον MPC σε σχέση με τους PIDs (δείκτης KPI4), γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις τιμές του δείκτη KPI2.

Συνολικά, η ανάλυση των σεναρίων και των KPIs καταδεικνύει ότι ο MPC-RBF προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα έναντι των PID, όχι μόνο ως προς την ταχύτητα και την ακρίβεια παρακολούθησης, αλλά και ως προς τη σταθερότητα της διεργασίας και τη διαχείριση περιορισμών. Η χρήση του μη γραμμικού μοντέλου RBF επιτρέπει την καλύτερη αναπαράσταση της δυναμικής της διεργασίας σε σχέση με τις κλασικές γραμμικές προσεγγίσεις, ενισχύοντας περαιτέρω την απόδοση του ελεγκτή. Εν κατακλείδι, η δυνατότητα του MPC να λαμβάνει υπόψη αλληλεπιδράσεις, να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και να εξασφαλίζει ομαλή λειτουργία ακόμη και όταν υπάρχει ανακρίβεια στο μοντέλο ή έντονη παρουσία θορύβου, τον καθιστά μια αξιόπιστη και αποδοτική λύση για πολύπλοκα βιομηχανικά συστήματα.

## 2.11. Μοντελοποίηση και προσομοίωση δικτύων εφοδιασμού και διανομής

Η συγκεκριμένη λύση, όπως έχει περιγραφεί αναλυτικά στο Παραδοτέο Π3.1, περιλαμβάνει την ανάπτυξη του ψηφιακού διδύμου τμήματος της αποθηκευτικής διάταξης μεγάλου Κέντρου Διανομής και διαδικτυακής πλατφόρμα ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων που συλλέγονται από τους αυτοματισμούς, το πληροφοριακό σύστημα WMS και το ψηφιακό μοντέλο προσομοίωσης της -υπό μελέτη- αποθηκευτικής διάταξης. Στόχος είναι η υποστήριξη της λειτουργίας και της λήψης διοικητικών αποφάσεων σε σύγχρονα κέντρα διανομής. Σε συνέχεια της περιγραφής της λύσης, που έλαβε χώρα στο Παραδοτέο 3.1, στο παρόν παραδοτέο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων ελέγχου και αξιολόγησης της λύσης σε εργαστηριακό περιβάλλον, με στόχο την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων και την ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση της επίδοσής τους σε σχέση με τους προκαθορισμένους Δείκτες Απόδοσης (KPIs). Τα σενάρια ελέγχου βασίστηκαν στα σενάρια χρήσης που ορίστηκαν στο Παραδοτέο Π3.1 και εκτελέστηκαν με τη χρήση πραγματικών και συνθετικών δεδομένων ίδιου μορφότυπου με εκείνα της αποθηκευτικής διάταξης που περιγράφεται στο Παραδοτέο Π3.1, εξασφαλίζοντας ρεαλιστικές συνθήκες αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, η αξιολόγηση της λύσης επικεντρώθηκε στους ακόλουθους δείκτες απόδοσης:

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

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Τα σενάρια ελέγχου και αξιολόγησης της προτεινόμενης λύσης υλοποιήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον και οργανώθηκαν σε τρεις κατηγορίες, μια για κάθε προκαθορισμένο Δείκτη Απόδοσης (KPI), με στόχο την επιβεβαίωση του. Τα Σενάρια Ελέγχου Α και Β βασίστηκαν σε πραγματικά δεδομένα λειτουργίας του κέντρου διανομής, τα οποία καλύπτουν χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων κατά τον μήνα Σεπτέμβριο 2025, ενώ το Σενάριο Ελέγχου Γ αξιοποίησε ιστορικά δεδομένα μεγαλύτερου χρονικού εύρους, καλύπτοντας αρκετούς μήνες λειτουργίας και αξιολογήθηκε από τον τελικό επιχειρησιακό χρήστη, με βάση την εμπειρία χρήσης του συστήματος.

#### Σενάριο Ελέγχου Α – Διαχείριση και ανάλυση σφαλμάτων αυτοματισμού (KPI1)

Το Σενάριο Ελέγχου Α επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της λειτουργίας της πλατφόρμας ως προς τη διαχείριση και ανάλυση σφαλμάτων των αυτοματοποιημένων συστημάτων αποθήκευσης παλετών και κιβωτίων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα σφαλμάτων που καταγράφηκαν στο κέντρο διανομής κατά τη διάρκεια δύο συνεχόμενων εβδομάδων λειτουργίας τον μήνα Σεπτέμβριο.

Κατά τον έλεγχο, επαληθεύτηκε η ορθή εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων από την πλατφόρμα, ο υπολογισμός της χρονικής διάρκειας κάθε σφάλματος και η οπτικοποίησή τους μέσω των αντίστοιχων dashboards. Παράλληλα, αξιολογήθηκε η δυνατότητα διάκρισης των σφαλμάτων ανά κατηγορία αυτοματισμού (π.χ. AGVs, ραουλόδρομοι), καθώς και η υποστήριξη ειδοποιήσεων σε περιπτώσεις σφαλμάτων αυξημένης προτεραιότητας. Το σενάριο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση του KPI1, που αφορά τον μέσο χρόνο επίλυσης σφαλμάτων αυτοματισμού.

#### Σενάριο Ελέγχου Β – Αξιολόγηση παραγωγικότητας εργασιών μέσω Ψηφιακού Διδύμου (KPI2)

Το Σενάριο Ελέγχου Β σχεδιάστηκε για την αξιολόγηση της συμβολής του Ψηφιακού Διδύμου στην αύξηση της παραγωγικότητας των εργασιών της αποθηκευτικής διάταξης. Και σε αυτή την περίπτωση, η αξιολόγηση βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα λειτουργίας του κέντρου διανομής, τα οποία κάλυπταν χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων τον μήνα Σεπτέμβριο. Τα δεδομένα περιλάμβαναν πληροφορίες σχετικά με παραλαβές, αποστολές, πλήθος παλετών και αρχικά προβλεπόμενες βάρδιες προσωπικού.

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στο Ψηφιακό Δίδυμο, το οποίο εκτέλεσε προσομοιώσεις για τις αντίστοιχες ημερομηνίες. Κατά τον έλεγχο, αξιολογήθηκε η ορθότητα των υπολογισμών που αφορούν την αξιοποίηση του προσωπικού και των περνοφόρων, ο εντοπισμός ωρών αιχμής και η εξαγωγή προτάσεων που σχετίζονται με τον αριθμό των εργαζομένων που απαιτούνται για

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

τη λειτουργία του συστήματος, με όρους ικανοποίησης απαιτήσεων υψηλής απόδοσης και παραγωγικότητας. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, επέτρεψε τον υπολογισμό της συνεισφοράς της λύσης στην υποστήριξη της παραγωγικότητας, όπως αυτή αποτυπώνεται στον δείκτη KPI2.

#### Σενάριο Ελέγχου Γ – Αξιολόγηση διαφάνειας και υποστήριξης αποφάσεων μέσω ιστορικών δεδομένων (KPI3)

Το Σενάριο Ελέγχου Γ επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της διαφάνειας των εργασιών και της υποστήριξης της λήψης διοικητικών αποφάσεων, μέσω της ανάλυσης ιστορικών δεδομένων και της χρήσης της πλατφόρμας από τελικό χρήστη. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, το συγκεκριμένο σενάριο βασίστηκε σε ιστορικά δεδομένα που κάλυπταν χρονικό διάστημα αρκετών μηνών λειτουργίας της αποθήκης, επιτρέποντας τη μελέτη διαχρονικών τάσεων.

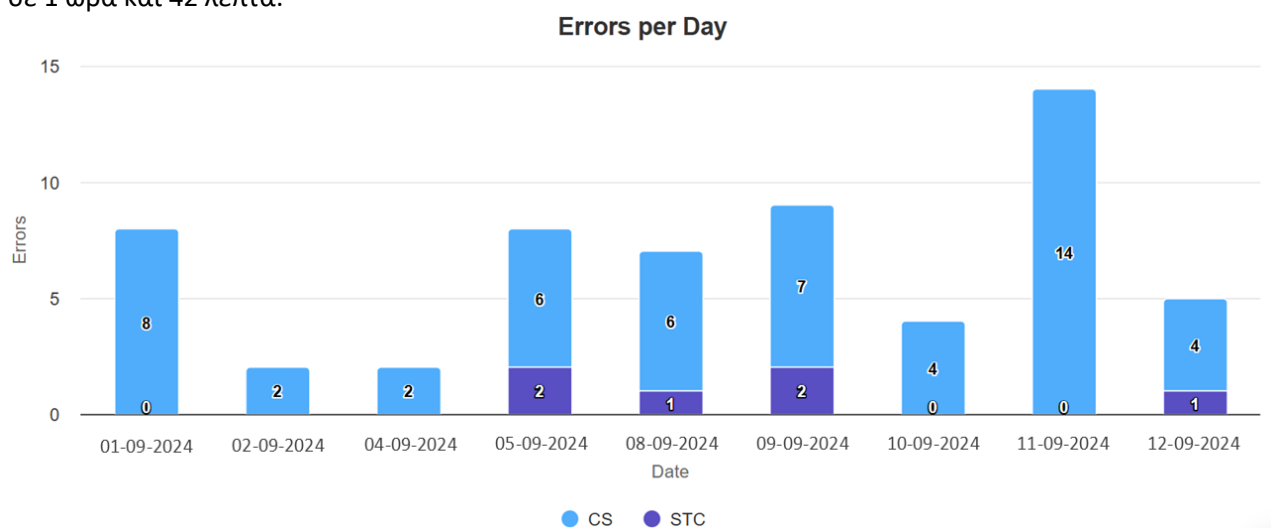
Τα δεδομένα προήλθαν τόσο από το κεντρικό πληροφοριακό σύστημα της αποθήκης (WMS), για τις χειροκίνητες διαδικασίες, όσο και από το πληροφοριακό σύστημα του αυτοματισμού αποθήκευσης κιβωτίων, για τις διαδικασίες συλλογής με τη μέθοδο goods-to-picker. Κατά τον έλεγχο, αξιολογήθηκε η δυνατότητα της πλατφόρμας να συγκεντρώνει, αναλύει και οπτικοποιεί μεγάλο όγκο δεδομένων, προσφέροντας στον χρήστη μια ενιαία και διαχρονική εικόνα της λειτουργικής συμπεριφοράς της αποθήκης.

Το σενάριο υλοποιήθηκε με τη συμμετοχή τελικού χρήστη, στελέχους του κέντρου διανομής, ο οποίος αξιοποίησε τις αντίστοιχες υπηρεσίες της πλατφόρμας για την αξιολόγηση της παραγωγικότητας και την κατανόηση των επιχειρησιακών δεδομένων. Ο χρήστης αξιοποίησε το σύνολο των δυνατοτήτων της πλατφόρμας και όλα τα σχετικά φίλτρα, αποκομίζοντας σημαντική εμπειρία αλλά ταυτόχρονα βοηθώντας και την ομάδα ανάπτυξης να προβεί σε μικρές διορθώσεις, όπου αυτό κρίθηκε σκόπιμο. Όπως, επιβεβαιώθηκε από τον τελικό χρήστη η συμβολή της λύσης στη βελτίωση της διαφάνειας των εργασιών και στην υποστήριξη τεκμηριωμένων διοικητικών αποφάσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική, και καλύπτει τις απαιτήσεις του δείκτη KPI3, όπως αυτός έχει οριστεί στο Παραδοτέο 1.1.

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

##### Επιβεβαίωση KPI1 - Σενάριο Ελέγχου Α

Κατά την εκτέλεση του Σεναρίου Ελέγχου Α καταγράφηκαν συνολικά 59 σφάλματα στους αυτοματισμούς που απαιτήσαν παρέμβαση του τεχνικού προσωπικού του Κέντρου Διανομής. Στην Εικόνα 46 παρουσιάζεται γράφημα με τη διακύμανση του πλήθους των σημαντικών σφαλμάτων ανά ημέρα. Για κάθε καταγεγραμμένο σφάλμα, η πλατφόρμα υπολόγισε αυτόματα τη χρονική διάρκεια επίλυσης, βάσει της χρονικής στιγμής εμφάνισης και της χρονικής στιγμής αποκατάστασης. Ο υπολογισμός αυτός επέτρεψε τον προσδιορισμό του KPI1, ο οποίος για την εξεταζόμενη περίοδο ανήλθε σε 1 ώρα και 42 λεπτά.



Εικόνα 46 Σφάλματα αυτοματισμών ανά ημέρα

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Κατά την ανάλυση των πραγματικών δεδομένων λειτουργίας του κέντρου διανομής για την εξεταζόμενη περίοδο, παρατηρήθηκε ότι ο μέσος χρόνος ενημέρωσης του τεχνικού προσωπικού για την εμφάνιση νέου σφάλματος ήταν της τάξης των 10 λεπτών. Επιπλέον, σε 3 από τα 59 καταγεγραμμένα σφάλματα, απαιτήθηκε πρόσθετη επικοινωνία και συλλογή επιπλέον στοιχείων πριν την επίλυση. Η παρατήρηση αυτή ανέδειξε ένα λειτουργικό κενό στη διαδικασία συντήρησης, το οποίο η προτεινόμενη λύση στοχεύει να αντιμετωπίσει μέσω της αυτόματης αποστολής εξατομικευμένων ειδοποιήσεων με δομημένες πληροφορίες για το σφάλμα. Στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής, επιβεβαιώθηκε σε εργαστηριακό επίπεδο η δυνατότητα της λύσης να παρέχει άμεση και πληρέστερη ενημέρωση, γεγονός που δυνητικά μπορεί να συμβάλει στη μείωση του συνολικού χρόνου επίλυσης σφαλμάτων κατά περίπου 10%.

Η ολοκλήρωση του σεναρίου ελέγχου επιβεβαιώνει ότι η προτεινόμενη λύση υποστηρίζει αξιόπιστα την παρακολούθηση και ανάλυση σφαλμάτων αυτοματισμού, συμβάλλοντας στη μέτρηση και βελτίωση του μέσου χρόνου επίλυσης, όπως ορίζεται από τον δείκτη KPI1.

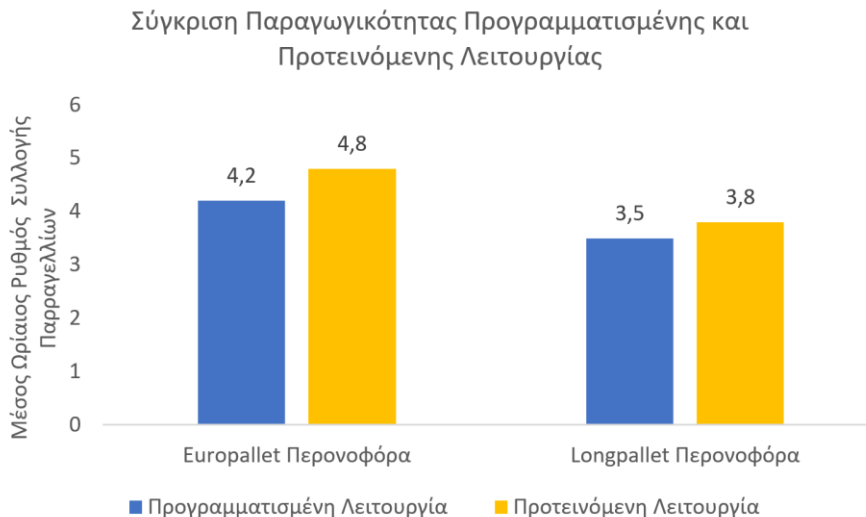
#### Επιβεβαίωση KPI2 - Σενάριο Ελέγχου Β

Η αξιολόγηση του δείκτη KPI2 πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Σεναρίου Ελέγχου Β, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης λειτουργίας της αποθηκευτικής διάταξης για δύο εναλλακτικά σενάρια:

- λειτουργία με την υφιστάμενη, προγραμματισμένη στελέχωση του προσωπικού και
- λειτουργία με τη στελέχωση που προκύπτει από την εφαρμογή των προτεινόμενων συστάσεων του Ψηφιακού Διδύμου.

Η σύγκριση αυτή επέτρεψε την αποτίμηση της επίδρασης των προτάσεων στη βελτίωση της παραγωγικότητας των διαδικασιών.

Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, η εφαρμογή των προτάσεων στελέχωσης και κατανομής πόρων οδήγησε σε αύξηση της παραγωγικότητας της διαδικασίας συλλογής παραγγελιών (KPI2) κατά 14,5% για την κατηγορία των Europallet Forklift και κατά 8% για την κατηγορία των Longpallet Forklift, όπως απεικονίζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα σύγκρισης της προγραμματισμένης και της προτεινόμενης λειτουργίας.



Εικόνα 47 Διάγραμμα σύγκρισης παραγωγικότητας διαδικασίας συλλογής παραγγελιών

Επιπλέον, σε συνολικό επίπεδο, η εφαρμογή των προτάσεων του Ψηφιακού Διδύμου οδήγησε σε αύξηση της ωριαίας διακίνησης παλετών (hourly pallet throughput) όλων των διαδικασιών κατά 12,7%. Η μεγαλύτερη βελτίωση παρατηρήθηκε στη διαδικασία της παραλαβής, όπου η προσομοίωση κατέδειξε αύξηση της παραγωγικότητας κατά 19,4%, γεγονός που υποδεικνύει τη σημαντική συμβολή της βελτιστοποιημένης κατανομής προσωπικού και πόρων στις διαδικασίες με υψηλό φόρτο εργασίας.

### Επιβεβαίωση KPI3 - Σενάριο Ελέγχου Β

Στο πλαίσιο του Σεναρίου Ελέγχου Γ, η αξιολόγηση του δείκτη KPI3 βασίστηκε όχι μόνο στη λειτουργική επάρκεια της πλατφόρμας, αλλά και στη χρήση της σε πραγματικές συνθήκες από τον τελικό χρήστη, στέλεχος του κέντρου διανομής. Ο τελικός χρήστης χρησιμοποίησε τις αντίστοιχες υπηρεσίες της πλατφόρμας για την αξιολόγηση της παραγωγικότητας των εργαζομένων και την κατανόηση της κατανομής των εργασιών στις χειροκίνητες διαδικασίες της αποθήκης.

Κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης, ο χρήστης εισήγαγε δεδομένα στην πλατφόρμα είτε απευθείας μέσω των διαθέσιμων μηχανισμών εισαγωγής αρχείων, είτε αποστέλλοντας τα δεδομένα στην ομάδα ανάπτυξης, η οποία τα φόρτωνε μαζικά μέσω προκαθορισμένου FTP φακέλου. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την ανάλυση μεγάλου όγκου ιστορικών δεδομένων και τη σταδιακή δημιουργία μιας συνεκτικής εικόνας της λειτουργίας της αποθήκης σε βάθος χρόνου.

Η πλατφόρμα χρησιμοποιήθηκε από το στέλεχος της επιχείρησης σε τακτική βάση για χρονικό διάστημα έξι μηνών, ως εργαλείο υποστήριξης της αξιολόγησης της παραγωγικότητας και της γενικότερης εποπτείας και ελέγχου της εγκατάστασης. Μέσω των διαθέσιμων dashboards και των δυναμικών φίλτρων της λύσης, ο χρήστης ήταν σε θέση να αποκτήσει άμεση εικόνα της απόδοσης των εργαζομένων, να εντοπίσει διαφοροποιήσεις μεταξύ βαρδιών και να αξιολογήσει την κατανομή του φόρτου εργασίας.

Από την εμπειρία που αποκομίστηκε κατά τη διάρκεια της πιλοτικής χρήσης, διαπιστώθηκε ότι η λύση υποστήριξε αποτελεσματικά την κατανόηση των ιστορικών δεδομένων και ενίσχυσε τη διαφάνεια των εργασιών εντός του αποθηκευτικού κέντρου. Η δυνατότητα συγκεντρωτικής και οπτικοποιημένης παρουσίασης των δεδομένων συνέβαλε στη διευκόλυνση της λήψης τεκμηριωμένων διοικητικών αποφάσεων, επιβεβαιώνοντας την επίτευξη του δείκτη KPI3 σε ποιοτικό επίπεδο.

### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η συνολική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πιλοτικής εφαρμογής της προτεινόμενης λύσης καταδεικνύει ότι οι βασικοί στόχοι που είχαν τεθεί επιτεύχθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό, τόσο σε επίπεδο λειτουργικότητας όσο και σε επίπεδο επιχειρησιακής αξίας.

Σε επίπεδο διαχείρισης σφαλμάτων αυτοματισμού (KPI1), επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα της λύσης να παρακολουθεί αξιόπιστα τη συχνότητα, τη διάρκεια και την κατανομή των σφαλμάτων ανά κατηγορία αυτοματισμού. Η οπτικοποίησή τους μέσω των dashboards παρείχαν σαφή εικόνα της κατάστασης των αυτοματισμών, ενώ η ενσωμάτωση μηχανισμών αποστολής ειδοποιήσεων ανέδειξε τη δυνατότητα βελτίωσης της διαδικασίας συντήρησης, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια διάγνωσης και επέμβασης. Αναφορικά με την παραγωγικότητα των εργασιών (KPI2), τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η αξιοποίηση των προτάσεων του Ψηφιακού Διδύμου μπορεί να οδηγήσει σε μετρήσιμη βελτίωση της παραγωγικότητας. Η αύξηση της παραγωγικότητας συνολικά στη λειτουργία του συστήματος, επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα της λύσης ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της στελέχωσης και της κατανομής πόρων. Σε ποιοτικό επίπεδο, η αξιολόγηση του δείκτη KPI3 ανέδειξε τη συμβολή της λύσης στη βελτίωση της διαφάνειας των εργασιών και στην ενίσχυση της κατανόησης της λειτουργίας του αποθηκευτικού κέντρου. Η συγκεντρωτική ανάλυση ιστορικών δεδομένων και η οπτικοποίησή τους μέσω της πλατφόρμας επέτρεψαν στον τελικό χρήστη να αξιολογήσει την απόδοση του ανθρώπινου δυναμικού και να αποκτήσει μια ενιαία εικόνα της λειτουργίας της εγκατάστασης που διοικεί, υποστηρίζοντας ταχύτερες και πιο τεκμηριωμένες διοικητικές αποφάσεις.

Η επιτυχής ολοκλήρωση των σεναρίων ελέγχου και αξιολόγησης επιβεβαιώνει τη λειτουργική ωριμότητα της λύσης και δημιουργεί ισχυρή βάση για τη μελλοντική αξιοποίησή της σε πραγματικό επιχειρησιακό περιβάλλον. Τέλος, η θετική ανταπόκριση και η ενεργή συμμετοχή των στελεχών του κέντρου διανομής κατά την πιλοτική χρήση της πλατφόρμας καταδεικνύουν ότι η λύση καλύπτει υπαρκτές ανάγκες και δύναται να αποτελέσει σημείο αναφοράς για περαιτέρω εξέλιξη και εφαρμογή.

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

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Για την υλοποίηση των σεναρίων ελέγχου και την αξιολόγηση της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε επίσκεψη σε μια αμιγώς ελληνική βιομηχανία, τη Milkplan, η οποία δραστηριοποιείται στον κλάδο της βιομηχανικής παραγωγής εξοπλισμού γαλακτοκομίας. Η επιλογή της συγκεκριμένης εταιρείας έγινε καθώς προσφέρει ένα ρεαλιστικό εργασιακό περιβάλλον, αντιπροσωπευτικό των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι εργαζόμενοι στη σύγχρονη βιομηχανία. Η ενσωμάτωση του πλαισίου αυτού στην ερευνητική διαδικασία επέτρεψε τη σύνδεση των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές συνθήκες εργασίας, ενισχύοντας τόσο την εγκυρότητα όσο και την πρακτική σημασία της μελέτης.

Η αξιολόγηση της εφαρμογής εικονικής εκπαίδευσης βασίστηκε σε συνδυασμό ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων, οργανωμένων σε δύο διακριτά στάδια, προκειμένου να επιτευχθεί μία πολυδιάστατη κατανόηση της εμπειρίας των εργαζομένων. Ο συνδυασμός αυτός επέτρεψε την αποτίμηση τόσο της συναισθηματικής και γνωστικής εμπλοκής όσο και της συνολικής αποδοχής της τεχνολογίας.

Το 1<sup>ο</sup> στάδιο αποτελείται από την απάντηση των τυχαίων ερωτήσεων που εμφανίζονται στο εικονικό περιβάλλον μετά το πέρας της εκπαίδευσης, όπου ο εργαζόμενος απαντάει σύντομα σε ερωτήσεις με κλίμακα 5-βάθμια κλίμακα Likert. Στο πρώτο αυτό στάδιο αναμένεται η συνοπτική καταγραφή της συναισθηματικής κατάστασης του εργαζόμενου (θετική, ουδέτερη, αρνητική). Το 2<sup>ο</sup> στάδιο αποτελούν οι ημιδομημένες συνεντεύξεις, αμέσως μετά την εκπαιδευτική διαδικασία, διάρκειας περίπου 15 λεπτών, όπου οι συμμετέχοντες περιέγραψαν με άνεση και ελευθερία την εμπειρία τους. Ο οδηγός συνέντευξης (Εικόνα 48) βασίστηκε στη βιβλιογραφία σχετικά με την πρόθεση υιοθέτησης των φορητών συσκευών μετά τη χρήση και μετρήθηκαν έξι παράγοντες όπως η ευκολία χρήσης, η απόλαυση, η εμπύθιση, η ικανοποίηση, η χρησιμότητα και η εσωτερική παρακίνηση.

### Μέρος Δεύτερο – Ημιδομημένος Οδηγός Συνέντευξης

«Θα ήθελα να μιλήσουμε λίγο για την εμπειρία σας με την τεχνολογία εκπαίδευσης μέσω VR στον εργασιακό σας χώρο. Δεν υπάρχει σωστό ή λάθος - ενδιαφερόμαστε να κατανοήσουμε πώς το βιώνετε εσείς. Θα σας κάνω κάποιες ερωτήσεις, αλλά θέλω να το δούμε περισσότερο σαν συζήτηση».

#### Ικανοποίηση (Satisfaction)

- Νιώθετε ικανοποιημένος/η από την ποιότητα των πληροφοριών που προσφέρει το VR στην εκπαίδευση;
- Πώς σας φάνηκε ο τρόπος που είναι σχεδιασμένο το περιβάλλον; Ήταν ευχάριστο οπτικά;
- Συνολικά, θα λέγατε ότι κάνει την εργασιακή εμπειρία πιο ενδιαφέρουσα ή όχι τόσο; Νιώθετε ότι σας βοηθά να κάνετε τη δουλειά σας πιο άνετα ή πιο αποτελεσματικά;
- Το σύστημα λειτούργησε σωστά τεχνικά; Υπήρξε κάποια δυσκολία με σταθερότητα ή ταχύτητα;

Εικόνα 48 Οδηγός συνέντευξης

Η διμερής αυτή προσέγγιση εξασφαλίζει την εγκυρότητα της αξιολόγησης, παρέχοντας τόσο άμεσα συναισθηματικά δεδομένα, όσο και σε βάθος ερμηνείες των εμπειριών, ενώ παράλληλα ενσωματώνει τυποποιημένες μετρήσεις εμπειρίας.

Μετά την ολοκλήρωση του σεναρίου εκπαίδευσης, πραγματοποιούνται ορισμένες ερωτήσεις στον χρήστη σχετικά με την διαδικασία. Ο εκπαιδευόμενος μεταφέρεται σε διαφορετικό ψηφιακό δωμάτιο στη Unity και απαντάει σε αυτές τις ερωτήσεις.



Εικόνα 49 Δωμάτιο ερωτήσεων στη Unity

Συγκεκριμένα έχει δημιουργηθεί ένα σύνολο 25 ερωτήσεων, 7 κατηγοριών όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 20. Έξι ερωτήσεις έχουν συνταχθεί για την κατηγορία “Χρησιμότητα”, πέντε ως προς την “Ικανοποίηση”, μία για το “Εγγενές Κίνητρο”, τρεις για την “Απορρόφηση”, τρεις για την “Απόλαυση” και επτά ερωτήσεις για την κατηγορία “Ευκολία Χρήσης”. Για κάθε εκπαιδευόμενο επιλέγεται τυχαία μία ερώτηση από κάθε κατηγορία.

Πίνακας 20 Ερωτήσεις και Κατηγορίες

A/A	Κατηγορία	Ερώτηση
1	Χρησιμότητα	Θα σας βοηθήσει η χρήση του VR κατά την εκπαίδευση να ολοκληρώσετε τις εργασίες σας πιο γρήγορα;
2		Η χρήση του VR στην εκπαίδευσή σας, θα βελτιώσει την απόδοσή σας στη δουλειά;
3		Η χρήση του VR στην εκπαίδευσή σας, θα αυξήσει την παραγωγικότητά σας;
4		Θα ενισχύσει την αποτελεσματικότητά σας στη δουλειά η χρήση του VR στην εκπαίδευσή σας;
5		Θα κάνει η χρήση του VR στην εκπαίδευσή σας, πιο εύκολη την δουλειά σας;
6		Είναι η εκπαίδευση με VR χρήσιμη για τη δουλειά σας;
7		Είστε ικανοποιημένος/η με την ποιότητα των πληροφοριών που παρέχει η εκπαίδευση μέσω VR;
8	Ικανοποίηση	Είστε ικανοποιημένος/η με τον σχεδιασμό της οπτικής διεπαφής του VR κατά την εκπαίδευσή σας;
9		Θα έκανε την εργασιακή σας εμπειρία πιο ενδιαφέρον η χρήση του VR κατά την εκπαίδευσή σας;
10		Θα μπορούσε η χρήση του VR να κάνει τη δουλειά σας καλύτερη και πιο άνετη;
11	Εγγενές Κίνητρο	Είστε ικανοποιημένος/η με τη σταθερότητα και την ταχύτητα του συστήματος εκπαίδευσης μέσω VR;
12		Συνέλαβε η συγκεκριμένη διαδικασία στην επίτευξη του συνολικού στόχου της ομάδας;
13	Απορρόφηση	Κατά την χρήση του συστήματος διατηρήσατε την προσοχή σας και ήσασταν επικεντρωμένος στη διαδικασία;

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

14		Αφοσιωθήκατε πλήρως στις ενέργειές σας κατά την διάρκεια της εκπαίδευσής σας μέσω VR;
15		Ήσασταν πλήρως απορροφημένος/η κατά την εκπαίδευσή σας μέσω VR;
16		Ήταν απολαυστική η εκπαίδευσή σας μέσω VR;
17	Απόλαυση	Ήταν ευχάριστη η εκπαίδευσή σας μέσω VR;
18		Ήταν διασκεδαστική η εκπαίδευσή σας μέσω VR;
19		Η αλληλεπίδρασή σας με το σύστημα του VR ήταν κατανοητή και ξεκάθαρη;
20		Η αλληλεπίδρασή σας με το σύστημα του VR απαιτούσε σημαντική πνευματική προσπάθεια;
21	Ευκολία	Υπήρξαν προβλήματα κατά την εκπαίδευσή σας μέσω VR;
22	Χρήσης	Ήταν εύκολο να μάθετε να χρησιμοποιείται το VR;
23		Ήταν εύκολο να εκτελέσετε τις εργασίες εκπαίδευσής στο VR;
24		Ήταν εύκολο να αποκτήσετε δεξιότητες κατά την εκπαίδευσή σας μέσω VR;
25		Στη συνολική του εικόνα, ήταν εύκολο στη χρήση το σύστημα VR;

Στη συνέχεια οι απαντήσεις του χρήστη, στέλνονται από το περιβάλλον της Unity στο σύστημα του Core για την συναισθηματική ανάλυση των απαντήσεων όπως περιγράφηκε στα Παραδοτέα Π2.1 και Π3.1.

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

##### Έλεγχος KPI1

Η αξιολόγηση της λειτουργίας της εκπαιδευτικής εφαρμογής και η επιβεβαίωση της επίτευξης των βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs) πραγματοποιήθηκαν μέσα από τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων που προέκυψαν τόσο από τις απαντήσεις των συμμετεχόντων, όσο και από την ποιοτική αποτύπωση των εμπειριών τους.

Για την αποτίμηση του πρώτου δείκτη (KPI1), που αφορά την πρόθεση μελλοντικής χρήσης του μετασύμπαντος περιβάλλοντος (metaverse) για εκπαίδευση ή εργασία, αξιοποιούνται:

- Τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου (που έχει αναλυθεί σε προηγούμενο παραδοτέο), όπου μετρήθηκε η πρόθεση χρήσης σε εργαζομένους στην Ελλάδα.
- Οι συνεντεύξεις, στις οποίες οι συμμετέχοντες στην εκπαίδευση εξέφρασαν ελεύθερα τη γνώμη τους σχετικά με τη χρησιμότητα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του VR στην καθημερινή επαγγελματική πρακτική, και συνολικά την πρόθεσή τους να την υιοθετήσουν στο μέλλον.

Σύμφωνα με τα ποσοτικά δεδομένα, το 60,9% των 2.243 συμμετεχόντων στο ερωτηματολόγιο απάντησε ότι θα χρησιμοποιούσε την τεχνολογία VR/metaverse σε κάποιες διαδικασίες της δουλειάς του, αποδεικνύοντας ευρεία θετική στάση απέναντι στην υιοθέτηση της τεχνολογίας.

Στο ποιοτικό σκέλος, οι ημιδομημένες συνεντεύξεις ανέδειξαν επίσης υψηλό βαθμό πρόθεσης χρήσης. Οι συμμετέχοντες εξέφρασαν θετική στάση και ενδιαφέρον για μελλοντική αξιοποίηση του εργαλείου. Ενδεικτικές φράσεις περιλαμβάνουν:

- «Θα μπορούσαν και οι συνάδελφοί μου να το χρησιμοποιήσουν με κατάλληλες οδηγίες», γεγονός που δηλώνει όχι μόνο προσωπική αποδοχή, αλλά και εκτίμηση της γενικότερης χρηστικότητας του εργαλείου στον χώρο εργασίας.
- «Με εξοικείωση και επανάληψη πιστεύω θα είναι καλύτερα», επισημαίνοντας τη διάθεση για επαναλαμβανόμενη χρήση και μάθηση.
- «Θα ήθελα να το δοκιμάσω και σε κάτι άλλο», στοιχείο που φανερώνει ενδιαφέρον για αξιοποίηση του εργαλείου σε διαφορετικά σενάρια ή περιβάλλοντα.
- «Αν ξαναγίνει και σε άλλο πόστο, θα ήθελα να το δοκιμάσω», φράση που ενισχύει την προοπτική διεύρυνσης της εφαρμογής του εργαλείου σε νέες εκπαιδευτικές ανάγκες.
- «Μου πρότειναν να συμμετέχω αλλά ήθελα από πριν και από μόνος μου», καταδεικνύοντας εσωτερική διάθεση συμμετοχής και ενεργητική στάση απέναντι στην καινοτομία.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- «Θα ήταν καλό να το είχαμε κάνει όταν προσλήφθηκα», αναφορά που υπογραμμίζει την αντιλαμβανόμενη αξία της τεχνολογίας για μελλοντική χρήση σε εισαγωγική εκπαίδευση.
- «Η τεχνολογία αυτή μπορεί να ενισχύσει τη ροή της εργασίας, να αυξήσει την προσοχή και να κάνει τον χρόνο πιο παραγωγικό», αναδεικνύοντας όχι μόνο εκπαιδευτική αλλά και λειτουργική προοπτική εφαρμογής.

Η πρόθεση των εργαζομένων για μελλοντική χρήση της τεχνολογίας VR και του μετασύμπαντος περιβάλλοντος καταγράφηκε με σαφήνεια σε πλήθος δηλώσεων. Η πλειονότητα εξέφρασε θετική στάση απέναντι στη δυνατότητα ενσωμάτωσης του εργαλείου στην καθημερινή εργασία, ακόμα και για άτομα με περιορισμένη τεχνολογική εμπειρία. Τα παραπάνω αποσπάσματα τεκμηριώνουν την αποδοχή του εργαλείου από τους εργαζομένους, καθώς και την επιθυμία περαιτέρω εφαρμογής του, επιβεβαιώνοντας την επίτευξη του KPI1.

#### Έλεγχος KP2

Ο έλεγχος του δεύτερου δείκτη (KPI2) αφορά στην αποτελεσματικότητα του υπό-συστήματος ανάλυσης συναισθήματος (sentiment analysis) στις απαντήσεις των χρηστών, στις ερωτήσεις σχετικά με τη διαδικασία της ψηφιακής εκπαίδευσης. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί πρόβλημα ταξινόμησης (classification), τοποθετείται δηλαδή η απάντηση μεταξύ τριών κλάσεων: αρνητικό, ουδέτερο και θετικό συναίσθημα. Οι μετρικές που χρησιμοποιήσαμε για την αξιολόγηση του συστήματος είναι οι εξής: Accuracy, Precision, Recall και F1-score. Accuracy ορίζεται ως το ποσοστό των σωστών προβλέψεων ως προς το σύνολο των δειγμάτων,

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} = \frac{Correct\ Predictions}{Total\ Number\ of\ Predictions}$$

όπου TP οι περιπτώσεις θετικών κλάσεων που ανιχνεύθηκαν σωστά ως θετικές, TN οι πραγματικά αρνητικές που εντοπίστηκαν ως αρνητικές, FP οι αρνητικές που λανθασμένα χαρακτηρίστηκαν θετικές, και FN οι πραγματικά θετικές που ταξινομήθηκαν ως αρνητικές. Η μετρική Precision παρουσιάζει το ποσοστό των περιπτώσεων που χαρακτηρίστηκαν θετικές και ήταν πραγματικά θετικές.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Η Recall δείχνει το ποσοστό των θετικών δειγμάτων που εντοπίστηκαν σωστά

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

και τέλος η μέτρηση F1-Score αποτελεί έναν αρμονικό μέσο των Precision και Recall, προσφέροντας έναν ισορροπημένο δείκτη.

$$F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

Για προβλήματα ταξινόμησης που υπάρχουν περισσότερες από δύο κλάσεις (όπως στην προκειμένη περίπτωση), οι μετρικές αυτές υπολογίζονται ξεχωριστά για κάθε κλάση και στη συνέχεια προκύπτει ο μέσος όρος (Macro-average).

Στον Πίνακα 21 παρουσιάζονται οι μετρικές Accuracy, Precision, Recall και F1-Score για κάθε μία από τις κλάσεις, και τα συνολικά σκορ αυτών, στις απαντήσεις των εκπαιδευόμενων. Συγκεκριμένα, το σύστημα εφαρμόστηκε από 15 χρήστες στην πιλοτική δοκιμή, όπου ο καθένας απάντησε σε 6 ερωτήσεις δημιουργώντας ένα σύνολο 90 απαντήσεων.

Πίνακας 21 Μετρήσεις στην ανάλυση συναισθήματος στις απαντήσεις των χρηστών

Κλάση	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
0 (Θετικό συναίσθημα)	92.16%	94.00%	93.07%	-
1 (Ουδέτερο συναίσθημα)	91.30%	80.77%	85.71%	-
2 (Αρνητικό συναίσθημα)	87.50%	100.00%	93.33%	-
Συνολικό (Macro-average)	90.32%	91.59%	90.71%	91.11%

Από αυτές οι 50 είχαν θετικό συναίσθημα, οι 26 ουδέτερο και οι 14 αρνητικό, μετά από χειροκίνητο έλεγχο που πραγματοποιήθηκε. Το σύστημα ανάλυσης συναισθήματος, εντόπισε 51 θετικές, 23 ουδέτερες και 16 αρνητικές, από τις οποίες οι 4 θετικές, οι 2 ουδέτερες και οι 2 αρνητικές ήταν

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

λανθασμένες ταξινομήσεις. Όλες οι μετρικές έχουν ποσοστό μεγαλύτερο από 90.00%, και πιο συγκεκριμένα Accuracy=91.11%, Precision=90.32%, Recall=91.59%, και F1-Score=90.7, υποδεικνύοντας ένα αξιόπιστο σύστημα ανάλυσης συναισθήματος ικανό να χαρακτηρίσει το συναίσθημα των απαντήσεων με μεγάλη απόδοση, σε όλες τις κλάσεις.

#### Έλεγχος ΚΡ3

Ο έλεγχος του τρίτου δείκτη (ΚΡΙ3) εστίασε στην ικανοποίηση των χρηστών από τη σαφήνεια των εξηγήσεων που παρείχε το σύστημα τεχνητής νοημοσύνης κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Η αξιολόγηση βασίζεται:

- Σε στοχευμένα ερωτήματα εντός του περιβάλλοντος VR που ζητούσαν από τον χρήστη να αξιολογήσει τη σαφήνεια και τη χρησιμότητα των επεξηγήσεων.
- Σε ποιοτικές αναφορές από τις συνεντεύξεις, όπου αρκετοί χρήστες ανέδειξαν τη συμβολή των εξηγήσεων στην κατανόηση της διαδικασίας και τη μείωση της σύγχυσης.
- Η αξιολόγηση του τρίτου δείκτη επικεντρώθηκε στην αντιλαμβανόμενη σαφήνεια και υποστηρικτικότητα των επεξηγήσεων που παρείχε το σύστημα τεχνητής νοημοσύνης (AI) κατά την εκπαιδευτική διαδικασία. Οι εργαζόμενοι αναφέρθηκαν θετικά στην καθοδήγηση και στην ευκρίνεια των οδηγιών, οι οποίες φάνηκε να διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ομαλή πλοήγηση στο εικονικό περιβάλλον.

Χαρακτηριστικά σχόλια περιλαμβάνουν:

- «Οι παρεχόμενες οδηγίες υπήρξαν πολύ βοηθητικές και σαφείς, συμβάλλοντας καταλυτικά στην επιτυχή πλοήγηση στο εικονικό περιβάλλον», μια φράση που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα του επεξηγηματικού περιεχομένου.
- «Θα μου έπαιρνε περισσότερο χρόνο αν χρειαζόταν να βρω μόνος μου πώς λειτουργεί», δείχνοντας την αξία της καθοδήγησης και της άμεσης επεξηγηματικής υποστήριξης από το σύστημα.
- «Ήταν πολύ κατατοπιστικό» και «πολύ βοηθητικές οδηγίες από τους υπεύθυνους», αναδεικνύουν την αντιληπτή ευκρίνεια της πληροφορίας – είτε παρασχέθηκε από το AI είτε μέσω του interface.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η πρόταση ενίσχυσης της καθοδήγησης μέσω «ενός εικονικού βοηθού μέσα στο VR, ώστε να είναι παρών και οπτικά», η οποία, παρά τη θετική γενική αξιολόγηση, εκφράζει την επιθυμία για περαιτέρω ενσωμάτωση της επεξηγηματικής λειτουργικότητας σε πιο φυσική μορφή.

Οι παραπάνω αναφορές δείχνουν ότι το υποστηρικτικό σύστημα τεχνητής νοημοσύνης κρίθηκε σαφές, χρήσιμο και αποτελεσματικό. Οι χρήστες ένιωσαν καθοδηγούμενοι και ενδυναμωμένοι στην πλοήγηση και εκτέλεση των καθηκόντων τους, επιβεβαιώνοντας την επίτευξη του ΚΡΙ3 σχετικά με τη σαφήνεια των επεξηγήσεων.



Εικόνα 50 Διεξαγωγή σεναρίου δοκιμής στη βιομηχανία

#### Έλεγχος ΚΡ14

Ο τέταρτος δείκτης αξιολόγησης, της πληρότητας ενσωμάτωσης δεδομένων από διαθέσιμες πηγές, δηλαδή της εισαγωγής των αναγνωρισμένων πηγών δεδομένων στο μετασύμπαν, καλύφθηκε στο 100%. Συγκεκριμένα στην εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας έχουν αναγνωριστεί τέσσερις πηγές ενσωμάτωσης.

#### Αναγνωρισμένες πηγές: 5

1. Η ενσωμάτωση του μηχανισμού τύπου γυροσκοπίου της συσκευής Meta Quest 3 για αναγνώριση κινήσεων της κεφαλής του χρήστη και μεταφοράς τους στο ψηφιακό κόσμο. Η συγκεκριμένη λειτουργία ενσωματώνεται στο 100% στην εφαρμογή μέσω του OVR CAMERARIG PREFAB μηχανισμού του META XR ALL-IN-ONE SDK πακέτου.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

2. Λειτουργία ανίχνευσης και εντοπισμού των χειρών του χρήστη, από τους αισθητήρες κάμερας της συσκευής Meta Quest 3, για την φυσική και εύστοχη αναγνώρισης της αλληλεπίδρασης του χρήστη στο φυσικό κόσμο με τα στοιχεία του εικονικού. Τα δεδομένα εισόδου παρέχονται από τους αισθητήρες κάμερας και επεξεργάζονται από τους μηχανισμούς OVR CAMERARIG PREFAB και ISDK DistanceHandGrabInteraction του META XR ALL-IN-ONE SDK πακέτου. Η λειτουργία ενσωματώθηκε πλήρως στην εφαρμογή μεταφέροντας με υψηλή ευκρίνεια τις κινήσεις και εντολές αλληλεπίδρασης του χρήστη από το φυσικό περιβάλλον στο εικονικό.

3. Η λειτουργία ανίχνευσης και εντοπισμού των χειριστηρίων του χρήστη, από τους αισθητήρες κάμερας της συσκευής Meta Quest 3, για την φυσική και εύστοχη αλληλεπίδραση του χρήστη στο φυσικό κόσμο με τα στοιχεία του εικονικού. Τα δεδομένα εισόδου παρέχονται από τους αισθητήρες κάμερας και επεξεργάζονται από τους μηχανισμούς OVR CAMERARIG PREFAB, ISDK DistanceHandGrabInteraction και το input system του META XR ALL-IN-ONE SDK πακέτου. Η λειτουργία ενσωματώθηκε πλήρως στην εφαρμογή μεταφέροντας με υψηλή ευκρίνεια της κινήσεις και εντολές αλληλεπίδρασης του χρήστη από το φυσικό περιβάλλον στο εικονικό, μέσω των τηλεχειριστηρίων.

4. Η λειτουργία passthrough boundary, ενσωματώθηκε κατά την ενεργοποίηση της συσκευής Meta Quest 3 και της εκτέλεσης της εφαρμογής εικονικής πραγματικότητας είτε μεμονωμένα και ανεξάρτητα από την συσκευή είτε μέσω διαμοιρασμού του φυσικού προσωπικού υπολογιστή στη φορητή συσκευή. Ο μηχανισμός αυτός ενσωματώθηκε στο 100% και παρέχει συλλογή δεδομένων και επεξεργασίας του φυσικού κόσμου σκανάροντας τον. Τα δεδομένα που παράγονται από το σκανάρισμα των αισθητήρων κάμερας της συσκευής επεξεργάζονται από τον χειριστή και ορίζουν τον ψηφιακό ως προς τον φυσικό χώρο επιτρεπόμενης κίνησης. Ο χώρος κίνησης μπορεί να είναι σταθερός είτε να περιλαμβάνει αρκετό χώρο για φυσική κίνηση του χρήστη. Σε περίπτωση όπου ο χρήστης κινηθεί εκτός του προκαθορισμένου χώρου η εφαρμογή σταματάει και ανοίγουν οι κάμερες της συσκευής παρέχοντας εικόνα του πραγματικού κόσμου στο χρήστη για λόγους ασφάλειας.

5. Τέλος, ενσωματώθηκε πλήρως ο μηχανισμός μετάφρασης κίνησης του χρήστη από το φυσικό χώρο στο ψηφιακό μέσω των μηχανισμών OVR CAMERARIG PREFAB.

Η πληρότητα ενσωμάτωσης δεδομένων από διαθέσιμες πηγές, δηλαδή της εισαγωγής των αναγνωρισμένων πηγών δεδομένων στο μετασύμπαν, σε βαθμό 100%, κρίνεται ικανοποιητική. Όλες οι διαθέσιμες πηγές δεδομένων που χρειάστηκαν για το προτεινόμενο σύστημα ενσωματώθηκαν πλήρως, ενώ κρίνονται απαραίτητες για την επίτευξη της απαραίτητης εμβάθυνσης του χρήστη στη εκπαιδευτική διαδικασία και στη δημιουργία ενός αρκετά ρεαλιστικού και φυσικού εικονικού προσομοιωτή εκπαίδευσης.

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εικονικής εκπαίδευσης βασίστηκε στην παρατήρηση της απόδοσης των εργαζομένων, καθώς και στην ερμηνεία των εμπειριών τους μέσα από συνεντεύξεις. Η συνολική αποτίμηση δείχνει πως η εφαρμογή κρίθηκε λειτουργική, επωφελής και ευχάριστη από την πλειονότητα των συμμετεχόντων.

Η ανάλυση των συνεντεύξεων έδειξε ότι η ηλικία και η εμπειρία των εργαζομένων επηρέασαν μερικώς την εμπειρία χρήσης και την τεχνολογική προσαρμογή. Συγκεκριμένα, οι νεότεροι εργαζόμενοι ήταν πιο εξοικειωμένοι με την τεχνολογία και παρουσίασαν μεγαλύτερο ενθουσιασμό και διάθεση πειραματισμού, ενώ οι μεγαλύτεροι σε ηλικία έδειξαν αρχικά επιφυλακτικότητα, αλλά ανταποκρίθηκαν θετικά κατά την πορεία της εκπαίδευσης. Αντίστοιχα, οι λιγότερο έμπειροι εργαζόμενοι φάνηκε να ωφελούνται περισσότερο από την εικονική καθοδήγηση, δηλώνοντας ότι θα επιθυμούσαν να είχαν λάβει τέτοιου τύπου υποστήριξη και κατά την ένταξή τους στην εργασία. Συνεπώς, η εφαρμογή της VR εκπαίδευσης φαίνεται να γεφυρώνει διαφορές εμπειρίας και να ενισχύει την αυτοπεποίθηση των εργαζομένων ανεξαρτήτως ηλικίας.

#### Ποσοτικά Ευρήματα

Ο Πίνακας 23 παρουσιάζει τα αποτελέσματα απόδοσης του πρώτου πειράματος στο εργαστήριο, εκφρασμένα ως μέσες τιμές ( $\mu$ ) και τυπικές αποκλίσεις ( $\sigma$ ) για καθεμία από τις τρεις ομάδες συμμετεχόντων. Οι αξιολογούμενοι δείκτες απόδοσης περιλαμβάνουν: (α) τη διάρκεια της εκπαίδευσης

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

– είτε μέσα στην εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας (VR) είτε υπό την καθοδήγηση ανθρώπινου εκπαιδευτή, (β) τον χρόνο που απαιτήθηκε για τη συναρμολόγηση του πίνακα ελέγχου στον πραγματικό κόσμο, (γ) τον αριθμό των σφαλμάτων που πραγματοποιήθηκαν και (δ) τον συνολικό χρόνο που αφιέρωσε ο εκπαιδευτής καθ' όλη τη διάρκεια της συμμετοχής κάθε ατόμου στο πείραμα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα II, η Ομάδα 2 πέτυχε τον χαμηλότερο ρυθμό σφαλμάτων στον πραγματικό κόσμο ( $\mu = 0.10$ ,  $\sigma = 0.30$ ) και τον ταχύτερο χρόνο ολοκλήρωσης της εργασίας ( $\mu = 516$ ,  $\sigma = 119$ ), υπερéχοντας τόσο της Ομάδας 1 όσο και της Ομάδας 3.

Πίνακας 22 Δημογραφικά στοιχεία ανά ομάδες ατόμων συμμετοχής στην δοκιμή στο εργαστήριο

Groups	Sample	Avg. Age	Gender M-F
Group 1	20	$\mu = 24.40 \pm \sigma = 8.114$	13-7
Group 2	20	$\mu = 26.80 \pm \sigma = 6.947$	13-7
Group 3	20	$\mu = 28.55 \pm \sigma = 11.774$	9-11

Πίνακας 23 Αποτελέσματα ανά ομάδα δοκιμής στο εργαστήριο

Sample	Avg. Training Time (sec)	Avg. Real-World Errors	Avg. Real-World Completion Time (sec)	Avg. Trainer Time Spent (sec)
Group 1	$\mu = 615 \pm \sigma = 201$ (VR)	$\mu = 1.45 \pm \sigma = 1.627$	$\mu = 587 \pm \sigma = 143$	0-120
Group 2	$\mu = 501 \pm \sigma = 127$ (VR)	$\mu = 0.10 \pm \sigma = 0.300$	$\mu = 516 \pm \sigma = 119$	$\mu = 468 \pm \sigma = 112$
Group 3	$\mu = 478 \pm \sigma = 82$ (H)	$\mu = 1.05 \pm \sigma = 1.203$	$\mu = 556 \pm \sigma = 123$	$\mu = 1034 \pm \sigma = 139$

Οι εργαζόμενοι ολοκλήρωσαν την ίδια εκπαιδευτική διαδικασία και η συντριπτική πλειοψηφία εμφάνισε σημαντικά μικρό χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας και ελάχιστα σφάλματα, γεγονός που υποδηλώνει ταχεία εξοικείωση και βελτίωση της απόδοσης. Επίσης, τα δεδομένα καταδεικνύουν γενικά υψηλό επίπεδο απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι επρόκειτο για μία πρωτόγνωρη εμπειρία σε ψηφιακό περιβάλλον. Η πλειονότητα των συμμετεχόντων φαίνεται να προσαρμόστηκε ομαλά στις απαιτήσεις της τεχνολογίας, γεγονός που ενδεχομένως συνδέεται με τη γενικότερη επίγνωση των εργαζομένων ότι οι τεχνολογικές αλλαγές στη βιομηχανία είναι αναπόφευκτες και απαιτούν αυξημένη προσαρμοστικότητα.

Πίνακας 24 Περιληπτικά αποτελέσματα απόδοσης στη βιομηχανία

Αριθμός Συμμετέχοντα	Χρόνος	Αριθμός Λαθών
1	13:00	1
2	05:10	1
3	10:17	0
4	06:14	1
5	09:38	1
6	07:23	2
7	08:02	1
8	05:28	2
9	10:07	0
10	06:56	1
11	07:21	2
12	11:39	1
13	09:13	1
14	08:16	3
15	16:06	1

### Ποιοτικά Ευρήματα

Από την ανάλυση των συνεντεύξεων προέκυψαν έξι βασικοί άξονες εμπειρίας των εργαζομένων:

- **Ευκολία Χρήσης:**  
Παρότι αρκετοί συμμετέχοντες δεν είχαν προηγούμενη επαφή με VR, δήλωσαν ότι η εμπειρία ήταν εύχρηστη και κατανοητή. Οι περισσότεροι εργαζόμενοι ανέφεραν πως μπόρεσαν να πλοηγηθούν με σχετική ευκολία, ακόμα και αν χρειάστηκαν λίγα λεπτά προσαρμογής στην αρχή.
- **Απόλαυση και Ενδιαφέρον:**  
Η πλειοψηφία χαρακτήρισε την εμπειρία ως διασκεδαστική και ενδιαφέρουσα. Πολλοί συμμετέχοντες ένιωσαν ότι πρόκειται για κάτι καινούριο και ευχάριστο που «έσπασε τη ρουτίνα» της καθημερινής εργασίας. Ορισμένοι πρότειναν να υπάρξει συνέχιση ή επέκταση της εφαρμογής σε άλλα καθήκοντα.
- **Εμβύθιση:**  
Οι χρήστες ένιωσαν παρόντες μέσα στο εικονικό περιβάλλον, ενώ ο ρεαλισμός της εφαρμογής σχολιάστηκε θετικά. Το γεγονός ότι μπορούσαν να «δοκιμάσουν» εργασίες σε ασφαλές περιβάλλον ενίσχυσε το αίσθημα συγκέντρωσης και ενεργούς συμμετοχής.
- **Ικανοποίηση:**  
Η συνολική εμπειρία χαρακτηρίστηκε θετική, και οι περισσότεροι συμμετέχοντες δήλωσαν ότι θα ήθελαν να συμμετάσχουν ξανά σε αντίστοιχη δράση. Η σαφής δομή, οι οδηγίες και η καθοδήγηση συνέβαλαν στην ικανοποίηση αυτή.
- **Χρησιμότητα:**  
Πολλοί εργαζόμενοι αναγνώρισαν πρακτική αξία στην εφαρμογή, είτε για αρχική κατάρτιση είτε για επανάληψη διαδικασιών χωρίς κινδύνους. Δηλώθηκε ότι μπορεί να ενισχύσει τη μάθηση, να μειώσει το άγχος νέων υπαλλήλων και να αυξήσει την κατανόηση διαδικασιών πριν την πρακτική εφαρμογή.
- **Εσωτερική Παρακίνηση:**  
Η συμμετοχή στην εκπαιδευτική εμπειρία συνοδεύτηκε από προσωπικό ενδιαφέρον και ενθουσιασμό. Αρκετοί συμμετέχοντες δήλωσαν ότι προσήλθαν εθελοντικά ή ότι θα επιθυμούσαν στο μέλλον ανάλογες εμπειρίες.

Συνολικά προκύπτει ότι η VR εκπαίδευση αξιολογήθηκε θετικά τόσο ως προς τη χρησιμότητα όσο και ως προς τη συμβολή της στην ενίσχυση της απόδοσης και της εμπειρίας των εργαζομένων. Το γεγονός ότι αρκετοί συμμετέχοντες πρότειναν την επέκταση της χρήσης της σε άλλες εκπαιδευτικές διαδικασίες ή κατά την πρόσληψη νέων υπαλλήλων, αποδεικνύει πως η VR μπορεί να αποτελέσει βιώσιμη τεχνολογική λύση στον χώρο της επαγγελματικής κατάρτισης, ειδικά σε βιομηχανικά περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από απαιτητικές και επαναλαμβανόμενες διαδικασίες.

## 2.13. Φορητή πλατφόρμα καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθήκες

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

#### Σκοπός και ρόλος των σεναρίων ελέγχου

Τα σεναρία ελέγχου και αξιολόγησης αποτελούν βασικό στοιχείο της πιλοτικής φάσης του έργου, καθώς καθορίζουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο θα εξεταστεί η λειτουργικότητα, η αξιοπιστία και η επιχειρησιακή συνάφεια του προτεινόμενου συστήματος φορητής καταμέτρησης αποθεμάτων. Στόχος των σεναρίων δεν είναι η πιστοποίηση ενός τελικού προϊόντος, αλλά η συστηματική διερεύνηση της τεχνικής εφικτότητας και των ορίων της προτεινόμενης προσέγγισης.

Η σχεδίαση των σεναρίων ελέγχου ακολουθεί λογική σταδιακής πολυπλοκότητας, ξεκινώντας από βασικές λειτουργίες και επεκτεινόμενη σε συνθήκες που προσεγγίζουν ρεαλιστικά περιβάλλοντα αποθήκης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η απομόνωση κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, όπως ο φωτισμός, η χωρική διάταξη των αντικειμένων και ο βαθμός ανθρώπινης παρέμβασης.

Η σχεδίαση των σεναρίων ελέγχου βασίζεται σε μεθοδολογικό πλαίσιο που συνδυάζει τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης με επιχειρησιακές απαιτήσεις. Κάθε σενάριο ορίζεται από το περιβάλλον εκτέλεσης, τον τύπο και τη διάταξη των αντικειμένων αποθέματος, τις συνθήκες φωτισμού, τον τρόπο ελέγχου της εναέριας πλατφόρμας, καθώς και τα αναμενόμενα δεδομένα εξόδου.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την επαναληψιμότητα των δοκιμών και τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών σεναρίων. Παράλληλα, διασφαλίζει ότι τα σεναρία παραμένουν εντός των τεχνικών περιορισμών της πιλοτικής υλοποίησης, χωρίς να προϋποθέτουν πλήρη αυτονομία του συστήματος.

#### Περιβάλλον ελέγχου και πειραματικές συνθήκες

Τα σεναρία ελέγχου υλοποιήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον που προσομοιώνει βασικά χαρακτηριστικά αποθηκευτικού χώρου. Το περιβάλλον αυτό παρέχει τη δυνατότητα διαμόρφωσης της χωρικής διάταξης και του φωτισμού, επιτρέποντας τη δημιουργία ελεγχόμενων και επαναλήψιμων συνθηκών δοκιμής.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη δυνατότητα μεταβλητού φωτισμού, καθώς ο φωτισμός αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την απόδοση συστημάτων υπολογιστικής όρασης. Τα σεναρία καλύπτουν εύρος συνθηκών, από ομοιόμορφο φωτισμό έως περιβάλλοντα με μειωμένη φωτεινότητα και τοπικές σκιές.

#### Σενάρια βασικής λειτουργικότητας

Τα σεναρία βασικής λειτουργικότητας αποσκοπούν στην επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος υπό απλοποιημένες συνθήκες. Σε αυτά περιλαμβάνεται η βασική πτήση της εναέριας πλατφόρμας κατά μήκος προκαθορισμένων διαδρομών, η συλλογή οπτικών δεδομένων και η εφαρμογή αλγορίθμων ανίχνευσης αντικειμένων.

Τα αντικείμενα αποθέματος τοποθετούνται με τρόπο ώστε να είναι πλήρως ορατά, χωρίς αλληλοεπικάλυψη, επιτρέποντας την αξιολόγηση της βασικής ακρίβειας ανίχνευσης και της σταθερότητας της ροής δεδομένων.

#### Σενάρια καταμέτρησης με χωρική ποικιλία

Σε επόμενο επίπεδο, τα σεναρία προβλέπουν διαφοροποίηση της χωρικής διάταξης των αντικειμένων. Τα αντικείμενα τοποθετούνται σε διαφορετικά ύψη, αποστάσεις και γωνίες ως προς την κάμερα του drone, προσομοιώνοντας πραγματικές συνθήκες αποθήκευσης.

Στόχος των σεναρίων αυτών είναι η αξιολόγηση της επίδρασης της γεωμετρίας λήψης στην ακρίβεια ανίχνευσης, καθώς και η διερεύνηση της ευαισθησίας του συστήματος σε αλλαγές προοπτικής.

#### Σενάρια λειτουργίας υπό μεταβαλλόμενο φωτισμό

Τα σεναρία μεταβαλλόμενου φωτισμού σχεδιάζονται ώστε να εξετάσουν την ανθεκτικότητα των αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης σε μη ιδανικές συνθήκες. Προβλέπεται η εκτέλεση δοκιμών με:

- χαμηλό φωτισμό,
- ανομοιογενή φωτισμό,
- παρουσία έντονων σκιών.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Τα σενάρια αυτά είναι κρίσιμα για την εκτίμηση της πρακτικής χρησιμότητας του συστήματος, δεδομένου ότι οι αποθήκες συχνά χαρακτηρίζονται από ανομοιογενή τεχνητό φωτισμό.

#### Σενάρια μερικής απόκρυψης αντικειμένων

Σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα αποθήκης, τα αντικείμενα συχνά δεν είναι πλήρως ορατά. Για τον λόγο αυτό, προβλέπονται σενάρια όπου τα αντικείμενα αποθέματος παρουσιάζουν μερική απόκρυψη λόγω επικάλυψης, τοποθέτησης πίσω από άλλα αντικείμενα ή περιορισμένου οπτικού πεδίου.



Εικόνα 51 Περιπτώσεις απαιτητικών συνθηκών εντοπισμού

Τα σενάρια αυτά αποσκοπούν στη διερεύνηση των ορίων της ανίχνευσης και στην κατανόηση των περιπτώσεων όπου απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση ή επαναληπτική σάρωση.

#### Σενάρια ανθρώπινης καθοδήγησης (human-in-the-loop)

Όλα τα σενάρια ελέγχου ενσωματώνουν τη λογική του ανθρώπου στον βρόχο ελέγχου. Ο χειριστής διατηρεί τον έλεγχο της πτήσης και μπορεί να προσαρμόζει τη διαδρομή του drone με βάση την οπτική πληροφορία και τα ενδιάμεσα αποτελέσματα ανίχνευσης.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ασφαλή εκτέλεση των δοκιμών και αντικατοπτρίζει ρεαλιστικά σενάρια χρήσης, όπου η αυτοματοποίηση λειτουργεί υποστηρικτικά και όχι αντικαταστατικά.

#### Επαναληψιμότητα και συγκρισιμότητα σεναρίων

Κάθε σενάριο ελέγχου σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να επαναληφθεί με τις ίδιες συνθήκες, επιτρέποντας τη σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών δοκιμών. Η επαναληψιμότητα αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης, καθώς επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ τυχαίων αποκλίσεων και συστηματικών αδυναμιών του συστήματος.

#### Ρόλος των σεναρίων στην εξέλιξη του συστήματος

Τα σενάρια ελέγχου και αξιολόγησης δεν αντιμετωπίζονται ως μεμονωμένες δοκιμές, αλλά ως εργαλείο ανατροφοδότησης για τη μελλοντική εξέλιξη του συστήματος. Τα ευρήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τους θα αξιοποιηθούν για: α) τη βελτίωση των αλγορίθμων ανίχνευσης, β) την αναθεώρηση των διαδικασιών πτήσης, και γ) τον σχεδιασμό επόμενων φάσεων με αυξημένο επίπεδο αυτονομίας.

#### Συνοπτική αποτίμηση

Συνολικά, τα σενάρια ελέγχου και αξιολόγησης συγκροτούν ένα συνεκτικό και συστηματικό πλαίσιο δοκιμών, το οποίο επιτρέπει την τεκμηριωμένη αξιολόγηση του πιλοτικού συστήματος. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν βασίζονται σε ελεγχόμενες και επαναλήψιμες διαδικασίες και παρέχουν αξιόπιστη βάση για μελλοντική τεχνική και επιχειρησιακή αξιοποίηση.



Εικόνα 52 Προβολή του εργαστηριακού περιβάλλοντος καταμέτρησης με drone

### Οπτική τεκμηρίωση της διαδικασίας αξιολόγησης

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, αξιοποιήθηκε οπτικό υλικό (φωτογραφίες και αποσπάσματα βίντεο) που καταγράφηκε κατά τη λειτουργία του πιλοτικού συστήματος. Το υλικό αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε για σκοπούς επίδειξης, αλλά ως συμπληρωματικό τεκμήριο παρατήρησης και ανάλυσης της συμπεριφοράς του συστήματος.

Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν στιγμιότυπα και βίντεο της εναέριας πλατφόρμας κατά τη σάρωση περιοχών με αποθηκευμένο εξοπλισμό, όπου το σύστημα πραγματοποιούσε ανίχνευση και καταμέτρηση αντικειμένων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τα οπτικά δεδομένα επέτρεψαν: την επιβεβαίωση της ορθής αναγνώρισης αντικειμένων, την παρατήρηση της σταθερότητας της ανίχνευσης κατά την κίνηση, και την αξιολόγηση της συνέπειας της καταμέτρησης σε συνεχόμενα πλαίσια εικόνας.

Το βιντεοληπτικό υλικό συνέβαλε επίσης στην εκτίμηση του συνολικού χρόνου καταγραφής ανά λειτουργικό κύκλο, καθώς κατέστη δυνατή η παρατήρηση της ροής της διαδικασίας από την έναρξη της σάρωσης έως την ολοκλήρωση της καταμέτρησης.

### Ρόλος του οπτικού υλικού στη σύνδεση με τα KPIs

Το οπτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε υποστηρικτικά για την ποιοτική αξιολόγηση των KPIs του έργου. Ειδικότερα:

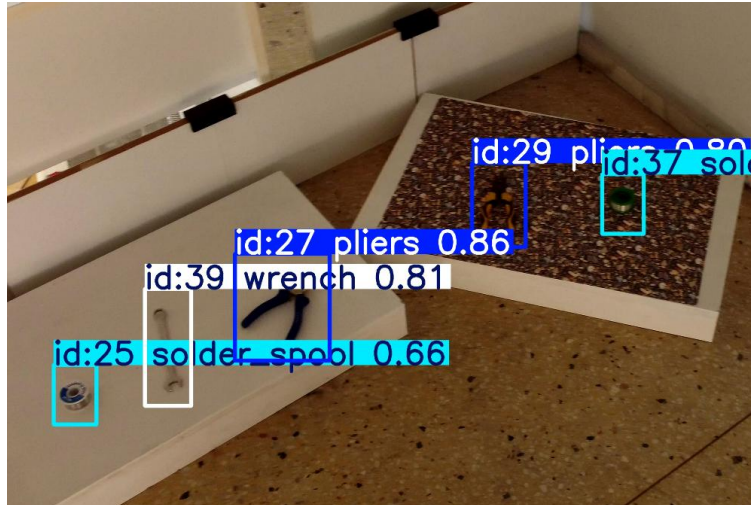
- Σε σχέση με το KPI1 (ακρίβεια καταγραφής αποθεμάτων), τα στιγμιότυπα εικόνας επέτρεψαν τη σύγκριση μεταξύ οπτικά εμφανών αντικειμένων και των αντικειμένων που ανιχνεύθηκαν από το σύστημα, τόσο σε συνθήκες καλού όσο και χαμηλού φωτισμού.



Εικόνα 53 Καταγραφή αντικειμένων σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- Σε σχέση με το *KPI2* (χρόνος καταγραφής), τα βίντεο παρείχαν σαφή εικόνα της διάρκειας και της ροής του λειτουργικού κύκλου καταμέτρησης.
- Σε σχέση με το *KPI3* (αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης), το υλικό ανέδειξε τη συμπεριφορά των αλγορίθμων κατά την κίνηση του drone γύρω από ετερογενή και μη κατηγοριοποιημένα αντικείμενα.



Εικόνα 54 Εντοπισμός γύρω από ετερογενή και μη κατηγοριοποιημένα αντικείμενα

- Τέλος, σε σχέση με το *KPI4* (βελτίωση απόδοσης διαχείρισης αποθήκης), το υλικό λειτούργησε ως μέσο σύγκρισης με τη χειροκίνητη διαδικασία, αναδεικνύοντας τη μείωση της πολυπλοκότητας και της σύγχυσης για τον χρήστη.

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

##### Σκοπός θεωρητικής αξιολόγησης και ρόλος των KPIs

Ο έλεγχος λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος αποσκοπεί στη διερεύνηση του βαθμού στον οποίο η προτεινόμενη λύση δύναται να υποστηρίξει αποτελεσματικά διαδικασίες καταμέτρησης αποθεμάτων σε αποθηκευτικούς χώρους. Στο πλαίσιο αυτό, ορίζονται συγκεκριμένοι δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), οι οποίοι λειτουργούν ως εργαλεία εννοιολογικής και πιλοτικής αξιολόγησης της απόδοσης του συστήματος.

Δεδομένου ότι το σύστημα βρίσκεται σε στάδιο πιλοτικής διερεύνησης, η επιβεβαίωση των KPIs πραγματοποιείται σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο, μέσω σεναρίων ελέγχου, εργαστηριακών δοκιμών και αναλυτικής συζήτησης των αποτελεσμάτων. Στόχος δεν είναι η τελική ποσοτική πιστοποίηση, αλλά η τεκμηριωμένη εκτίμηση της τεχνικής και επιχειρησιακής σκοπιμότητας της προσέγγισης.

Η αξιολόγηση των KPIs βασίζεται σε συνδυασμό της ανάλυσης των σεναρίων ελέγχου που ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, της θεωρητικής αποτίμησης της αρχιτεκτονικής του συστήματος, και ποιοτικής αξιολόγησης μέσω συζητήσεων με χρήστες και εμπλεκόμενα άτομα του εργαστηριακού περιβάλλοντος.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συσχέτιση της τεχνικής λειτουργίας του συστήματος με πραγματικές λειτουργικές ανάγκες αποθήκης, χωρίς να απαιτείται πλήρης παραγωγική εγκατάσταση.

##### *KPI1 – Ακρίβεια ορθών καταγεγραμμένων αποθεμάτων σε συνθήκες καλού και χαμηλού φωτισμού*

**Ορισμός KPI:** Το KPI1 αφορά την ακρίβεια της καταμέτρησης αποθεμάτων, όπως αυτή προκύπτει από την ορθή αναγνώριση και καταγραφή αντικειμένων σε συνθήκες καλού και χαμηλού φωτισμού.

**Θεωρητική και πιλοτική αξιολόγηση:** Η αξιολόγηση του KPI1 πραγματοποιείται μέσω ανάλυσης των σεναρίων καταμέτρησης που προβλέπουν μεταβλητές συνθήκες φωτισμού στο εργαστηριακό περιβάλλον. Εξετάζεται κατά πόσο οι αλγόριθμοι υπολογιστικής όρασης διατηρούν αποδεκτό επίπεδο ακρίβειας όταν η φωτεινότητα μειώνεται ή όταν εμφανίζονται τοπικές σκιές.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Η αξιολόγηση βασίζεται στη σύγκριση μεταξύ αναμενόμενου και καταγεγραμμένου πλήθους αντικειμένων, στη συστηματική παρατήρηση αποκλίσεων, και στη θεωρητική συσχέτιση των αποτελεσμάτων με γνωστούς περιορισμούς της υπολογιστικής όρασης υπό χαμηλό φωτισμό.

Το KPI1 θεωρείται κρίσιμο, καθώς η ικανότητα λειτουργίας σε μη ιδανικές συνθήκες αποτελεί βασική προϋπόθεση για την πρακτική εφαρμογή του συστήματος σε πραγματικές αποθήκες.

#### *KPI2 – Επίτευξη ικανοποιητικού χρόνου καταγραφής αποθεμάτων ανά λειτουργικό κύκλο*

Το KPI2 αφορά τον συνολικό χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός λειτουργικού κύκλου καταγραφής αποθεμάτων, από την έναρξη της πτήσης έως την παραγωγή αποτελεσμάτων.

Η αξιολόγηση του KPI2 πραγματοποιείται μέσω θεωρητικής ανάλυσης της ροής εργασίας του συστήματος και της εκτίμησης του χρόνου που απαιτείται για την μετακίνηση της εναέριας πλατφόρμας στις περιοχές ενδιαφέροντος, τη συλλογή οπτικών δεδομένων, και την επεξεργασία τους σε εξωτερικό υπολογιστικό σύστημα.

Η αξιολόγηση δεν στοχεύει στη βελτιστοποίηση του χρόνου σε απόλυτους όρους, αλλά στη διαπίστωση ότι ο απαιτούμενος χρόνος καταγραφής είναι λειτουργικά αποδεκτός και δυνητικά μικρότερος σε σύγκριση με χειροκίνητες διαδικασίες απογραφής.

Για τη μέτρηση του KPI 2 κλήθηκε σχετικό με το εργαστηριακό περιβάλλον άτομο να καταμετρήσει τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Καταγράφηκε σε επαναληπτικές δοκιμές και ανατοποθετήσεις των αποθεμάτων ότι το άτομο χρειάστηκε περίπου τον διπλάσιο χρόνο καταγραφής σε σύγκριση με τον χρόνο που απαιτείται από το προτεινόμενο σύστημα. Συνεπώς στο συγκεκριμένο πείραμα καταγράφηκε μείωση ~50% στον χρόνο καταγραφής.

#### *KPI3 – Εφαρμογή και αξιολόγηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης*

Το KPI3 αφορά την επιτυχή εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για τον εντοπισμό και την καταμέτρηση αποθεμάτων, καθώς και την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους στο πλαίσιο του συστήματος.

Η αξιολόγηση του KPI3 βασίζεται στην ανάλυση της επιλογής και της ενσωμάτωσης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (π.χ. ανίχνευση αντικειμένων μέσω βαθιών νευρωνικών δικτύων), καθώς και στη συζήτηση των πλεονεκτημάτων και περιορισμών τους.

Εξετάζεται κατά πόσο οι αλγόριθμοι ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις ετερογενών αντικειμένων, παρουσιάζουν συνεπή συμπεριφορά σε διαφορετικές συνθήκες, και μπορούν να αποτελέσουν βάση για μελλοντική βελτίωση και κλιμάκωση του συστήματος.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται κυρίως σε εννοιολογικό και πειραματικό επίπεδο, μέσα από συγκριτική μελέτη με εναλλακτικές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της αξιολόγησης του εν λόγω KPI χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι YOLOv8.s και YOLO11.s, χωρίς προεκπαίδευση, με ίδιες παραμέτρους εκπαίδευσης. Καταγράφηκε στις διαδοχικές δοκιμές φωτισμού ότι το YOLO11.s παρουσιάζει μία βελτιωμένη απόδοση εντοπισμού και καταγραφής κατά MAP<sup>50-95</sup> της τάξης του 5%.

#### *KPI4 – Βελτίωση απόδοσης διαχείρισης αποθήκης μέσω μείωσης καθυστερήσεων*

Το KPI4 αφορά τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της διαχείρισης αποθήκης, όπως αυτή αποτυπώνεται στη μείωση καθυστερήσεων ανά λειτουργικό κύκλο καταγραφής αποθεμάτων.

Η αξιολόγηση του KPI4 πραγματοποιείται μέσω θεωρητικής σύγκρισης της προτεινόμενης διαδικασίας με υφιστάμενες πρακτικές απογραφής. Εξετάζεται κατά πόσο η χρήση του συστήματος μειώνει τον χρόνο ανθρώπινης απασχόλησης, περιορίζει τη διακοπή της κανονικής λειτουργίας της αποθήκης, και επιτρέπει πιο συχνή ή ευέλικτη καταμέτρηση αποθεμάτων.

Η αξιολόγηση βασίζεται σε ποιοτική ανάλυση και συζητήσεις με άτομα που διαθέτουν εμπειρία σε αποθηκευτικές διαδικασίες, χωρίς να απαιτείται πλήρης ποσοτική μέτρηση σε παραγωγικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, για την αξιολόγηση του εν λόγω KPI ερωτήθηκαν επτά άτομα συναφή με την διαχείριση αποθηκών και αξιολόγησαν θετικά το σύστημα και τις εν δυνάμει δυνατότητες του για την μείωση των καθυστερήσεων σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους απογραφής αποθεμάτων.

#### *Συνολική θεωρητική επιβεβαίωση KPIs*

Η συνδυαστική αξιολόγηση των KPIs υποδεικνύει ότι το προτεινόμενο πιλοτικό σύστημα παρουσιάζει συνεκτική λειτουργική λογική και ανταποκρίνεται σε βασικές απαιτήσεις καταμέτρησης αποθεμάτων.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Παρότι η αξιολόγηση πραγματοποιείται σε θεωρητικό και πιλοτικό επίπεδο, τα αποτελέσματα παρέχουν ισχυρές ενδείξεις για τη δυνητική συμβολή του συστήματος στη βελτίωση διαδικασιών αποθήκης.

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

##### Στόχος και πλαίσιο αξιολόγησης

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πιλοτικής διερεύνησης αποσκοπεί στη συνολική αποτίμηση της προτεινόμενης προσέγγισης για την καταμέτρηση αποθεμάτων μέσω εναέριας πλατφόρμας και υπολογιστικής όρασης. Η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στην τεχνική επίδοση των επιμέρους συνιστωσών, αλλά επεκτείνεται στη λειτουργική αποδοτικότητα, την ευχρηστία και την αντιλαμβανόμενη αξία του συστήματος σε σχέση με υφιστάμενες πρακτικές.

Δεδομένου ότι το σύστημα βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο, η αξιολόγηση πραγματοποιείται με συνδυασμό τεχνικής ανάλυσης, ποιοτικής παρατήρησης και συζήτησης με δυνητικούς χρήστες, χωρίς στόχο την πλήρη ποσοτική πιστοποίηση.

##### Σύνθεση αποτελεσμάτων σε σχέση με τα KPIs

Σε επίπεδο συνολικής αποτίμησης, τα αποτελέσματα της πιλοτικής διερεύνησης δείχνουν ότι οι ορισμένοι δείκτες απόδοσης (KPIs) μπορούν να υποστηριχθούν σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο:

- Η **ακρίβεια καταμέτρησης (KPI1)** επηρεάζεται σαφώς από τις συνθήκες φωτισμού, ωστόσο η δυνατότητα λειτουργίας και σε χαμηλό φωτισμό αναδεικνύει τη δυνητική εφαρμοσιμότητα του συστήματος σε πραγματικά περιβάλλοντα αποθήκης.
- Ο **χρόνος καταγραφής αποθεμάτων (KPI2)** εκτιμάται ως λειτουργικά αποδεκτός σε σχέση με χειροκίνητες διαδικασίες, ιδίως όταν λαμβάνεται υπόψη η μείωση ανθρώπινης κόπωσης και λαθών.
- Η **εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (KPI3)** αποδεικνύεται κατάλληλη για ετερογενή αντικείμενα, θέτοντας βάση για μελλοντική βελτίωση και εξειδίκευση.
- Η **συνολική αποδοτικότητα της διαχείρισης αποθήκης (KPI4)** εκτιμάται ότι μπορεί να βελτιωθεί, κυρίως μέσω της μείωσης καθυστερήσεων και της απλοποίησης της διαδικασίας καταμέτρησης.

##### Ποιοτική αξιολόγηση μέσω συζητήσεων με άτομα του εργαστηρίου

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης πραγματοποιήθηκαν άτυπες και ημι-δομημένες συζητήσεις με άτομα του εργαστηριακού περιβάλλοντος που διαθέτουν εμπειρία στη διαχείριση και χρήση εξοπλισμού. Οι συζητήσεις αυτές επικεντρώθηκαν στο κατά πόσο ο προτεινόμενος τρόπος καταμέτρησης θεωρείται πιο αποδοτικός σε σχέση με τις συνήθεις χειροκίνητες πρακτικές.

Οι συμμετέχοντες ανέφεραν ότι η υφιστάμενη διαδικασία καταμέτρησης εξοπλισμού είναι συχνά αποσπασματική, χρονοβόρα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του εκάστοτε ατόμου. Επισημάνθηκε ότι η ανάγκη χειροκίνητης καταγραφής, σε συνδυασμό με μη οργανωμένους χώρους αποθήκευσης, οδηγεί σε αυξημένο γνωστικό φόρτο και πιθανότητα λαθών.

Στο πλαίσιο αυτό, η προτεινόμενη προσέγγιση αξιολογήθηκε θετικά ως προς τη δυνατότητα μείωσης της πολυπλοκότητας της διαδικασίας και τη μεταφορά του βάρους της καταμέτρησης από τον άνθρωπο στο σύστημα.

##### Παρατήρηση μη εξοικειωμένου χρήστη

“Ιδιαίτερη σημασία για την αξιολόγηση είχε η παρατήρηση της διαδικασίας καταμέτρησης από μη εξοικειωμένο άτομο του εργαστηρίου, στο οποίο δόθηκε η δυνατότητα να καταμετρήσει τον εξοπλισμό με τον παραδοσιακό χειροκίνητο τρόπο.”

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παρατηρήθηκε ότι το άτομο (α) δυσκολεύτηκε να οργανώσει τη διαδικασία καταγραφής, (β) αναζήτησε επανειλημμένα χαρτί και στυλό, (γ) παρουσίασε σύγχυση όταν τα αντικείμενα ήταν μπλεγμένα και μη κατηγοριοποιημένα, και (δ) καθυστέρησε σημαντικά στην ολοκλήρωση της καταμέτρησης.

Η παρατήρηση αυτή ανέδειξε με σαφήνεια ότι η χειροκίνητη καταμέτρηση εξοπλισμού απαιτεί όχι μόνο χρόνο, αλλά και εξοικείωση με τον χώρο και τον τρόπο οργάνωσης των αντικειμένων. Σε περιβάλλοντα όπου ο εξοπλισμός δεν είναι αυστηρά ταξινομημένος, η διαδικασία γίνεται ιδιαίτερα απαιτητική και επιρρεπής σε λάθη.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

#### *Σύγκριση χειροκίνητης και προτεινόμενης προσέγγισης*

Η σύγκριση μεταξύ της χειροκίνητης καταμέτρησης και της προτεινόμενης προσέγγισης αναδεικνύει σαφή πλεονεκτήματα υπέρ της δεύτερης, ιδιαίτερα σε επίπεδο μείωσης γνωστικού φόρτου, αποφυγής αποσπασματικών ενεργειών (σημειώσεις, επαναμετρήσεις), και υποστήριξης χρηστών χωρίς προηγούμενη εμπειρία.

Η προτεινόμενη λύση δεν αντικαθιστά πλήρως τον άνθρωπο, αλλά λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης, επιτρέποντας την πιο συστηματική και λιγότερο αγχωτική εκτέλεση της καταμέτρησης.

#### *Περιορισμοί της αξιολόγησης*

Η παρούσα αξιολόγηση πραγματοποιείται σε πιλοτικό και εργαστηριακό επίπεδο και, ως εκ τούτου, υπόκειται σε περιορισμούς. Δεν πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη ποσοτική σύγκριση με παραγωγικά περιβάλλοντα, ούτε αξιολόγηση σε μεγάλες αποθήκες με υψηλή πολυπλοκότητα.

Ωστόσο, οι ποιοτικές παρατηρήσεις και οι συζητήσεις με χρήστες παρέχουν ισχυρές ενδείξεις για τη χρησιμότητα και τη βιωσιμότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

#### *Συνολικά συμπεράσματα και προοπτικές*

Συνολικά, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων υποδεικνύει ότι η προτεινόμενη λύση για την καταμέτρηση αποθεμάτων μέσω εναέριας πλατφόρμας και υπολογιστικής όρασης παρουσιάζει ουσιαστικά πλεονεκτήματα έναντι χειροκίνητων πρακτικών, ιδίως σε περιβάλλοντα με περιορισμένη οργάνωση και μη εξειδικευμένο προσωπικό.

Τα αποτελέσματα της πιλοτικής αξιολόγησης θέτουν στέρεες βάσεις για περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος και υποστηρίζουν τη μετάβαση σε επόμενες φάσεις ανάπτυξης, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας, της ταχύτητας και της επιχειρησιακής αξιοποίησης της λύσης.

## 2.14. Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής

### 2.12.1. Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

#### Σενάριο 1: Υποστήριξη των επικείμενων προτύπων μετακβαντικής κρυπτογραφίας

Για την αξιολόγηση της υποστήριξης των επικείμενων προτύπων Μετακβαντικής Κρυπτογραφίας (Post-Quantum Cryptography - PQC) τόσο αναφορικά με τον χρόνο εκτέλεσης όσο και με την ενεργειακή κατανάλωση σε ένα πραγματικό σύστημα IIoT, δημιουργήθηκε ένα δίκτυο 6LoWPAN (IPv6 over BLE), αποτελούμενο από ένα nRF52840DK BLE SoC και ένα κόμβο αιχμής βασισμένους σε Linux. Στο πλαίσιο αυτό, αξιολογήθηκε η υλοποίηση της μετακβαντικής εκδοχής του πρωτοκόλλου EDHOC (PQ-EDHOC), η οποία επιτρέπει μετακβαντικά ασφαλή επικοινωνία από άκρο σε άκρο μεταξύ των δύο συσκευών.

Η στοίβα 6LoWPAN IPv6 over BLE επιλέχθηκε ώστε να αντιπροσωπεύει μια χαμηλής ισχύος IIoT αρχιτεκτονική επικοινωνίας, κατάλληλη για την αξιολόγηση της χρήσης του PQ-EDHOC σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία. Η ισχύς εκπομπής BLE ορίστηκε στα 0 dBm, με μέγιστο μήκος δεδομένων 251 bytes ανά πακέτο (όριο του προτύπου Bluetooth 4.2) και Μέγιστη Μονάδα Μετάδοσης (MTU) του πρωτοκόλλου L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) ίση με 512 bytes. Οι δύο συσκευές συνδέθηκαν απευθείας μεταξύ τους, χωρίς τη χρήση ενδιάμεσων συσκευών, επιτυγχάνοντας μέσο Χρόνο Μετάβασης και Επιστροφής (Round-Trip Time – RTT) 77,77ms σε 100 αλληλεπιδράσεις.

Το ενσωματωμένο σύστημα εκτελεί τον Initiator (πελάτης PQ-EDHOC), ενώ το Linux σύστημα κόμβο αιχμής που εκτελεί τον Responder (διακομιστής PQ-EDHOC), με μέγεθος μεταφοράς σε τμήματα 512 bytes και προς τις δύο πλευρές. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε ιδανικό περιβάλλον, όπου οι BLE συσκευές βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και δεν υπάρχει απώλεια πακέτων. Η λύση PQ-EDHOC αξιολογήθηκε, επιπλέον, σε πραγματικές συνθήκες, εξετάζοντας την απόδοση του Initiator στη συσκευή και συγκρίνοντάς την με το παραδοσιακό EDHOC που βασίζεται στην κλασική κρυπτογραφία.

Η συνολική χειραψία (handshake) του Initiator μετρήθηκε από τη δημιουργία του εφήμερου κλειδιού έως την παραγωγή του OSCORE παραγώγου. Τα εξεταζόμενα σύνολα κρυπτογραφικών σουιτών συνδύασαν το πρότυπο ML-KEM-512 (NIST) για τη διαδικασία ανταλλαγής κλειδιών με διάφορους μετακβαντικούς αλγορίθμους ψηφιακής υπογραφής, όπως το πρότυπο ML-DSA-44 (NIST) συνδυαζόμενο με το επιλεγμένο για τυποποίηση σχήμα FALCON, καθώς και υποψήφια σχήματα από τη νεότερη διαδικασία NIST για συμπαγείς PQ ψηφιακές υπογραφές, όπως τα HAWK και HAETAE. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν αναγνωριστικά διαπιστευτηρίων για τη μείωση του μεγέθους των μηνυμάτων.

Αναλύθηκαν ξεχωριστά η διαδικασία εκτέλεσης και οι διαδικασίες μετάδοσης και λήψης δεδομένων για τον χρόνο εκτέλεσης και τη μέση κατανάλωση ισχύος. Συγκεκριμένα, η διαδικασία μετάδοσης (TX) ξεκινά όταν το EDHOC έχει έτοιμο το πρώτο μήνυμα και τελειώνει όταν σταλεί το τελευταίο CoAP τμήμα μηνύματος επιβεβαίωσης (Confirmable Block). Η διαδικασία λήψης (RX) μετρείται από τη στιγμή λήψης του πρώτου μηνύματος επιβεβαίωσης (ACK 2.04 Changed) έως τη λήψη του τελευταίου μηνύματος επιβεβαίωσης του τελευταίου τμήματος (ACK 2.31) Continue.

Το κύριο αντικείμενο της μελέτης ήταν η αξιολόγηση του χρόνου εκτέλεσης, κατανάλωσης ισχύος και χρήσης μνήμης διαφορετικών μετακβαντικών κρυπτογραφικών σχημάτων και η υλοποίησή τους στο PQ-EDHOC handshake πρωτόκολλο. Οι τρόποι αξιολόγησης αναπτύχθηκαν με σκοπό την επιβεβαίωση δυνατότητας υλοποίησης αλγορίθμων μετακβαντικής κρυπτογραφίας σε IIoT περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων. Εξετάστηκαν τα παρακάτω σενάρια:

- **Benchmark ταχύτητας:** Μέτρηση του συνολικού χρόνου της χειραψίας PQ-EDHOC με τη χρήση διαφορετικών σουιτών Μετακβαντικής Κρυπτογραφίας (PQC).
- **Benchmark ισχύος και ενέργειας:** Αξιολόγηση της κατανάλωσης ισχύος του πρωτοκόλλου PQ-EDHOC κατά την εκτέλεση, με τη χρήση διαφορετικών σουιτών Μετακβαντικής Κρυπτογραφίας (PQC)
- **Χρήση μνήμης:** Αξιολόγηση της χρήσης μνήμης που απαιτεί το πρωτόκολλο PQ-EDHOC με τη χρήση διαφορετικών σουιτών Μετακβαντικής Κρυπτογραφίας (PQC).

*Σενάριο 2: Αυτοκυρίαρχη διαχείριση ταυτότητας και διαπιστευτηρίων για ασφαλές on-boarding IIoT συσκευών στον κόμβο αιχμής*

Για την αξιολόγηση των μηχανισμών προστασίας δεδομένων στον κόμβο αιχμής, με έμφαση στην ασφαλή αρχικοποίηση και on-boarding IIoT συσκευών μέσω αρχών Self-Sovereign Identity (SSI), υλοποιήθηκε μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε Kria KR260 Robotics Starter Kit, με λειτουργικό KRS OS (Ubuntu 22.04) και ενσωματωμένη μονάδα Trusted Platform Module (TPM). Ο κόμβος αιχμής λειτουργεί ως σημείο επιβολής πολιτικών ασφάλειας και διαχείρισης διαπιστευτηρίων, εξασφαλίζοντας κρυπτογραφική εμπιστοσύνη και διαλειτουργικότητα μεταξύ των IIoT συσκευών, των εφαρμογών και των backend υπηρεσιών.

Η πλατφόρμα ενσωματώνει Hyperledger Identus για την έκδοση, αποθήκευση και διαχείριση Verifiable Credentials (VCs) και Keycloak για έλεγχο πρόσβασης, βασισμένο σε OAuth 2.0 / OpenID Connect, τόσο για συσκευές όσο και για ανθρώπινους χρήστες. Παράλληλα, αξιοποιούνται πρωτόκολλα FIDO2 για ασφαλές device on-boarding (Device Initialize – DI, Transfer Ownership – TO2 και τελικό στάδιο ενεργοποίησης), αντικαθιστώντας την κεντρική οντότητα Rendezvous με μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική, όπου ο κόμβος αιχμής και η SSI υποδομή αναλαμβάνουν τον ρόλο αξιόπιστων μερών. Τα διαπιστευτήρια αγκυρώνονται σε blockchain υποδομή (π.χ. Cardano), η οποία λειτουργεί ως κατανεμημένο μητρώο εμπιστοσύνης για DIDs και σχήματα διαπιστευτηρίων, εξασφαλίζοντας ανιχνευσιμότητα αλλαγών και δυστροποποιητά (tamper-evident) αρχεία. Η χρήση Selective Disclosure JWT Verifiable Credentials (SD-JWT-VC) επιτρέπει επιλεκτική γνωστοποίηση πεδίων με χρήση αποδείξεων μηδενικής γνώσης (ZKPs), έτσι ώστε ο κάτοχος (IIoT συσκευή ή χρήστης) να μπορεί να αποδείξει ιδιότητες (π.χ. εξουσιοδότηση, ρόλο ή ηλικία) χωρίς να εκθέτει περιττά προσωπικά ή λειτουργικά δεδομένα. Αυτό συνδέει άμεσα το σενάριο με την ενότητα «Μηχανισμοί Προστασίας Δεδομένων στον Κόμβο Αιχμής», καθώς η προστασία επιτυγχάνεται από τον ίδιο τον κόμβο μέσω πολιτικών ελαχιστοποίησης δεδομένων και κρυπτογραφικών εγγυήσεων end-to-end.

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει έως έξι IIoT συσκευές, οι οποίες λειτουργούν ως holders/clients και εκτελούν διαδοχικά τις διαδικασίες: δημιουργία πορτοφολιού/ταυτότητας, έκδοση διαπιστευτηρίου, λήψη διαπιστευτηρίου, δημιουργία αποδείξεων (proofs) και παρουσίαση τους προς έναν verifier (π.χ. ιδιοκτήτη/χειριστή). Ο κόμβος αιχμής (Kria KR260) λειτουργεί ταυτόχρονα ως πλατφόρμα έκδοσης διαπιστευτηρίων (issuer) και ως σημείο διασύνδεσης με το blockchain.

*Σενάριο 3: Υποστήριξη επιταχυντή μετακβαντικής κρυπτογραφίας για ψηφιακές υπογραφές.*

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τα σενάρια με τα οποία ελέγχουμε και αξιολογούμε τη λύση μας για ML-DSA (Module-Lattice Digital Signature Algorithm), με στόχο την επιτάχυνση των υπολογιστικά απαιτητικών τμημάτων του αλγορίθμου σε FPGA, στο πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου HW/SW co-design. Ως σημείο εκκίνησης, πραγματοποιούμε προφίλ εκτέλεσης στο υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας (το πλέον απαιτητικό ως προς τον αριθμό πράξεων), ώστε να τεκμηριώσουμε ποσοτικά πού δαπανάται ο χρόνος. Η ανάλυση δείχνει ότι το κυρίαρχο υπολογιστικό κόστος προέρχεται από τη matrix-multiplication στο πεδίο NTT (δηλαδή, το σύνολο των NTT/INTT και των pointwise πράξεων), η οποία επηρεάζει οριζόντια όλες τις βασικές λειτουργίες του ML-DSA: Key Generation, Sign και Verify. Συνεπώς, τα σενάρια αξιολόγησης επικεντρώνονται στην επιτάχυνση αυτού ακριβώς του “hot path”, και στη μελέτη του πραγματικού κέρδους όταν αυτό ενσωματώνεται σε πλήρη εφαρμογή.

Η υλοποίηση και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε πλατφόρμα MPSoC τύπου Zynq, όπου το Processing System (PS) εκτελεί Linux εφαρμογή-ξενιστή (host) και το Programmable Logic (PL) -FPGA φιλοξενεί τον επιταχυντή ως hardware kernel. Το περιβάλλον εκτέλεσης βασίζεται στο οικοσύστημα Vitis/OpenCL, ώστε ο host κώδικας να εκφορτώνει (offload) το απαιτητικό υπολογιστικό τμήμα στον επιταχυντή μέσω του runtime.

Για να αποτυπώσουμε τόσο την “ιδανική” συμπεριφορά του επιταχυντή όσο και την πραγματική επίδοση σε συνθήκες συστήματος, εφαρμόζουμε δύο συμπληρωματικά σενάρια αξιολόγησης. Στο πρώτο, αξιολογούμε σε επίπεδο kernel τη μονάδα NTT-based matrix-multiplication απομονωμένα, ώστε να μετρήσουμε καθαρά latency/throughput και να ποσοτικοποιήσουμε την επίδραση της διασύνδεσης (μεταφορές δεδομένων, κλήσεις runtime). Στο δεύτερο, αξιολογούμε την πλήρη εφαρμογή ML-DSA σε Linux, όπου ο επιταχυντής ενσωματώνεται επιχειρησιακά στη ροή KeyGen/Sign/Verify και μετράται η

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

συνολική επιτάχυνση ανά λειτουργία και ανά επίπεδο ασφάλειας. Έτσι εξασφαλίζεται ότι τα αποτελέσματα αντανακλούν όχι μόνο την ισχύ του πυρήνα αλλά και τα πραγματικά overheads ολοκλήρωσης.

*Σενάριο 4: Υποστήριξη των αισθητήρων ανίχνευσης κακόβουλων δράσεων και αυτοπροστασία κόμβου αιχμής.*

Για τους αισθητήρες ασφαλείας που χρησιμοποιεί ο κόμβος αιχμής, αρχικά εστιάζουμε στον αισθητήρα ανίχνευσης κακόβουλων δράσεων με τη χρήση Μηχανικής/Βαθιάς Μάθησης. Η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και του παραγόμενου από αυτή αισθητήρα πραγματοποιείται μέσω μιας μελέτης σκοπιμότητας (feasibility study) που στοχεύει στην ανίχνευση κακόβουλης συμπεριφοράς σε run-time μέσα από “εύκολα συλλέξιμες” μετρικές λειτουργίας του Linux (π.χ. CPU load/usage, μνήμη, δίσκος) και τη συσχέτισή τους με τεχνικές/εκμεταλλεύσεις που περιγράφονται στη βάση γνώσης MITRE ATT&CK. Η βασική ιδέα είναι ότι μια σύνθετη επίθεση ή κακόβουλη καμπάνια μπορεί να αποδοθεί ως ακολουθία ATT&CK τεχνικών (attack graph) και ότι η εκτέλεση αυτής της ακολουθίας αφήνει “ίχνη” στο προφίλ κατανάλωσης πόρων του συστήματος, τα οποία μπορούν να μάθουν μοντέλα DL ώστε να ταξινομούν κάθε χρονική στιγμή ως “κακόβουλη” ή “κανονική”.

Ως βασικό σενάριο αξιολόγησης επιλέγεται το SysJoker, ένα προηγμένο backdoor malware για το οποίο οι συγγραφείς σημειώνουν ότι δεν υπάρχει δημόσια διαθέσιμο dataset, άρα απαιτείται παραγωγή δεδομένων από το μηδέν. Το SysJoker περιγράφεται ως malware που μεταμφιέζεται ως system update, δημιουργεί/καθορίζει C2 ρυθμίσεις αποκωδικοποιώντας πληροφορία που ανακτάται από υπηρεσία όπως Google Drive, και παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ανά λειτουργικό. Για το Linux σενάριο, αξιοποιείται δημοσιευμένο SysJoker Attack Graph (AttackIQ) και αναλύεται η αντιστοιχία συμπεριφοράς-ATT&CK τεχνικών.

Το σενάριο επίθεσης (σε Linux) μοντελοποιείται ως διαδοχική εκτέλεση συγκεκριμένων ATT&CK τεχνικών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ακολουθία ξεκινά με T1105 (Ingress Tool Transfer) για μεταφορά/λήψη εργαλείων ή αρχείων στο σύστημα, ακολουθεί T1033 (System Owner/User Discovery) μέσω εντολών όπως id -u και whoami, συνεχίζει με T1564.001 (Hide Artifacts: Hidden Files and Directories) (π.χ. μετονομασίες με “.” prefix), με επιμονή μέσω T1053.003 (Cron) και εκτέλεση μέσω T1059.004 (Unix Shell) (π.χ. nohup), έπειτα συλλογή δικτυακής πληροφορίας (T1016, π.χ. ifconfig) και system info (T1082, π.χ. uname -rms). Τέλος, περιγράφεται μηχανισμός “dead drop resolver” για απόκτηση token/πληροφορίας C2 από νόμιμη web υπηρεσία (T1102.001) και επικοινωνία επιπέδου εφαρμογής μέσω web πρωτοκόλλων (T1071.001) με HTTP POST/GET.

Για το πειραματικό περιβάλλον, χρησιμοποιείται μία Linux Virtual Machine με σκοπό να προσομοιωθεί μια Linux-enabled embedded συσκευή. Στα αρχικά πειράματα, το σύστημα αφήνεται idle (χωρίς πρόσθετο workload), ώστε οι μεταβολές στις μετρικές να αποδίδονται κυρίως στην εκτέλεση των τεχνικών και στα monitoring εργαλεία.

Η αξιολόγηση των DL μοντέλων υλοποιείται ως πείραμα σύγκρισης τριών ταξινομητών (FCN, CNN, LSTM) σε τρεις διαφορετικές διατυπώσεις χρονοπαραθύρου (window sizes): (20,20), (40,20), (60,20). Η επιλογή γίνεται με βάση μετρικές επίδοσης που περιλαμβάνουν Accuracy (ACY), False Positive Rate (FPR) και False Negative Rate (FNR), ώστε να εντοπιστεί ο συνδυασμός μοντέλου-παραθύρου με την καλύτερη πρακτική συμπεριφορά στην ανίχνευση.

#### 2.12.2. Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

*Σενάριο 1: Υποστήριξη των επικείμενων προτύπων μετακβαντικής κρυπτογραφίας*

Ο λειτουργικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε μέσω μιας λεπτομερούς διαδικασίας μετρήσεων για την αξιολόγηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας των κρυπτογραφικών πρωτοκόλλων. Η διαδικασία μετρήσεων περιλάμβανε τα εξής:

- **Έλεγχος Ταχύτητας:** Για την ανάλυση του χρόνου εκτέλεσης χρησιμοποιήθηκε ο ενσωματωμένος χρονομετρητής του μικροελεγκτή nRF52840. Ο συγκεκριμένος χρονομετρητής αποτελεί ένα περιφεριακό γενικού σκοπού που λειτουργεί με τη συχνότητα του High-Frequency Clock (HFCLK) στα 16 MHz. Για την αύξηση της ακρίβειας μετρήσεων ενεργοποιήθηκε ο εξωτερικός ταλαντωτής υψηλής συχνότητας (high-frequency crystal oscillator HF XO). Οι μετρήσεις κύκλων ρολογιού που λαμβάνονται

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

στα 16 MHz προσαρμόζονται στη συχνότητα του επεξεργαστή στα 64 MHz, ώστε να εκτιμηθεί ο αριθμός κύκλων CPU. Για κάθε σχήμα πραγματοποιήθηκαν 100 εκτελέσεις, και καταγράφηκαν οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

- **Έλεγχος Κατανάλωσης Ισχύος και Ενέργειας:** Η κατανάλωση ισχύος και ενέργειας μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρακολουθώντας το ρεύμα που καταναλώνεται από το SoC nRF52840 μέσω της πλακέτας ανάπτυξης nRF52840 DK. Για τη βέλτιστη αξιοποίηση των λειτουργιών χαμηλής ισχύος του μικροελεγκτή, η τάση λειτουργίας (VDD) μειώθηκε μεταξύ 1.7 V και 3.6 V. Για την αποφυγή θορύβου από την τροφοδοσία USB, η πλακέτα τροφοδοτήθηκε εξωτερικά από τον ακροδέκτη P21 με τάση 3.0 V. Η πλακέτα τροποποιήθηκε για μετρήσεις ισχύος, κόβοντας τη σχετική διαδρομή PCB, συνδέοντας τους ακροδέκτες με μια αντίσταση 10 Ω. Το στιγμιαίο ρεύμα υπολογίστηκε από την πτώση τάσης στην αντίσταση, μετρώντας τη διαφορά μεταξύ δύο σημάτων τάσης μέσω παλμογράφου (PicoScope 5444B, σειρά 5000, 1 GS/s real-time sampling). Τρία σήματα ενεργοποίησης (triggers) συνδέθηκαν στους ακροδέκτες εισόδου-εξόδου γενικού σκοπού D0, D1 και D3 της πλακέτας για τον έλεγχο των ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της μέτρησης κατανάλωσης κατά τη διάρκεια των επιμέρους δοκιμών κάθε διαφορετικής διαδικασίας (επεξεργασία, μετάδοση, λήψη) όπως αναφέρθηκε ανωτέρω. Χρησιμοποιήθηκαν ανιχνευτές (probes) με απόσβεση 1x και ενεργοποιήθηκε η λειτουργία μέσου όρου (averaging mode) του παλμογράφου για τη μείωση του θορύβου. Ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 2 MS, με ανάλυση 14 bit, και χρησιμοποιήθηκε επαναλαμβανόμενο εξωτερικό trigger ώστε να αποθηκεύονται όσο το δυνατόν περισσότερες εκτελέσεις των αλγορίθμων στη μνήμη του παλμογράφου. Τα συλλεχθέντα δεδομένα εισήχθησαν σε πρόγραμμα Python για τον υπολογισμό της μέσης κατανάλωσης ισχύος, του χρόνου επεξεργασίας και της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.
- **Συνολικό Μέγεθος Κώδικα και Χρήση Μνήμης:** Το συνολικό μέγεθος κώδικα καταγράφηκε σε όρους των τμημάτων .text, .bss και .data, μέσω του εργαλείου arm-zephyr-eabi-size της εργαλειοθήκης ARM GCC. Επιπλέον, η συνολική χρήση Flash και RAM υπολογίστηκε ανεξάρτητα

*Σενάριο 2: Αυτοκυρίαρχη διαχείριση ταυτότητας και διαπιστευτηρίων για ασφαλές on-boarding IIoT συσκευών στον κόμβο αιχμής*

Ο λειτουργικός έλεγχος του Σεναρίου 2 βασίστηκε σε επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις της πλήρους ροής ταυτότητας και διαπιστευτηρίων πάνω στην πλατφόρμα κόμβου αιχμής (Kria KR260 με KRS OS, Hyperledger Identus, Identus Wallet, Keycloak και αγκύρωση σε blockchain). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έως έξι IIoT συσκευές που λειτούργησαν ως *holders* και εκτέλεσαν διαδοχικά: δημιουργία wallet/ταυτότητας, λήψη του πρώτου Verifiable Credential (VC), δημιουργία Verifiable Presentation (VP) και παρουσίασή της σε *verifier*.

- **Λειτουργικός έλεγχος ροής ταυτότητας:** Για το ποσοστό επιτυχούς ολοκλήρωσης ροής ταυτότητας/on-boarding καταγράφηκε, για κάθε σενάριο με διαφορετικό αριθμό συσκευών, ο αριθμός των συσκευών που ολοκλήρωσαν με επιτυχία:
  - δημιουργία wallet,
  - λήψη και ασφαλή αποθήκευση του αρχικού VC,
  - ενημέρωση της κατάστασης πιστοποίησης στην πλατφόρμα.

Το ποσοστό επιτυχίας ορίστηκε ως ο λόγος «συσκευές με πλήρη ροή / συνολικές συσκευές». Σε όλες τις εκτελέσεις επιτεύχθηκε πλήρης επιτυχία, επιβεβαιώνοντας τη λειτουργική ωριμότητα του μηχανισμού on-boarding και της προστασίας δεδομένων στον κόμβο αιχμής.

**Μετρήσεις καθυστέρησης βασικών λειτουργιών:** Για το χρόνο ολοκλήρωσης βασικών λειτουργιών μετρήθηκε ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης (elapsed time) για τις εξής διαδικασίες, ως συνάρτηση του πλήθους ενεργών IIoT συσκευών:

- Holder–Verifier / Holder–Issuer Connection Time: χρόνος σύναψης ασφαλούς καναλιού μεταξύ συσκευής και πλατφόρμας, συμπεριλαμβανομένης της έκδοσης tokens μέσω Keycloak.
- Credential Creation Time: χρόνος από την έναρξη δημιουργίας VC στην πλατφόρμα έως την ολοκλήρωση της υπογραφής και, όπου απαιτείται, της αγκύρωσης στο blockchain.
- Credential Reception Time: χρόνος από τη διαθεσιμότητα του VC στον issuer έως την παραλαβή και αποθήκευση του στο wallet της συσκευής.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- Proof Creation Time: χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία VP με Selective Disclosure / SD-JWT-VC και, όπου εφαρμόζεται, ZKPs.
- Proof Reception & Verification Time: χρόνος που απαιτείται στον verifier για να λάβει, να επαληθεύσει υπογραφές, να ελέγξει claims και να διασταυρώσει την κατάσταση DID/διαπιστευτηρίων.

Οι τιμές χρόνου που προέκυψαν παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων για σενάρια IIoT, ακόμη και με αυξανόμενο αριθμό συσκευών.

**Έλεγχος κλιμάκωσης και επαληθεύσιμων παρουσιάσεων:** Για τον αριθμό επαληθεύσιμων παρουσιάσεων μετρήθηκε, ανά κύκλο δοκιμών και για διαφορετικό αριθμό συσκευών:

- πόσες VPs δημιουργήθηκαν επιτυχώς,
- πόσες VPs επαληθεύτηκαν επιτυχώς,
- και σε ποιο συνολικό χρονικό διάστημα ολοκληρώθηκε ο κύκλος δημιουργίας–παράδοσης–επαλήθευσης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο κόμβος αιχμής μπορεί να εξυπηρετήσει πολλαπλά παράλληλα αιτήματα ταυτοποίησης/εξουσιοδότησης χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα κλιμάκωσης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής.

*Σενάριο 3: Υποστήριξη επιταχυντή μετακβαντικής κρυπτογραφίας για ψηφιακές υπογραφές.*

Ο έλεγχος λειτουργίας της λύσης μας ξεκινά από την επιβεβαίωση ότι το επιταχυνόμενο τμήμα είναι πράγματι το κυρίαρχο bottleneck του ML-DSA και ότι η μεταφορά του σε PL μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά και τις τρεις λειτουργίες (KeyGen/Sign/Verify). Η επιβεβαίωση αυτή γίνεται με συστηματική μέτρηση χρόνων σε επίπεδο υπορουτινών και με αντιστοίχιση του υπολογιστικού κόστους στο κομμάτι της NTT-based matrix-multiplication (NTT/INTT και pointwise πράξεις), το οποίο εμφανίζεται επαναληπτικά στη ροή του αλγορίθμου.

Σε επίπεδο HLS/RTL παραγωγής, επιβεβαιώνουμε τη σωστή λειτουργική διάσπαση του kernel σε σαφή υποτμήματα που διευκολύνουν τη βελτιστοποίηση από τον HLS compiler και περιορίζουν τη μνήμη που απαιτείται από κρίσιμες λειτουργίες όπως η INTT και η Montgomery reduction. Η συνάρτηση κορυφής του kernel υλοποιείται με **dataflow** προσανατολισμό, ώστε να επιτρέπεται task-level pipelining και επικάλυψη (overlap) της εκτέλεσης μεταξύ υπομονάδων/βρόχων. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ταυτόχρονη λειτουργία (concurrency) στην RTL υλοποίηση και βελτιώνεται ο συνολικός ρυθμός διεκπεραίωσης (throughput) του σχεδιασμού.

Κρίσιμο σημείο επιβεβαίωσης είναι η σωστή οργάνωση μνήμης και η σταθερή ροή δεδομένων μεταξύ των τμημάτων NTT, pointwise πράξεων/INTT και διεπαφών εισόδου-εξόδου. Για να στηρίξουμε το pipelining, τοποθετούμε ενδιάμεσες μεταβλητές σε **BRAM** και εφαρμόζουμε κατατμήσεις (partitioning) σύμφωνα με τις διαστάσεις των rowvectors (π.χ. κατά L/K, όπου αυτό είναι λειτουργικά αναγκαίο), ώστε να αποφεύγονται bottlenecks πρόσβασης και να επιτυγχάνεται παράλληλη τροφοδότηση των υπομονάδων. Παράλληλα, η επικοινωνία host–kernel υλοποιείται μέσω **AXI memory-mapped** προσέγγισης, επιτρέποντας τη χρήση DMA από το σύστημα για μεταφορές προς/από DDR με μέγιστο δυνατό ρυθμό.

Τέλος, ως μέρος της επιβεβαίωσης ορθής ολοκλήρωσης στο επίπεδο λογισμικού, εξασφαλίζουμε ότι η εκτέλεση μέσω OpenCL/Vitis runtime γίνεται με ελαχιστοποίηση των overheads. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι αντικείμενα όπως buffers και kernel arguments οργανώνονται ώστε να αποφεύγονται επαναλαμβανόμενες δαπανηρές δεσμεύσεις/χαρτογραφήσεις μνήμης, ιδιαίτερα σε σενάρια όπου ο kernel καλείται πολλαπλές φορές μέσα σε μία λειτουργία (π.χ. κατά τη διαδικασία υπογραφής). Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζουμε ότι η συνολική επιτάχυνση δεν περιορίζεται από τη “λογισμική” πλευρά της διασύνδεσης.

*Σενάριο 4: Υποστήριξη των αισθητήρων ανίχνευσης κακόβουλων δράσεων και αυτοπροστασία κόμβου αιχμής.*

Εστιάζοντας στην επιβεβαίωση της μεθοδολογίας και του παραγόμενου από αυτή αισθητήρα ανίχνευσης κακόβουλων δράσεων με τη χρήση Μηχανικής/Βαθιάς Μάθησης, προκύπτουν τα παρακάτω.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Η λειτουργική επιβεβαίωση (verification) της μεθοδολογίας στηρίζεται πρωτίστως στη σωστή και επαναλήψιμη παραγωγή ενός **labeled dataset** που να αντιστοιχεί με αξιοπιστία σε “κανονική” και “κακόβουλη” λειτουργία. Για τη συλλογή μετρικών από το σύστημα, χρησιμοποιείται το **Glances**, ένα Python-based cross-platform monitoring εργαλείο που αξιοποιεί τη βιβλιοθήκη psutil και εξάγει μεγάλο πλήθος μετρικών όπως CPU usage/load και χρήση μνήμης. Η δειγματοληψία επιλέγεται στα **100 ms** και τα δεδομένα εξάγονται σε **CSV** μέσω του Glances CLI.

Παράλληλα, η εξομοίωση της συμπεριφοράς του SysJoker δεν γίνεται ως “μόλυνση”, αλλά μέσω **Atomic Red Team**, δηλαδή βιβλιοθήκης tests χαρτογραφημένων στο MITRE ATT&CK, η οποία έχει σχεδιαστεί για emulation τεχνικών “χωρίς να επηρεάζει αρνητικά” το σύστημα και με δυνατότητα cleanup ώστε να επανέρχεται το περιβάλλον στην αρχική του κατάσταση. Για να εκτελεστεί η ακολουθία τεχνικών όπως ορίζει το attack graph, υλοποιείται Python script που χρησιμοποιεί το πακέτο **atomic-operator** για ανάγνωση των YAML οδηγιών και εκτέλεση των tests. Επιχειρησιακά, οι τεχνικές εκτελούνται **στη σειρά** που ορίζει το attack graph και το script καταγράφει για κάθε “επίθεση” τον χρόνο έναρξης και λήξης σε CSV.

Ιδιαίτερα σημαντικό σημείο ελέγχου είναι η αποφυγή “απομνημόνευσης” ενός σταθερού χρονικού μοτίβου από τα μοντέλα. Για αυτό, επιλέχτηκε να εισάγουν **τυχαία καθυστέρηση 40–60 δευτερολέπτων** μεταξύ των tests. Μετά την ολοκλήρωση των εκτελέσεων, το CSV του Glances και το CSV των tests **συνενώνονται** αυτοματοποιημένα μέσω Python script ώστε να παραχθεί το τελικό dataset, όπου κάθε γραμμή επισήμαινεται με **label=1** όσο “τρέχουν” τεχνικές του κακόβουλου λογισμικού και **label=0 διαφορετικά**.

Στο στάδιο προεπεξεργασίας και επιβεβαίωσης των δεδομένων, εφαρμόζονται διαδικασίες feature engineering. Επειδή το Glances μπορεί να παράγει πολύ μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών, επισήμαινεται ότι ορισμένα έχουν **μηδενική διακύμανση** (αναφέρονται ενδεικτικά cru.irq και cru.guest nice) και αφαιρούνται. Ακολούθως εφαρμόζεται **standardization/normalization** με μέσο και τυπική απόκλιση ώστε τα χαρακτηριστικά να έχουν μηδενικό μέσο και μοναδιαία διακύμανση.

Το τελικό dataset περιγράφεται ποσοτικά: περιλαμβάνει περίπου **257k timestamps** (αναφέρονται 257,118/257,119), με **7%** των labels να είναι 1 και **93%** να είναι 0, ενώ μετά από αρχική επιλογή χαρακτηριστικών οι συγγραφείς εστιάζουν σε **20 features**. Για τη σωστή διατύπωση ως πρόβλημα χρονοσειρών, η εκπαίδευση γίνεται σε **χρονικά παράθυρα** με είσοδο διαστάσεων (WindowSize, NumberOfFeatures), όπου κάθε παράθυρο  $X[t-\text{WindowSize}:t,:]$  εκπαιδεύεται να προβλέπει το  $Y[t]$  και το παράθυρο μετακινείται με step size 1. Επιπλέον αναφέρονται κοινές υπερπαραμέτροι εκπαίδευσης (batch size 128, Adam optimizer, learning rate  $10e-4$ ).

Τέλος, ως μηχανισμός ελέγχου της εκπαίδευσης/υπερεκπαίδευσης, εφαρμόζεται **Early Stopping** με μέγιστο **40 epochs**, παρακολουθώντας τη loss function και ενημερώνοντας τα βάρη μόνο όταν η loss μειώνεται. Στο paper τεκμηριώνεται επίσης ότι για το CNN η loss ελαχιστοποιείται γύρω στο epoch 29, ενώ για το LSTM γύρω στο epoch 38, στοιχείο που λειτουργεί ως πρακτική επιβεβαίωση ότι το training “κλειδώνει” σε κατάλληλο σημείο πριν το overfitting.

#### 2.12.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

##### *Σενάριο 1: Υποστήριξη των επικείμενων προτύπων μετακβαντικής κρυπτογραφίας*

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των σεναρίων δοκιμών βασίστηκε στους βασικούς παράγοντες απόδοσης που ορίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν τον χρόνο εκτέλεσης, την κατανάλωση ισχύος, τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και τη χρήση μνήμης. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για διαφορετικές μετακβαντικές σουίτες κρυπτογράφησης, συγκεκριμένα για τους συνδυασμούς του ML-KEM-512 με τις υπογραφές FALCON, ML-DSA-44, HAWK και HAETAE2, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα της κλασικής σουίτας secp256r1/ECDSA, καθώς και την αξιολόγηση του πρόσθετου υπολογιστικού και επικοινωνιακού κόστους (overhead) που εισάγουν οι μετακβαντικοί μηχανισμοί και της εφικτότητάς τους σε πραγματικά περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους, όπως αυτά του Βιομηχανικού Διαδικτύου των Πραγμάτων (IIoT).

##### **Αποτελέσματα Ελέγχου Ταχύτητας:**

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζει ο Πίνακας 25, έδειξαν ότι δύο από τις μετακβαντικές σουίτες κρυπτογράφησης παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με την παραδοσιακή σουίτα secp256r1/ECDSA, συγκεκριμένα οι ML-KEM-512/FALCON1 και ML-KEM-512/HAWK1, οι οποίες είναι κατά 19% και 54% ταχύτερες αντίστοιχα. Οι άλλες δύο σουίτες, ML-KEM-512/ML-DSA-44 και ML-KEM-512/HAETAE2, εμφανίζουν χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με την secp256r1/ECDSA.

Παρατηρείται επίσης ότι όλες οι μετακβαντικές σουίτες παρουσιάζουν μικρότερο χρόνο επεξεργασίας (processing time) από την secp256r1/ECDSA. Για τις σουίτες ML-KEM-512/ML-DSA-44 και ML-KEM-512/HAETAE2, η μειωμένη απόδοση αποδίδεται κυρίως στον αυξημένο χρόνο μετάδοσης και λήψης (Tx/Rx). Τα μεγαλύτερα δεδομένα που παράγουν οι PQC αλγόριθμοι προκαλούν σημαντική αύξηση στον συνολικό χρόνο του handshake όταν τα πακέτα μεταδίδονται και λαμβάνονται μέσω του πρωτοκόλλου BLE. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής μετακβαντικών αλγορίθμων με μικρότερο επικοινωνιακό αποτύπωμα για εφαρμογές σε δίκτυα με περιορισμένους πόρους.

Πίνακας 25 Αποτελέσματα συνολικού χρόνου χειραψίας του PQ-EDHOC

Cipher Suite	Cred. Type	Total Handshake Time (ms)	Processing Time (ms)	Tx/Rx Time (ms)
ML-KEM-512/FALCON1	x5t	1453.36	764.84	688.52
ML-KEM-512/ML-DSA-44	x5t	3103.93	568.86	2535.07
ML-KEM-512/HAWK1	x5t	825.43	133.58	691.85
ML-KEM-512/HAETAE2	x5t	2370.32	525.83	1844.49
secp256r1/ECDSA	x5t	1748.81	1431.26	251.19

#### Αποτελέσματα Κατανάλωσης Ισχύος και Ενέργειας:

Από τα εν λόγω αποτελέσματα παρατηρείται ότι η μέση κατανάλωση ισχύος κατά τη φάση επεξεργασίας είναι υψηλότερη από εκείνη κατά τις φάσεις μετάδοσης και λήψης των μηνυμάτων του πρωτοκόλλου. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που παρατηρούμε ότι τρεις από τις μετακβαντικές σουίτες καταναλώνουν λιγότερη συνολική ενέργεια σε σχέση με την παραδοσιακή secp256r1/ECDSA, όπως δείχνουν ο Πίνακας 26 και η Εικόνα 55. Πιο συγκεκριμένα, αν και η σουίτα ML-KEM-512/HAETAE2 απαιτεί περισσότερο συνολικό χρόνο για μία χειραψία, το μεγαλύτερο μέρος αυτού του χρόνου δαπανάται στη φάση Tx/Rx, όπου η κατανάλωση ισχύος είναι χαμηλότερη, με αποτέλεσμα και η συνολική κατανάλωση ενέργειας να είναι ελαφρώς μικρότερη από εκείνη της secp256r1/ECDSA. Από την άλλη πλευρά, η ML-KEM-512/ML-DSA-44 δεν εμφανίζει καλύτερη ενεργειακή απόδοση, ωστόσο επιτυγχάνει βελτιωμένο συνολικό χρόνο χειραψίας σε σχέση με την secp256r1/ECDSA.

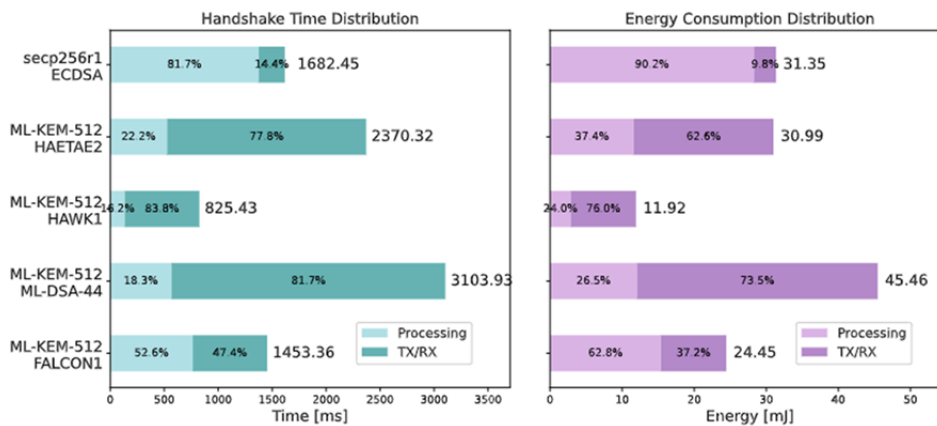
Για να εκτιμηθεί κατά πόσο το προτεινόμενο πρωτόκολλο PQ-EDHOC μπορεί να θεωρηθεί ενεργειακά απαγορευτικό σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, εξετάζεται το παράδειγμα μιας μπαταρίας τύπου CR2032 με ενεργειακή χωρητικότητα 2322 J. Σε αυτό το σενάριο, υπολογίστηκε ο αριθμός των αλληλεπιδράσεων PQ-EDHOC που μπορούν να εκτελεστούν για κάθε σουίτα. Το καλύτερο αποτέλεσμα καταγράφηκε με τη σουίτα ML-KEM-512/HAWK1, η οποία μπορεί να εκτελεστεί περίπου **194.700 φορές**, ενώ το χειρότερο με τη ML-KEM-512/ML-DSA-44, που μπορεί να εκτελεστεί περίπου **51.000 φορές**. Η παραδοσιακή secp256r1/ECDSA μπορεί να εκτελεστεί περίπου **74.000 φορές**. Συνεπώς, προκύπτει ότι το PQ-EDHOC όχι μόνο είναι κατάλληλο για πραγματικές εφαρμογές IoT που τροφοδοτούνται από μπαταρία, αλλά μπορεί να επιτύχει και καλύτερη ενεργειακή απόδοση με πιο ενεργειακά “φιλικές” σουίτες κρυπτογράφησης σε σχέση με τις κλασικές λύσεις EDHOC.

Πίνακας 26 Αξιολόγηση ισχύος και ενέργειας κατά τη συνολική χειραψία του PQ-EDHOC

Cipher Suite	Cred. Type	Avg. Power (mW)			Energy (mJ)		
		Total	Proc.	Tx/Rx	Total	Proc.	Tx/Rx
ML-KEM-512/FALCON1	x5t	16.82	20.08	13.21	24.45	15.35	9.09
ML-KEM-512/ML-DSA-44	x5t	15.96	21.16	13.18	45.46	12.03	33.42

Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

ML-KEM-512/HAWK1	x5t	14.46	21.45	13.1	11.92	2.86	9.06
ML-KEM-512/HAETAΕ2	x5t	16.53	22.06	10.51	30.99	11.59	19.39
Secp256r1/ECDSA	x5t	18.40	19.76	12.23	31.35	28.28	3.07



Εικόνα 55 Σύγκριση χρόνου χειραψιάς και κατανάλωσης ενέργειας για το PQ-EDHOC

Αποτελέσματα Χρήσης Μνήμης:

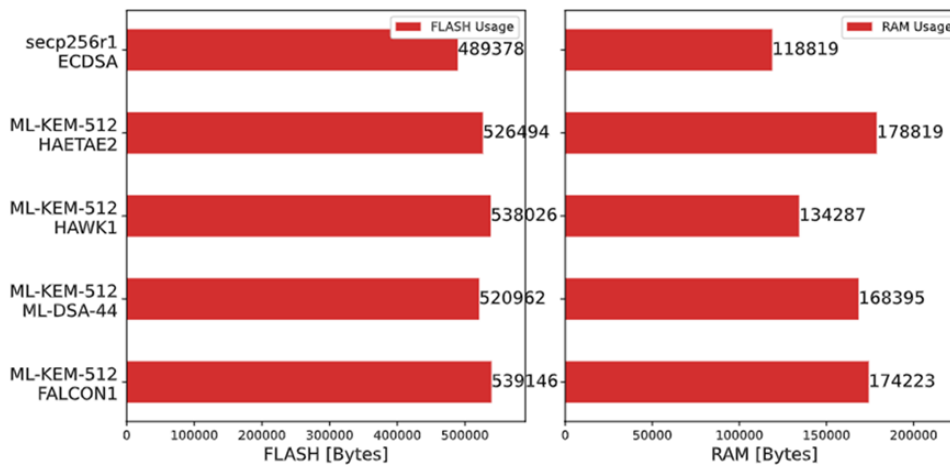
Σε ότι αφορά τη χρήση μνήμης Flash, το PQ-EDHOC απαιτεί ελαφρώς μεγαλύτερη μνήμη από το κλασικό EDHOC (Πίνακας 27 & Εικόνα 56). Συγκεκριμένα, το EDHOC με τη σουίτα secp256r1/ECDSA χρησιμοποιεί το 48.9% της διαθέσιμης Flash στην πλατφόρμα nrf52840dk, ενώ το PQ-EDHOC, στη χειρότερη περίπτωση, απαιτεί 53.9%. Αυτό δείχνει ότι όλες οι σουίτες είναι συμβατές με τους περιορισμούς της ενσωματωμένης πλατφόρμας.

Αναφορικά με τη χρήση RAM, το PQ-EDHOC απαιτεί περισσότερη μνήμη σε σχέση με το κλασικό EDHOC. Η παραδοσιακή secp256r1/ECDSA απαιτεί το 46.4% της συνολικής RAM του συστήματος, ενώ η ML-KEM-512/HAWK1 απαιτεί μόνο 13% περισσότερη RAM, καθιστώντας τη μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για ρεαλιστικές εφαρμογές IoT. Οι υπόλοιπες σουίτες απαιτούν πάνω από 66% της RAM, γεγονός που επιβάλλει πρόσθετους περιορισμούς στη διαθέσιμη μνήμη για εφαρμογές που θα λειτουργούν σε τέτοια ενσωματωμένα συστήματα.

Πίνακας 27 Μέγεθος επικοινωνίας και χρήση μνήμης του PQ-EDHOC

Cipher Suite	Cred. Type	Comm Sizes (Bytes)	Memory Usage (Bytes)			FLASH Usage (%)	RAM Usage (%)
			Text	Data	bss		
ML-KEM-512/FALCON1	x5t	3959	517998	21148	153075	53.9	68.1
ML-KEM-512/ML-DSA-44	x5t	9780	499862	21100	147295	52.1	65.8
ML-KEM-512/HAWK1	x5t	3756	516878	21148	113139	53.8	52.5
ML-KEM-512/HAETAΕ2	x5t	7208	504930	21564	157255	52.6	69.9
Secp256r1/ECDSA	x5t	572	468230	21148	97671	48.9	46.4

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 56 Σύγκριση χρήσης μνήμης του PQ-EDHOC (FLASH και RAM)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν ότι μια κβαντικά ανθεκτική εκδοχή του πρωτοκόλλου EDHOC, με τις επιλεγμένες σουίτες κρυπτογράφησης που αξιολογήθηκαν σε ένα ρεαλιστικό σενάριο IIoT, είναι εφικτή και αποδοτική ως προς τον χρόνο εκτέλεσης και την κατανάλωση πόρων. Επιπλέον, οι δύο σουίτες ML-KEM-512/HAWK1 και ML-KEM-512/FALCON1 μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλοι αντικαταστάτες των κλασικών κρυπτογραφικών μεθόδων, καθώς εμφανίζουν καλύτερη απόδοση σε χρόνο εκτέλεσης και κατανάλωση ενέργειας, με ένα σχετικά μικρό επιπλέον κόστος στη χρήση μνήμης.

Καθώς η έρευνα προχωρά, αναμένεται η ανάπτυξη περισσότερο βελτιστοποιημένων υλοποιήσεων, που θα μειώσουν περαιτέρω το κόστος μνήμης. Συνολικά, το EDHOC με τη σουίτα ML-KEM-512/HAWK1 αναδεικνύεται ως ιδιαίτερα υποσχόμενος υποψήφιος, ακόμη και με την τρέχουσα μη βελτιστοποιημένη υλοποίηση του HAWK1. Ωστόσο, η επιτυχία της συγκεκριμένης προσέγγισης θα εξαρτηθεί από τη τυποποίηση των υπογραφών HAWK μέσω της προτυποποιημένης διαδικασίας από τον NIST.

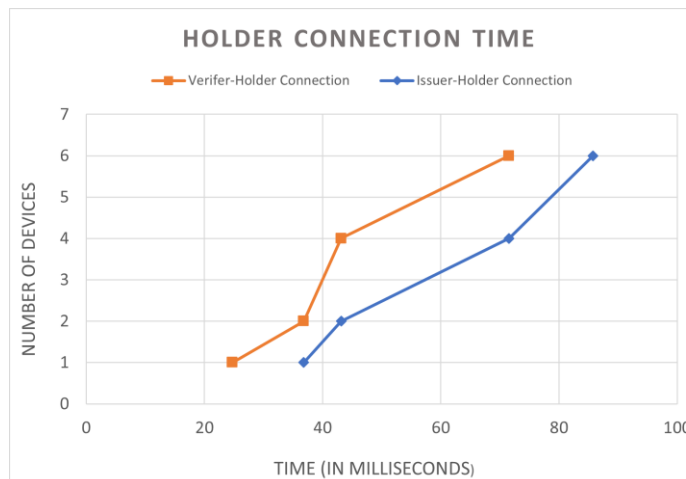
Στο εξεταζόμενο ρεαλιστικό σενάριο του Βιομηχανικού Διαδικτύου των Πραγμάτων (IIoT), το επιπλέον κόστος που προκύπτει από τα μεγαλύτερα τεχνουργήματα (artifacts) των μετακβαντικών αλγορίθμων διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον συνολικό χρόνο χειραψίας. Από την άλλη πλευρά, το κόστος αυτό δεν αντικατοπτρίζεται εξίσου έντονα στην κατανάλωση ενέργειας, χάρη στη χρήση πρωτοκόλλων μετάδοσης χαμηλής ισχύος με υποστήριξη σε επίπεδο υλικού.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η ενσωμάτωση μετακβαντικών μηχανισμών ασφάλειας στο EDHOC είναι τεχνικά εφικτή και ενεργειακά βιώσιμη, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και την προστασία των συστημάτων μας απέναντι στις μελλοντικές κβαντικές απειλές.

[Σενάριο 2: Αυτοκυρίαρχη διαχείριση ταυτότητας και διαπιστευτηρίων για ασφαλές on-boarding IIoT συσκευών στον κόμβο αιχμής](#)

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αποτυπώνουν τη συμπεριφορά της πλατφόρμας ως προς τις τέσσερις βασικές διαδικασίες: σύνδεση holder με verifier/issuer, δημιουργία διαπιστευτηρίων, λήψη διαπιστευτηρίων και δημιουργία/λήψη αποδείξεων (proofs). Όλες οι μετρήσεις εκφράζονται σε συνολικό χρόνο εκτέλεσης (elapsed time) ως συνάρτηση του αριθμού των IIoT συσκευών (έως έξι), ώστε να τεκμηριωθεί η επίτευξη των KPIs. Η αρχική φάση σύνδεσης μεταξύ IIoT συσκευής (holder) και Verifier/Issuer (σύναψη ασφαλούς καναλιού, έκδοση tokens μέσω Keycloak) παρουσιάζεται στην Εικόνα 57. Οι χρόνοι αυτοί παραμένουν σε αποδεκτά επίπεδα, ακόμη και όταν αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών, αποδεικνύοντας ότι η διαδικασία έναρξης συνεδρίας δεν αποτελεί bottleneck για το on-boarding (KPI1, έναρξη ροής wallet/VC).

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

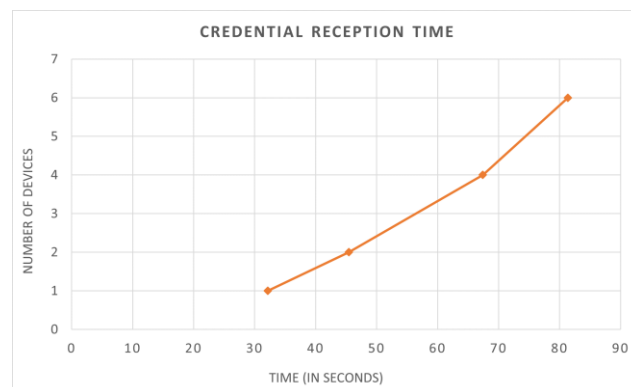


Εικόνα 57 Χρόνος σύνδεσης κατόχου (Verifier-Holder και Issuer-Holder)

Η δημιουργία και λήψη διαπιστευτηρίων αξιολογείται στην Εικόνα 58 και στην Εικόνα 59, όπου αποτυπώνεται αντίστοιχα ο χρόνος αλληλεπίδρασης μεταξύ issuer-platform (δημιουργία και υπογραφή VC, συμπεριλαμβανομένης της αγκύρωσης στο Cardano) και issuer-holder (παράδοση και αποθήκευση στο wallet). Παρά την εμπλοκή blockchain λειτουργιών, οι συνολικοί χρόνοι δημιουργίας και παραλαβής VC παραμένουν εντός αποδεκτού χρονικού πλαισίου για βιομηχανικά σενάρια IIoT. Αυτό δείχνει ότι η προσθήκη μηχανισμών SSI και κατανεμημένου μητρώου δεν υπονομεύει την επιχειρησιακή χρήση της πλατφόρμας.



Εικόνα 58 Χρόνος δημιουργίας διαπιστευτηρίων (Issuer-Platform)

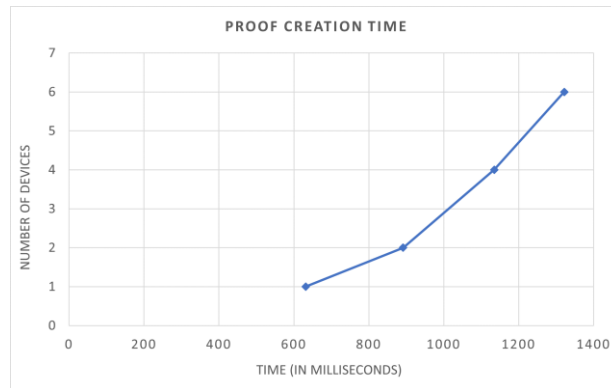


Εικόνα 59 Χρόνος λήψης διαπιστευτηρίων (Issuer-Holder)

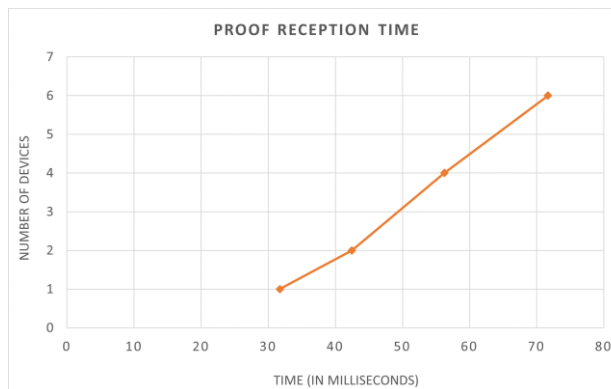
Η δημιουργία και λήψη αποδείξεων (Verifiable Presentations) αποτυπώνεται στις επόμενες εικόνες (Εικόνα 60 & Εικόνα 61) όπου μετρώνται ο χρόνος proof creation (holder-issuer) και proof reception/verification (verifier-holder). Οι μετρήσεις δείχνουν ότι η πλατφόρμα μπορεί να δημιουργεί

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

και να επαληθεύει αποδείξεις σε σύντομο χρόνο, επιτρέποντας γρήγορη αποστολή και επιβεβαίωση παρουσιάσεων ακόμη και με πολλαπλές συσκευές σε λειτουργία.



Εικόνα 60 Χρόνος δημιουργίας απόδειξης (Proof Creation Time – Holder-Issuer)

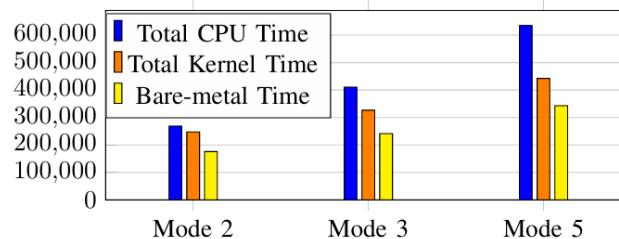


Εικόνα 61 Χρόνος λήψης και επαλήθευσης απόδειξης (Proof Reception Time – Verifier-Holder)

Τέλος, η συνεκτίμηση όλων των αποτελεσμάτων επιτρέπει την εκτίμηση της συνολικής καθυστέρησης των «core operations» (σύνδεση, έκδοση VC, λήψη VC, δημιουργία/λήψη proof), τεκμηριώνοντας πως η πλατφόρμα παραμένει εντός ανεκτών ορίων latency για τις κρίσιμες λειτουργίες πιστοποίησης, παρότι εφαρμόζει privacy-by-design μηχανισμούς (SSI, SD-JWT-VC, blockchain) σε περιβάλλον IIoT περιορισμένων πόρων.

#### Σενάριο 3: Υποστήριξη επιταχυντή μετακβαντικής κρυπτογραφίας για ψηφιακές υπογραφές.

Η αξιολόγηση αποτελεσμάτων πραγματοποιείται τόσο σε επίπεδο kernel όσο και σε επίπεδο πλήρους εφαρμογής ML-DSA, ώστε να τεκμηριώνεται η ωφέλεια της λύσης σε ρεαλιστικές συνθήκες. Σε επίπεδο kernel, μετράμε τον χρόνο εκτέλεσης της NTT-based matrix-multiplication και εξάγουμε συμπεράσματα για latency και throughput της επιτάχυνσης, καθώς και για το κόστος μεταφοράς δεδομένων και κλήσεων runtime. Το αποτέλεσμα αυτής της αξιολόγησης επιβεβαιώνει ότι ο kernel προσφέρει ουσιαστική επιτάχυνση στο στοχευμένο bottleneck και ότι το συνολικό κέρδος εξαρτάται από το πόσο αποτελεσματικά περιορίζουμε τα I/O και runtime overheads.



Εικόνα 62 Αποτελέσματα kernel-only: χρόνοι/κύκλοι, latency, throughput και speedup έναντι CPU baseline (με και χωρίς OpenCL), ανά επίπεδο ασφάλειας.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Σε επίπεδο πλήρους εφαρμογής, μετράμε τους χρόνους των Key Generation, Sign και Verify για τα αντίστοιχα επίπεδα ασφάλειας που υποστηρίζονται από το ML-DSA. Η σύγκριση γίνεται έναντι CPU-only εκτέλεσης στην ίδια πλατφόρμα, ώστε να αποτυπώνεται καθαρά η προστιθέμενη αξία του PL επιταχυντή. Η πρακτική εμπειρία δείχνει ότι οι μεγαλύτερες βελτιώσεις εμφανίζονται συνήθως στη λειτουργία Sign, επειδή η διαδικασία παραγωγής έγκυρης υπογραφής μπορεί να ενεργοποιήσει επαναληπτικές εκτελέσεις επιμέρους υπολογισμών (άρα ο επιταχυντής αξιοποιείται εντατικότερα). Παράλληλα, για Verify και KeyGen παρατηρούνται σταθερά κέρδη, με τάση ενίσχυσης όσο αυξάνει η υπολογιστική απαίτηση του επιπέδου ασφάλειας.

Πίνακας 28 End-to-end αποτελέσματα πλήρους εφαρμογής: χρόνοι KeyGen/Sign/Verify (CPU-only vs PS/PL offload) και ποσοστιαία βελτίωση, ανά επίπεδο ασφάλειας.

Mode	CPU clock freq.: 1.2 GHz			CPU clock freq.: 0.6 GHz			CPU clock freq.: 0.4 GHz			CPU clock freq.: 0.3 GHz		
	PS (μs)	PS/PL (μs)	Gain (%)	PS (μs)	PS/PL (μs)	Gain (%)	PS (μs)	PS/PL (μs)	Gain (%)	PS (μs)	PS/PL (μs)	Gain (%)
Key-Gen 2	701	692	1.35	1408	1287	8.62	2115	1866	11.77	2824	2456	13.01
Key-Gen 3	1189	1116	6.10	2383	2031	14.77	3580	2955	17.45	4781	3891	18.62
Key-Gen 5	1936	1742	10.02	3880	3198	17.57	5825	4660	19.99	7779	6132	21.17
Sign 2	3481	3376	3.02	6974	6402	8.20	10 438	9356	10.36	13 932	12 290	11.79
Sign 3	5697	5320	6.60	11 461	9610	16.15	17 185	13 888	19.19	22 938	18 288	20.27
Sign 5	6930	6132	11.51	13 791	11 151	19.14	20 669	16 118	22.02	27 614	21 217	23.16
Verify 2	807	797	1.24	1620	1481	8.52	2432	2148	11.68	3248	2828	12.92
Verify 3	1290	1218	5.62	2586	2215	14.33	3886	3224	17.00	5189	4245	18.20
Verify 5	2097	1906	9.09	4203	3500	16.72	6310	5100	19.16	8426	6711	20.35

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων γίνεται με πλήρη συνυπολογισμό του “end-to-end” κόστους: του καθαρού χρόνου kernel, των μεταφορών δεδομένων μέσω AXI/DDR, και των runtime ενεργειών του Vitis/OpenCL σε Linux περιβάλλον. Αυτή η προσέγγιση μας επιτρέπει να τεκμηριώνουμε ρεαλιστικά το καθαρό κέρδος που μπορεί να αναμένει ένας integrator της λύσης, να εντοπίζουμε τα σημεία όπου το overhead περιορίζει την επιτάχυνση, και να ιεραρχούμε βελτιώσεις (π.χ. περαιτέρω μείωση αντιγραφών μνήμης ή αύξηση επαναχρησιμοποίησης buffers/objects).

Επιπλέον, ως μέρος της συνολικής αξιολόγησης, εξετάζουμε τη χρήση πόρων της υλοποίησης στο PL (LUT/FF/BRAM/DSP), καθώς και τη συσχέτιση του κόστους πόρων με την επίτευξη throughput/latency. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει να γίνει τεκμηριωμένη συζήτηση για το κόστος-απόδοση της λύσης και να υποστηριχθούν αποφάσεις ολοκλήρωσης σε πραγματικές πλατφόρμες με περιορισμένους πόρους.

Πίνακας 29 Κατανάλωση πόρων (LUT/FF/BRAM/DSP) ανά υπομονάδα (π.χ. NTT, INTT, multiplier) και συνολικά, και επιτευχθέντα latency/throughput για συσχέτιση κόστους-απόδοσης.

Submodule	LUT	FF	BRAMa	DSP	Lat. (cc)
NTT Radix-2	1344	766	0	12	1031
NTT Radix-4 [17]	444	421	32K	17	533
Matrix-Mul Mode-2	804	898	128K	15	1037
Matrix-Mul Mode-2 [17]	2129	59	0	0	2370
Matrix-Mul Mode-3	805	901	128K	15	1293
Matrix-Mul Mode-3 [17]	2774	49	0	0	3019
Matrix-Mul Mode-5	806	945	128K	15	1805
Matrix-Mul Mode-5 [17]	4591	46	0	0	4434
INTT Radix-2	1934	1082	16K	12	1096
INTT Radix-4 [17]	444	421	32K	17	536

Σενάριο 4: Υποστήριξη των αισθητήρων ανίχνευσης κακόβουλων δράσεων και αυτοπροστασία κόμβου αιχμής.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για την μεθοδολογία και τον παραγόμενο αισθητήρα κακόβουλων δράσεων με τη χρήση Μηχανικής/Βαθιάς Μάθησης οργανώνεται γύρω από τρεις δείκτες επίδοσης: FPR,

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

FNR και ACY. Οι δείκτες ορίζονται ρητά (με εξισώσεις) και χρησιμοποιούνται ως κοινή βάση σύγκρισης των τριών μοντέλων (FCN, CNN, LSTM) στα τρία window sizes (20,20), (40,20), (60,20). Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 30 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Window Size	FCN			CNN			LSTM		
	FPR	FNR	ACY	FPR	FNR	ACY	FPR	FNR	ACY
(20,20)	0.0001	0.6781	0.9443	0.0006	0.2004	0.9829	0.0088	0.0705	0.9862
(40,20)	0.0001	0.7426	0.9390	0.0032	0.04344	0.9935	0.0157	0.0561	0.9809
(60,20)	0.002	0.7860	0.9356	0.0129	0.0806	0.9815	0.0023	0.0347	0.9951

Η ανάλυση δείχνει ότι το FCN μπορεί να εμφανίζει πολύ χαμηλό FPR, όμως παρουσιάζει σοβαρή υστέρηση στο FNR. Για παράδειγμα, στο (20,20) το FCN δίνει ACY  $\approx 0.9443$ , αλλά FNR  $\approx 0.6781$ , κάτι που σημαίνει ότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό “κακόβουλων” χρονικών στιγμών ταξινομείται ως “κανονικό”, άρα το μοντέλο κρίνεται μη αξιόπιστο για ανίχνευση στην πράξη. Αυτή η παρατήρηση είναι κρίσιμη, καθώς η Accuracy από μόνη της μπορεί να είναι παραπλανητική σε σενάρια με έντονη ανισορροπία κλάσεων (εδώ 7% vs 93%).

Σε αντίθεση, το CNN εμφανίζει σαφώς βελτιωμένη συμπεριφορά. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5 και την ανάλυση που ακολουθεί, το CNN με παράθυρο (40,20) αποτελεί την καλύτερη επιλογή εντός της οικογένειας CNN, καθώς πετυχαίνει υψηλό ACY ( $\approx 0.9935$ ) και σημαντικά μειωμένο FNR ( $\approx 0.04344$ ), ενώ το FPR παραμένει χαμηλό ( $\approx 0.0032$ ). Το paper επισημαίνει ότι η αύξηση του παραθύρου από (20,20) σε (40,20) βελτιώνει ουσιαστικά την ανίχνευση, ενώ περαιτέρω αύξηση σε (60,20) δεν αποδίδει καλύτερα και οδηγεί σε χειρότερηση των δεικτών για CNN. Η ερμηνεία που δίνεται είναι ότι τα CNN εξάγουν αποτελεσματικότερα μοτίβα σε σχέση με FCN, άρα είναι αναμενόμενο να υπερέχουν.

Το καλύτερο συνολικό αποτέλεσμα προκύπτει από το LSTM με παράθυρο (60,20). Η ανάλυση αναφέρει ότι σε αυτή τη ρύθμιση επιτυγχάνονται οι χαμηλότερες τιμές σφάλματος και η υψηλότερη ακρίβεια, με FPR  $\approx 0.23\%$ , FNR  $\approx 3.47\%$  και ACY  $\approx 99.51\%$  (με τις τιμές να παρουσιάζονται και ποσοστιαία στην κείμενη ανάλυση). Επιπλέον, συγκρίνεται άμεσα με την καλύτερη CNN επιλογή (40,20) και σημειώνεται ότι το LSTM (60,20) υπερέχει οριακά σε όλους τους δείκτες. Ως αιτιολόγηση, το paper τονίζει ότι τα LSTM είναι ειδικά κατάλληλα για χρονοσειρές, καθώς αποτυπώνουν καλύτερα τις χρονικές εξαρτήσεις των δεδομένων.

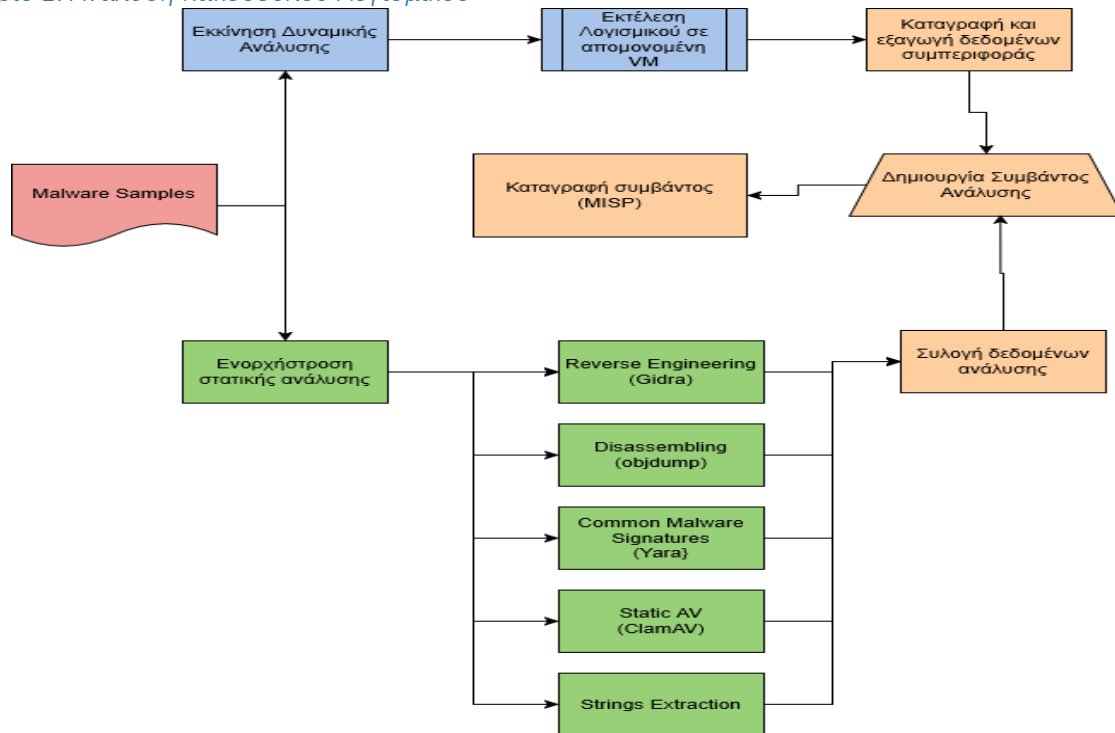
Συνολικά, το παραδοτέο συμπέρασμα της αξιολόγησης είναι ότι, για τη συγκεκριμένη feasibility μελέτη στο SysJoker, το FCN απορρίπτεται ως μη αξιόπιστο λόγω υψηλού FNR, ενώ οι λύσεις που κρίνονται αξιόπιστες και αποδοτικές είναι το CNN με (40,20) και κυρίως το LSTM με (60,20), το οποίο εμφανίζει την καλύτερη συνολική επίδοση.

## 2.15. Σύστημα ανάλυσης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικά περιβάλλοντα

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Στο πλαίσιο του έργου υλοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν δύο βασικά σενάρια χρήσης: (α) Ανάλυση Κακόβουλου Λογισμικού και (β) Ανάλυση Συμβάντων Κυβερνοασφάλειας, με στόχο την αυτοματοποιημένη ανίχνευση, συσχέτιση και καταγραφή απειλών μέσω ενοποιημένων ροών δεδομένων και μηχανισμών δημιουργίας συμβάντων. Αναλυτική περιγραφή των σεναρίων μπορεί να βρεθεί στο παραδοτέο Π3.1, εδώ δίνουμε μια συνοπτική περιγραφή των σεναρίων που συνδράμουν στον έλεγχο λειτουργίας του συστήματος.

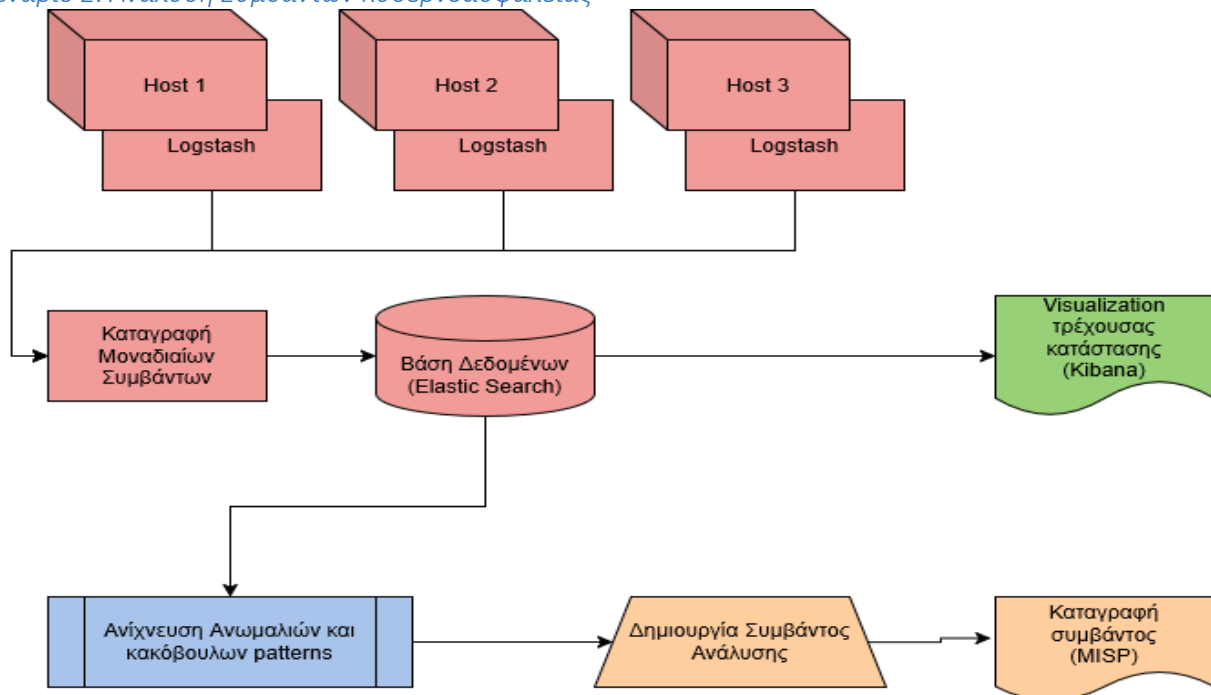
#### Σενάριο 1: Ανάλυση Κακόβουλου Λογισμικού



Το σενάριο υποστηρίζει την ανάλυση δειγμάτων κακόβουλου λογισμικού, τόσο σε **στατική** όσο και σε **δυναμική** μορφή. Για τη δυναμική ανάλυση, χρησιμοποιείται το εργαλείο DRAKVUF, το οποίο εκτελεί τα προς ανάλυση δείγματα εντός πλήρως απομονωμένων εικονικών μηχανών (sandboxing). Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει την απομόνωση του κακόβουλου λογισμικού και αποτρέπει τη διάδοσή του σε επίπεδο συστήματος ή δικτύου. Μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης, η εικονική μηχανή απενεργοποιείται και παράγεται αναλυτική αναφορά, η οποία περιλαμβάνει τόσο την κατηγοριοποίηση του δείγματος (κακόβουλο ή μη) όσο και δομικά και συμπεριφορικά χαρακτηριστικά. Τα παραγόμενα αρχεία καταγραφής αποθηκεύονται αρχικά τοπικά και στη συνέχεια προωθούνται στην πλατφόρμα MISP για περαιτέρω επεξεργασία.

Η στατική ανάλυση βασίζεται σε σύνολο εξειδικευμένων εργαλείων, τα οποία παραδοσιακά εκτελούνται χειροκίνητα. Στο έργο αναπτύχθηκε μηχανισμός orchestration, ο οποίος επιτρέπει την αυτοματοποιημένη εκκίνηση και εκτέλεση των εργαλείων με ελάχιστη αλληλεπίδραση χρήστη. Ο orchestrator διαχειρίζεται τις παραμέτρους εκτέλεσης, συλλέγει τα αρχεία καταγραφής από προκαθορισμένες τοποθεσίες και ενοποιεί τα αποτελέσματα, τα οποία προωθούνται επίσης στο MISP.

Σενάριο 2: Ανάλυση Συμβάντων Κυβερνοασφάλειας



Το δεύτερο σενάριο επεκτείνει την ανάλυση σε συμβάντα συστημάτων και δικτυακές ροές σε πραγματικό, ή μη, χρόνο. Για την ανάλυση συμβάντων λειτουργικού συστήματος, υλοποιήθηκε εικονική μηχανή που προσομοιώνει τερματική συσκευή βιομηχανικού περιβάλλοντος. Σε αυτήν εγκαταστάθηκε το Winlogbeat, το οποίο συλλέγει Windows event logs και τα προωθεί περιοδικά στη βάση δεδομένων ElasticSearch.

Το ElasticSearch αποθηκεύει και δομεί τα δεδομένα, καθιστώντας τα διαθέσιμα τόσο για οπτικοποίηση και αναλυτική διερεύνηση μέσω Kibana.

Η ανάλυση δικτυακών ροών πραγματοποιείται από το Suricata, το οποίο επεξεργάζεται δεδομένα είτε απευθείας από κάρτες δικτύου, είτε μέσω mirroring, είτε από αρχεία τύπου .pcap. Το Suricata εκτελεί real-time ανάλυση και καταγράφει ύποπτη δραστηριότητα σε αρχεία καταγραφής, τα οποία προωθούνται στο ElasticSearch. Από εκεί ακολουθείται κοινή ροή διανομής προς Kibana και MISP, εξασφαλίζοντας ενοποιημένη οπτική και συσχέτιση συμβάντων.

Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω συνδυαστικής προσέγγισης που περιλαμβάνει **έλεγχο ορθής λειτουργίας (functional verification)**, **επικύρωση ροών δεδομένων (data flow validation)** και **ποιοτική επιβεβαίωση των KPIs**. Η διαδικασία σχεδιάστηκε με στόχο να αντικατοπτρίζει ρεαλιστικές συνθήκες βιομηχανικών περιβαλλόντων, όπου συνυπάρχουν ετερογενή συστήματα IT, αυξημένες απαιτήσεις διαθεσιμότητας και σύνθετες απειλές.

Η αξιολόγηση καλύπτει δύο βασικούς άξονες:

(α) την αποτελεσματικότητα αναγνώρισης κακόβουλου λογισμικού, και (β) τη διεύρυνση της ικανότητας ανάλυσης και καταγραφής κυβερνο-συμβάντων, με ενοποιημένη διαχείριση και συσχέτιση.

*KPI1: Αύξηση απόδοσης αναγνώρισης κακόβουλου λογισμικού για βιομηχανικές απειλές*

Ο έλεγχος του KPI1 επικεντρώθηκε στην ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίζει με αυξημένη ακρίβεια και πληρότητα κακόβουλα δείγματα λογισμικού, τα οποία εμφανίζονται τυπικά σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η διαδικασία αξιολόγησης βασίστηκε στη συνδυαστική χρήση στατικής και δυναμικής ανάλυσης, με αυτοματοποιημένη συλλογή και συσχέτιση αποτελεσμάτων.

Έλεγχος λειτουργίας στατικής ανάλυσης

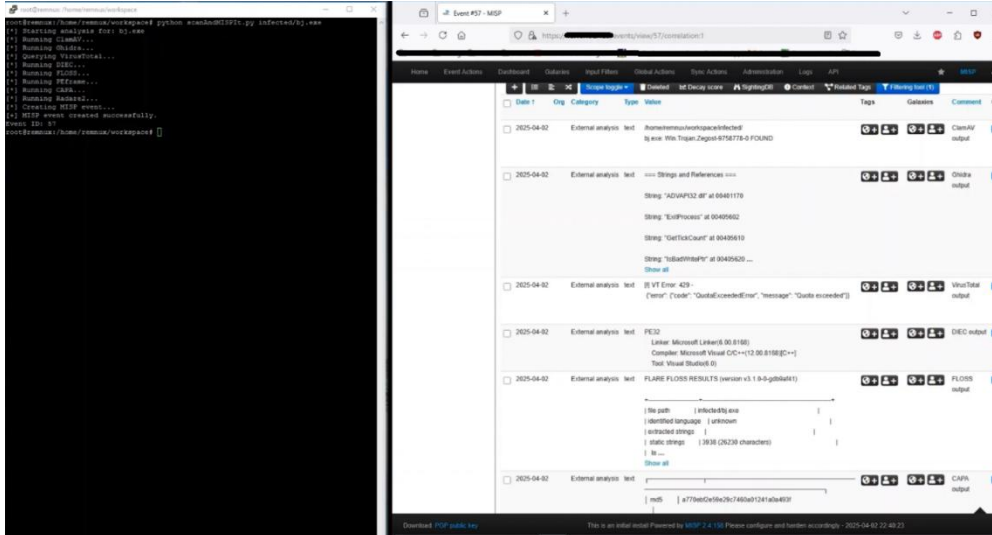
Η στατική ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω συνόλου εξειδικευμένων εργαλείων, τα οποία εκτελούνται συντονισμένα μέσω μηχανισμού orchestration. Ο έλεγχος λειτουργίας περιλάμβανε:

- επιτυχή εισαγωγή δειγμάτων στο σύστημα,

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

- ορθή εκκίνηση όλων των επιλεγμένων εργαλείων ανάλυσης,
- ορθή παραγωγή αρχείων καταγραφής χωρίς σφάλματα εκτέλεσης,
- επιτυχή συλλογή και ενοποίηση των αποτελεσμάτων από τον orchestrator.

Η ορθή λειτουργία του υποσυστήματος τεκμηριώνεται στο σχήμα, όπου απεικονίζεται η εκτέλεση στατικής ανάλυσης και τα παραγόμενα αποτελέσματα από πολλαπλά εργαλεία. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη δυνατότητα αυτοματοποιημένης επανάληψης της διαδικασίας για διαφορετικά δείγματα, χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης παρέμβασης, στοιχείο κρίσιμο για σενάρια βιομηχανικής κλίμακας.

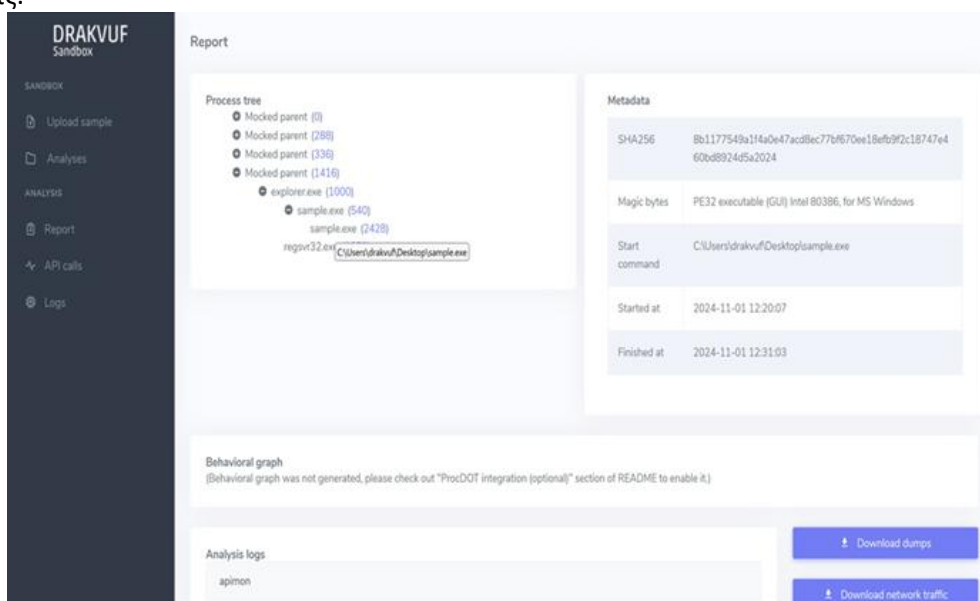


### Έλεγχος λειτουργίας δυναμικής ανάλυσης

Η δυναμική ανάλυση υλοποιήθηκε σε πλήρως απομονωμένο περιβάλλον sandbox, επιτρέποντας την παρατήρηση της συμπεριφοράς του λογισμικού σε συνθήκες εκτέλεσης. Ο έλεγχος λειτουργίας περιλαμβάνει:

- ορθή εκκίνηση της εικονικής μηχανής,
- επιτυχή εκτέλεση του δείγματος χωρίς διαρροή στο υποκείμενο σύστημα,
- καταγραφή συμπεριφορικών δεικτών (system calls, network activity, file operations),
- εξαγωγή αναλυτικής αναφοράς μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης.

Η διαδικασία αυτή αποτυπώνεται στο σχήμα, το οποίο παρουσιάζει τη δυναμική ανάλυση κακόβουλου λογισμικού μέσω DRAKVUF. Η επιτυχής ολοκλήρωση κάθε κύκλου ανάλυσης και η αυτόματη απενεργοποίηση της εικονικής μηχανής αποτέλεσαν βασικά κριτήρια επιβεβαίωσης της ορθής λειτουργίας.



### Επιβεβαίωση KPI1

Η επιβεβαίωση του KPI1 βασίστηκε στη βελτιωμένη ικανότητα αναγνώρισης κακόβουλων δειγμάτων, όπως αυτή αποτυπώνεται:

- στον αυξημένο αριθμό επιτυχώς ταυτοποιημένων απειλών,
- στον εμπλουτισμό των παραγόμενων χαρακτηριστικών (static και behavioral),
- στη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας σχετικών συμβάντων στο σύστημα διαχείρισης.

Η συνδυαστική χρήση στατικής και δυναμικής ανάλυσης επέτρεψε την αναγνώριση σύνθετων ή συγκαλυμμένων απειλών, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να εντοπιστούν επαρκώς μεμονωμένα από μία μόνο προσέγγιση.

### KPI2: Αύξηση δυνατότητας ανάλυσης και καταγραφής διαφορετικών ειδών συμβάντων για βιομηχανικά περιβάλλοντα

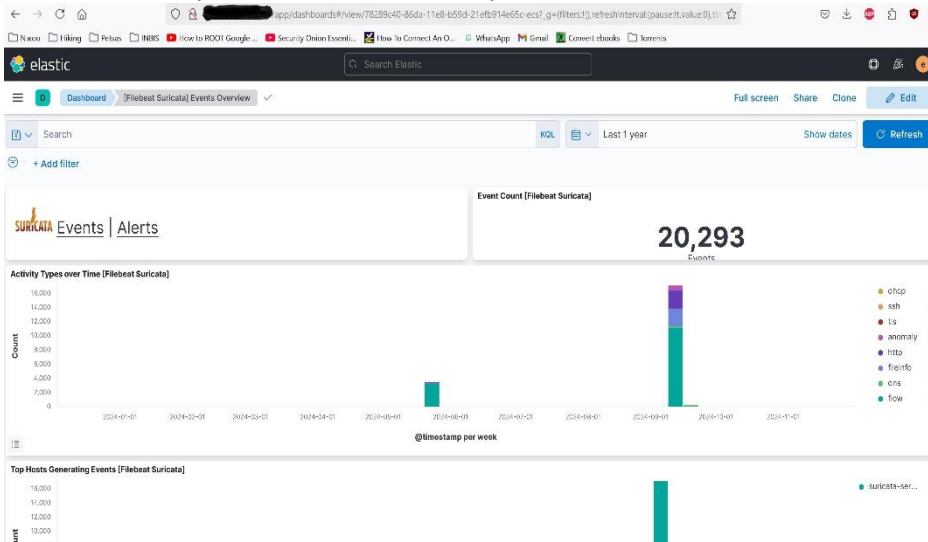
Ο έλεγχος και η επιβεβαίωση του KPI2 επικεντρώθηκαν στη δυνατότητα του συστήματος να συλλέγει, αναλύει, συσχετίζει και καταγράφει ετερογενή συμβάντα κυβερνοασφάλειας, προερχόμενα από πολλαπλές πηγές δεδομένων, με ιδιαίτερη έμφαση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα IT. Η αξιολόγηση κάλυψε τόσο την ανάλυση σε πραγματικό, ή μη, χρόνο όσο και την αυτοματοποιημένη μετατροπή των αποτελεσμάτων ανάλυσης σε δομημένα συμβάντα ασφάλειας.

### Έλεγχος λειτουργίας ανάλυσης δικτυακής κίνησης και συμβάντων και ανίχνευσης ανωμαλιών

Η ανάλυση δικτυακής κίνησης και συμβάντων πραγματοποιήθηκε είτε σε πραγματικό χρόνο είτε μέσω αρχείων καταγραφής (.pcap), με στόχο την ανίχνευση ανωμαλιών, επιθέσεων και ύποπτων μοτίβων επικοινωνίας. Ο έλεγχος λειτουργίας περιλάμβανε:

- επιτυχή συλλογή δικτυακής κίνησης από διαφορετικές πηγές (ζωντανή κίνηση μέσω mirroring ή αρχεία τύπου .pcap),
- επιτυχή συλλογή συμβάντων καταγραφής από windows hosts της υποδομής,
- ορθή επεξεργασία και ανάλυση των ροών και των συμβάντων,
- καταγραφή ύποπτων συμβάντων και παραγωγή δομημένων αρχείων καταγραφής.

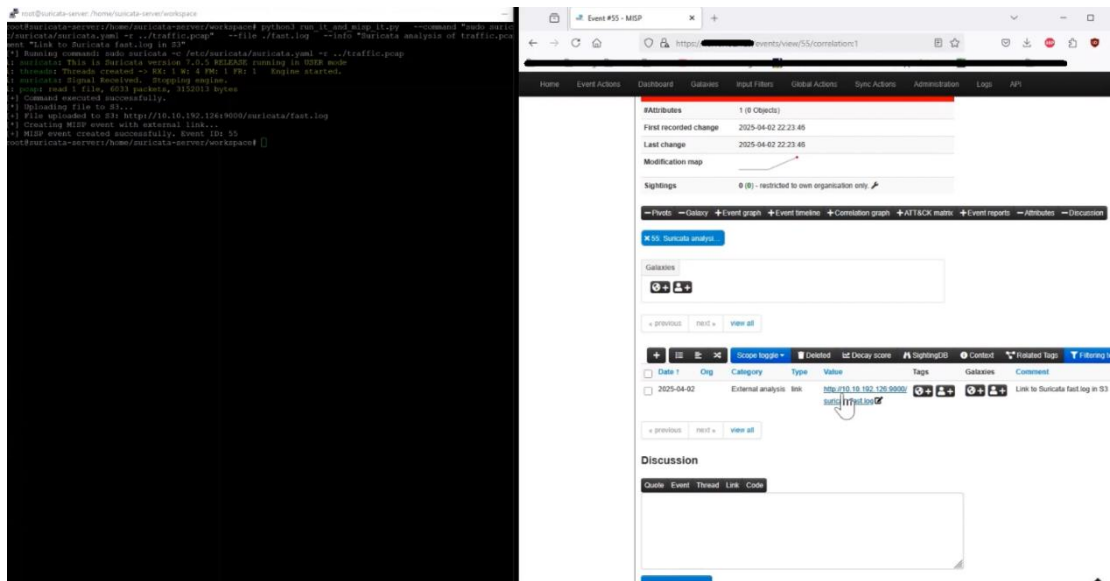
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα, το οποίο περιέχει την απεικόνιση των συλλεγμένων αρχείων καταγραφής (events) από διάφορους σταθμούς εργασίας της υποδομής και την οπτικοποίηση των ευρημάτων στο Kibana. Η απεικόνιση επιβεβαιώνει τη δυνατότητα χρονικής ανάλυσης, φιλτραρίσματος και διερεύνησης συμβάντων από τον διαχειριστή, υποστηρίζοντας επιχειρησιακές διαδικασίες παρακολούθησης και απόκρισης.



Πέραν της ανάλυσης και απεικόνισης, κρίσιμο στοιχείο του KPI2 αποτέλεσε η αυτοματοποιημένη διοχέτευση των αποτελεσμάτων ανάλυσης δικτυακής κίνησης στο σύστημα διαχείρισης συμβάντων. Τα αρχεία καταγραφής που παράγονται από την ανάλυση δικτύου προωθούνται χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση στο σύστημα διαχείρισης, όπου εφαρμόζονται κανόνες συσχέτισης και ταξινόμησης.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Η διαδικασία αυτή τεκμηριώνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου τα αρχεία καταγραφής (.pcap) αναλύονται από το Suricata και γίνεται αυτόματη καταχώριση των αποτελεσμάτων ανάλυσης δικτυακής κίνησης στο MISP, με δημιουργία νέων συμβάντων ή εμπλουτισμό υφιστάμενων. Η απεικόνιση επιβεβαιώνει ότι τα δικτυακά ευρήματα μετατρέπονται σε επιχειρησιακά αξιοποιήσιμα συμβάντα, με σαφή κατηγοριοποίηση και συσχέτιση με άλλες πηγές δεδομένων.

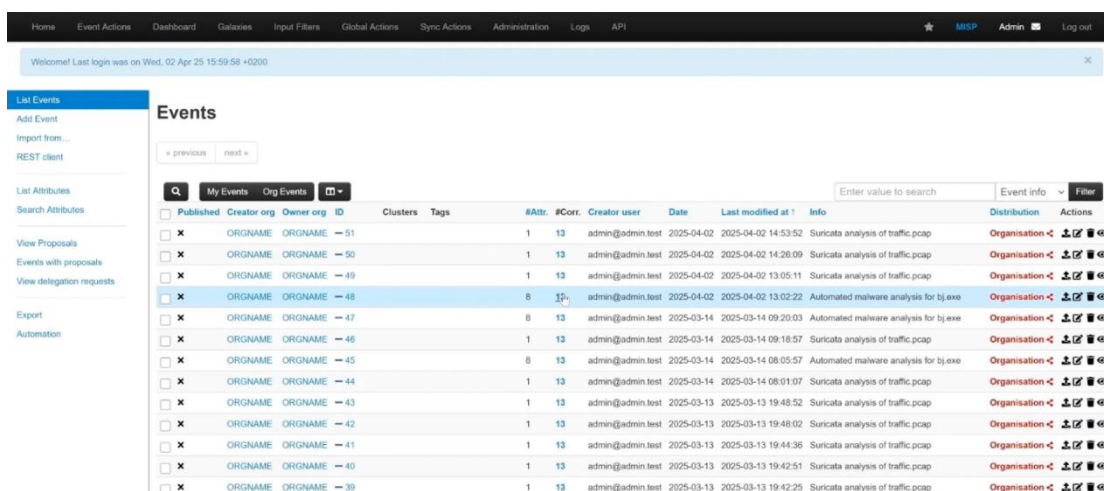


#### Έλεγχος ενοποιημένης διαχείρισης συμβάντων

Όλα τα παραγόμενα δεδομένα από αναλύσεις λογισμικού, συστήματα και δικτυακές ροές συγκεντρώθηκαν σε ενιαία πλατφόρμα διαχείρισης συμβάντων. Ο έλεγχος λειτουργίας εστίασε:

- στην ορθή εισαγωγή ετερογενών δεδομένων,
- στην εφαρμογή κανόνων συσχέτισης και εμπλουτισμού,
- στη δυνατότητα ενιαίας προβολής και διαχείρισης συμβάντων.

Η συνολική εικόνα διαχείρισης και συσχέτισης αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου παρουσιάζεται η διαχείριση συμβάντων κυβερνοασφάλειας στο MISP, συμπεριλαμβανομένων συμβάντων που προέρχονται από ανάλυση κακόβουλου λογισμικού, συστημικά logs και δικτυακή κίνηση.



The screenshot shows a security dashboard with a navigation bar at the top containing links like Home, Event Actions, Dashboard, Galaxies, Input Filters, Global Actions, Sync Actions, Administration, Logs, and API. Below the navigation bar, there are several tabs for different views: Pivots, Galaxy, Event graph, Event timeline, Correlation graph, ATT&CK matrix, Event reports, Attributes, and Discussion. A search bar is visible with the text 'x48: Automated mal...'. The main content area displays a table of events with columns for Date, Org, Category, Type, Value, Tags, Galaxies, Comment, Correlate, Related Events, Feed hits, IDS, Distribution, Sightings, and Activity. Two event entries are visible, both dated 2025-04-02. The first entry is an 'External analysis' of type 'text' with a value containing a file path and a ClamAV output comment. The second entry is also an 'External analysis' of type 'text' with a value containing 'Strings and References' and several string examples.

### Επιβεβαίωση ΚΡΙ2

Η επιβεβαίωση του ΚΡΙ2 βασίστηκε στη σημαντική διεύρυνση του πλήθους και των τύπων συμβάντων που μπορούν να ανιχνευθούν, να αναλυθούν και να καταγραφούν αυτόματα, όπως:

- συμβάντα κακόβουλου λογισμικού,
- ανωμαλίες συστήματος,
- επιθέσεις και ύποπτη δικτυακή δραστηριότητα,
- συσχετισμένα συμβάντα πολλαπλών πηγών.

Η προσθήκη της αυτοματοποιημένης καταγραφής δικτυακών ευρημάτων στο σύστημα διαχείρισης συμβάντων ενισχύει ουσιαστικά την επιχειρησιακή αξία του συστήματος, επιβεβαιώνοντας την επίτευξη του ΚΡΙ2 σε συνθήκες που προσομοιώνουν πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα.

### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση της λύσης, οι υπηρεσίες και εφαρμογές παρουσιάστηκαν και δοκιμάστηκαν στην υποδομή της εταιρίας ΡΙΚΕΙ η οποία αποτελείται από ικανό αριθμό τελικών σταθμών εργασίας, συσκευών IoT όπως και εξυπηρετητών που είναι κρίσιμοι για τη λειτουργία της εταιρίας. Η τεχνική ομάδα της εταιρίας αξιολόγησε:

- Τον τρόπο συλλογής συμβάντων καταγραφής
- Την ικανότητα αναγνώρισης δειγμάτων κακόβουλου λογισμικού
- Τον βαθμό αυτοματισμού στην καταγραφή και διαχείριση συμβάντων κυβερνοασφάλειας

Για την, όσον το δυνατό, πιο ρεαλιστική λειτουργία των συστημάτων κατά τη διάρκεια του ελέγχου, χρησιμοποιήθηκαν εξομοιωμένες κυβερνοεπιθέσεις όπως και πραγματικά, χαμηλού ρίσκου, κακόβουλα λογισμικά. Οι επιθέσεις κάλυπταν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών από απλές επιθέσεις άρνησης υπηρεσιών έως χρήση ransomware για την κακόβουλη κρυπτογράφηση των δεδομένων της εταιρίας.

Η τεχνική ομάδα της εταιρίας αξιολόγησε θετικά την χρήση των υπηρεσιών και συστημάτων της λύσης όσον αφορά την ευκολία χρήσης των εργαλείων, την ακρίβεια αναγνώρισης των συμβάντων κυβερνοασφάλειας αλλά και τον αυτοματισμό στην διαχείρισή τους.

Η συμμετοχή της τεχνικής ομάδας της ΡΙΚΕΙ συνέβαλε ουσιαστικά στην επαλήθευση των τεχνικών χαρακτηριστικών της λύσης, στην επιβεβαίωση της επιχειρησιακής της αξίας, στην επιβεβαίωση ότι η λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό περιβάλλον μιας μικρομεσαίας εταιρίας αποδεικνύοντας την ωριμότητα, αξιοπιστία και πρακτική χρησιμότητα της προτεινόμενης λύσης.

## 2.16. Ασφαλής αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ

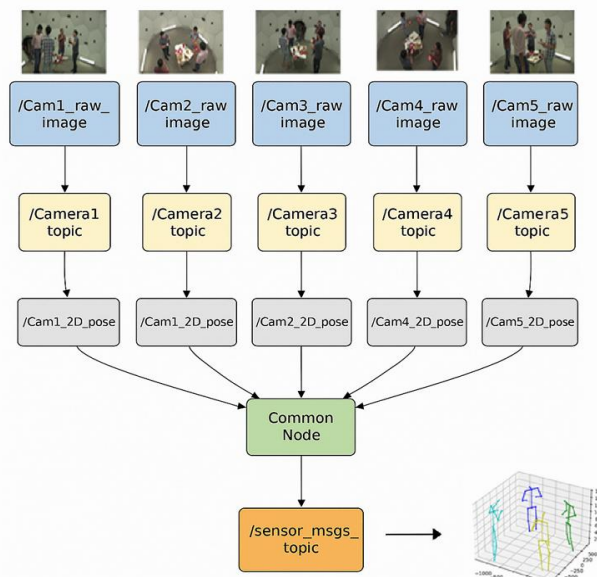
### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Η υλοποίησή μας οργανώνεται σε μια αρθρωτή (modular) αρχιτεκτονική βασιζόμενη σε ROS, όπου διακριτοί κόμβοι αναλαμβάνουν τα βασικά στάδια της λήψης εισόδου (input acquisition), της εκτίμησης θέσης (pose estimation) και της οπτικοποίησης δεδομένων (data visualization). Σε ένα παράδειγμα με πέντε RGB κάμερες, κάθε κάμερα αντιστοιχεί σε δικό της κόμβο ROS, ο οποίος συνδέεται ανεξάρτητα με το αντίστοιχο hardware και δημοσιεύει εικόνες σε μοναδικά topics (π.χ. /camera1/image\_raw ... /camera5/image\_raw). Προαιρετικά, οι κόμβοι των καμερών μπορούν να εκτέμπουν προεπεξεργασμένες 2D ανιχνεύσεις keypoints σε custom message formats, π.χ. /camera1/keypoints\_2d. Όλες οι παράμετροι βαθμονόμησης (intrinsics, distortion models) αρχικοποιούνται από YAML αρχεία και δημοσιεύονται σε /cameraX/camera\_info, διασφαλίζοντας ακριβή downstream επεξεργασία.

Στον πυρήνα του συστήματος βρίσκεται ένας κεντρικός κοινός κόμβος, ο οποίος κάνει subscribe στις εξόδους και των πέντε κόμβων καμερών. Μέσω της ROS message filtering επιλογής ApproximateTimeSynchronizer, συγχρονίζει τις εισερχόμενες multi-view σκηνές, ώστε τα 2D keypoints (ή τα raw frames) να είναι χρονικά ευθυγραμμισμένα. Στη συνέχεια, εφαρμόζει χωρική καταγραφή (spatial registration) χρησιμοποιώντας extrinsic calibration, μετατρέποντας τις τοπικές ανιχνεύσεις σε κοινό σύστημα συντεταγμένων. Τα ανασυντιθέμενα 3D σημεία-κλειδιά συνθέτουν συνεκτικούς σκελετούς και δημοσιοποιούνται ως standardized ROS messages, π.χ. geometry\_msgs/PoseArray ή sensor\_msgs/PointCloud.

Για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και ενσωμάτωση με εξωτερικά συστήματα, τα fused 3D poses οπτικοποιούνται στο RViz μέσω visualization\_msgs/MarkerArray: υποστηρίζεται χρωματισμός αρθρώσεων βάσει βεβαιότητας των προβλέψεων (confidence levels) και bone rendering με γραμμές ή κυλίνδρους, ενώ μπορεί να εμφανιστούν και camera frustums για επικύρωση της χωρικής ευθυγράμμισης και της ακρίβειας της βαθμονόμησης. Για offline ανάλυση ή αναπαραγωγή, όλα τα topics καταγράφονται σε ROS bag files και υποστηρίζεται time-synchronized replay με την παράμετρο use\_sim\_time. Παρέχεται επίσης υπηρεσία (/get\_latest\_skeletons) για εξωτερικά query των πιο πρόσφατων εκτιμήσεων πόζας.

Συνολικά, το ROS-based πλαίσιο προσφέρει κλιμακωτό (scalable), κατανεμημένο (distributed) και real-time περιβάλλον για εκτίμηση και εντοπισμό θέσης από πολλαπλές λήψεις, με επικυρωμένη απόδοση (validated performance) και δυνατότητα επεκτασιμότητας (extensibility) σε πλήθος εφαρμογών.



Εικόνα 63 Αρχιτεκτονική αντίληψης πολλαπλών καμερών βασισμένη στο ROS, σχεδιασμένη για πραγματικού χρόνου εκτίμηση 3D ανθρώπινης στάσης μέσω επεξεργασίας πολλαπλών καμερών

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Δοκιμάσαμε την αρθρωτή αυτή υλοποίηση σε τρία σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιούνται ευρέως για αναγνώριση πολλαπλών αλληλεπικαλυπτόμενων φιγούρων— Shelf, Campus και Panoptic — εκτελώντας κάθε ROS node σε πλατφόρμες NVIDIA Jetson TX2. Το Jetson TX2, με dual-core Denver CPU, quad-core ARM Cortex-A57 και 256-core Pascal GPU, παρέχει ενεργειακά αποδοτικό edge computing, επιτρέποντας επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και απευθείας αναγνώριση πόζας σε edge αρχιτεκτονική. Αυτή η διαμόρφωση εξασφαλίζει inference χαμηλής καθυστέρησης σε εγκαταστάσεις πολλαπλών καμερών και αναπαράγει συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος. Για την ποσοτική αξιολόγηση της ακρίβειας και της ευρωστίας των συστημάτων ανάλυσης πόζας, χρησιμοποιήσαμε τις μετρικές MPJPE, Accuracy@k και Mean Average Precision@k.

Metric	Formula and Definition
MPJPE	$\text{MPJPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ \hat{\mathbf{p}}_i - \mathbf{p}_i\ $ <p><b>Definition:</b> The Mean Per Joint Position Error (MPJPE) computes the average Euclidean distance between predicted and ground-truth 3D joint coordinates.</p> <p><b>Note:</b> This measures only position error; it does not account for bone orientation or rotation.</p> <p><b>Variables:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>N</math>: Number of joints.</li> <li>• <math>\hat{\mathbf{p}}_i</math>: Predicted 3D position of the <math>i^{\text{th}}</math> joint.</li> <li>• <math>\mathbf{p}_i</math>: Ground-truth 3D position of the <math>i^{\text{th}}</math> joint.</li> </ul>
Precision@k	$\text{Precision@}k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ \hat{\mathbf{p}}_i - \mathbf{p}_i\  < k)$ <p><b>Definition:</b> Precision@ <math>k</math> is the fraction of predicted joints whose 3D-position error is less than a threshold <math>k</math> (usually in millimeters, e.g. 25mm or 50mm).</p> <p><b>Note:</b> A smaller <math>k</math> forces stricter accuracy; larger <math>k</math> is more lenient.</p> <p><b>Variables:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>N</math>: Number of joints.</li> <li>• <math>\hat{\mathbf{p}}_i, \mathbf{p}_i</math>: As above.</li> <li>• <math>k</math>: Distance threshold (in mm).</li> </ul>
AP@k	$\text{AP@}k = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N (\ \hat{\mathbf{p}}_i^{(m)} - \mathbf{p}_i^{(m)}\  < k)$ <p><b>Definition:</b> Average Precision at threshold <math>k</math> computes the proportion of all joints (across <math>M</math> samples) whose predicted-to-ground-truth distance is less than <math>k</math>.</p> <p><b>Note:</b> Often reported at multiple <math>k</math> values (e.g. AP@25, AP@50). Larger <math>k</math> yields higher AP (more lenient).</p> <p><b>Variables:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>M</math>: Number of samples (e.g. frames) in the dataset.</li> <li>• <math>N</math>: Number of joints per sample.</li> <li>• <math>\hat{\mathbf{p}}_i^{(m)}</math>: Predicted 3D position of the <math>i^{\text{th}}</math> joint in sample <math>m</math>.</li> <li>• <math>\mathbf{p}_i^{(m)}</math>: Ground-truth 3D position of the <math>i^{\text{th}}</math> joint in sample <math>m</math>.</li> <li>• <math>k</math>: Distance threshold (in mm).</li> </ul>

Εικόνα 64 Μετρικές εκτίμησης ανθρώπινης καταπόνησης και οι μαθηματικοί ορισμοί τους

Ο λόγος που εφαρμόσαμε τα μοντέλα μας σε δημόσια σύνολα δεδομένων είναι η ύπαρξη έγκυρων ground truth (GT), τα οποία μας επιτρέπουν να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματά μας χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες μετρικές.

#### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Παρακάτω παρουσιάζουμε ενδεικτικά αποτελέσματα από την ειδικά σχεδιασμένη υλοποίηση που αναπτύξαμε στο εργαστήριό μας.

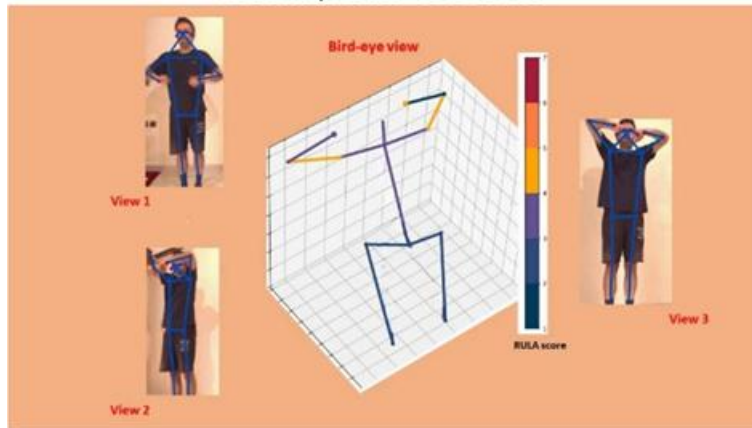
### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 65 Αποτελέσματα εκτίμησης εργονομικής κατάστασης με την μορφή heatmap

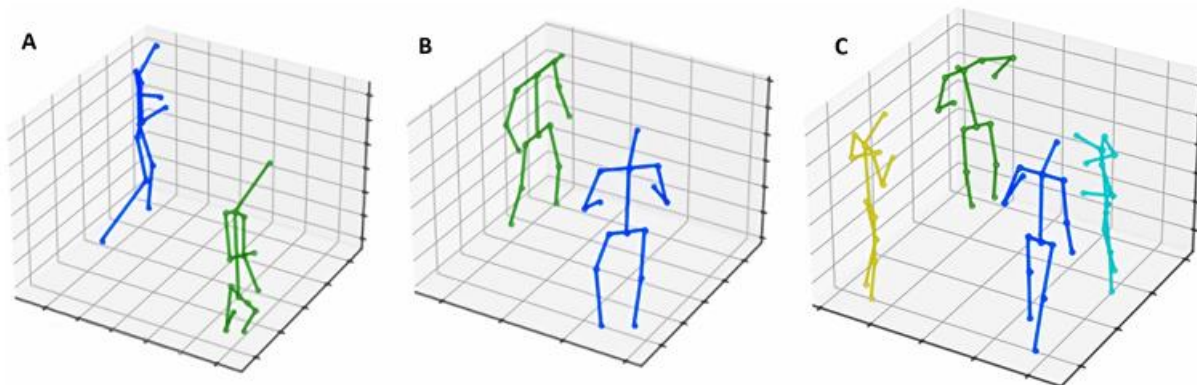
Ακόμη και υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού, με καθυστέρηση στις κάμερες (lag) και σε πολύ στενούς χώρους όπου δεν είναι εφικτή η λήψη από διαφορετικές γωνίες, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την επιλογή ενός ανθεκτικού (robust) νευρωνικού δικτύου για τον εντοπισμό και την εξαγωγή τρισδιάστατης πόζας.

#### 21ο Καρέ από το Βίντεο



Εικόνα 66 Εκτίμηση εργονομικής κατάστασης στο 21ο καρέ

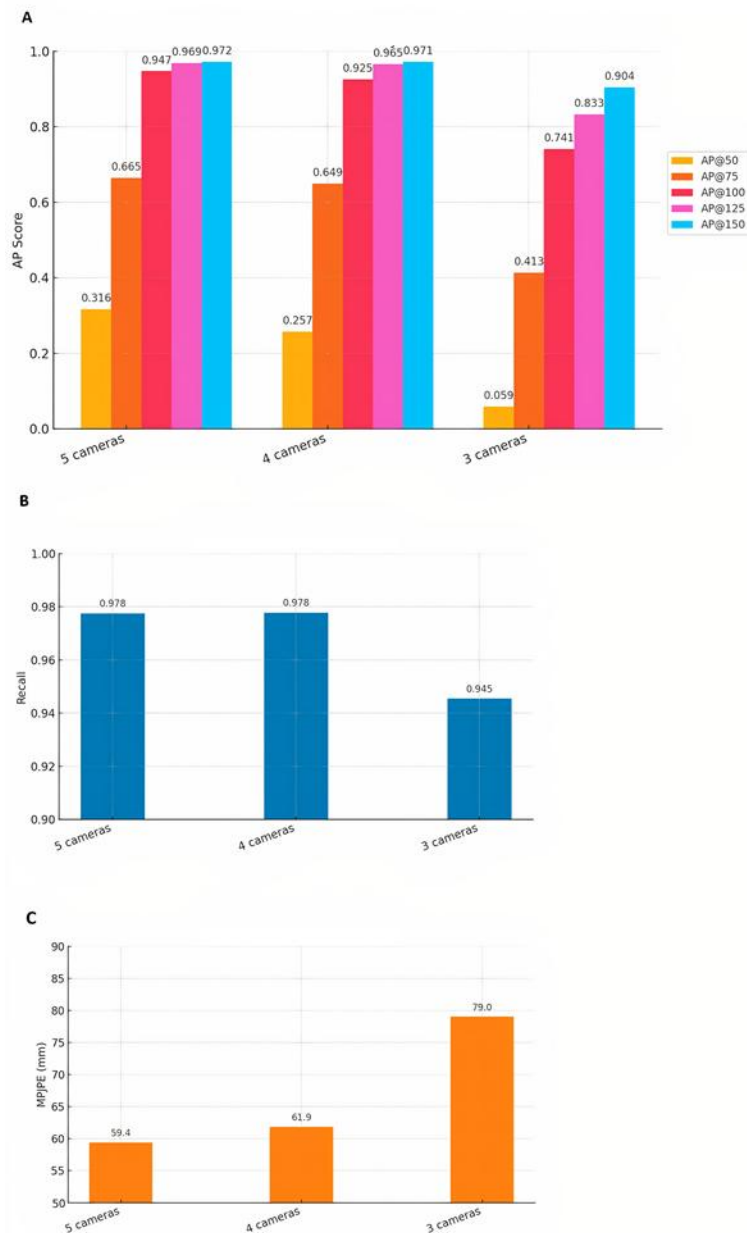
Δοκιμάσαμε τις αρχιτεκτονικές VoxelPose και Faster-VoxelPose στα σύνολα δεδομένων Campus, Shelf και Raportic. Αυτά τα σύνολα δεδομένων αναφοράς αντιπροσωπεύουν ένα ευρύ φάσμα πραγματικών, τρισδιάστατων σεναρίων εκτίμησης πόζας, επιτρέποντάς μας να αξιολογήσουμε την ακρίβεια, την υπολογιστική αποτελεσματικότητα και τη γενικευσιμότητα κάθε μοντέλου.



Εικόνα 67 Εκτίμηση 3D πόζας στα σύνολα δεδομένων (A) Campus, (B) Shelf, και (C) Raportic

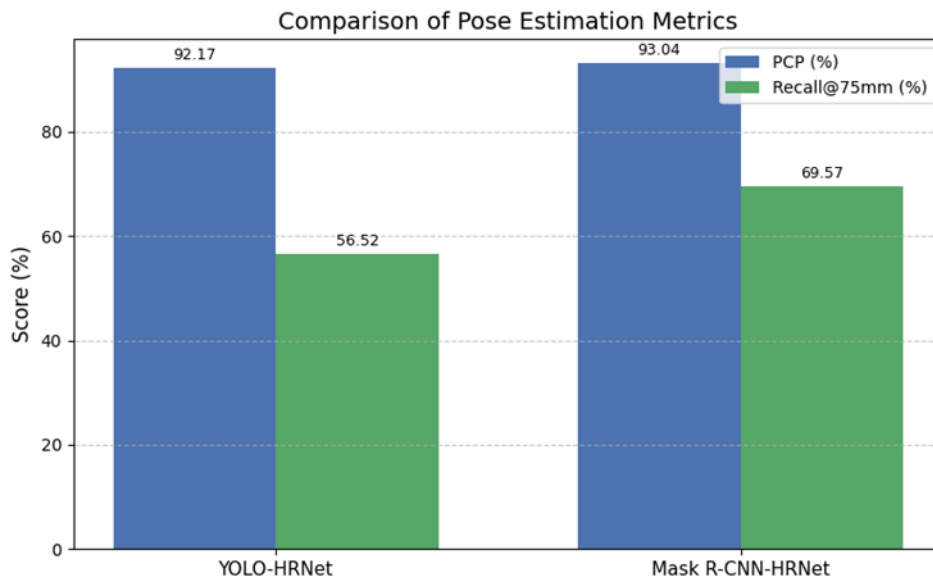
Το πλήρως ενσωματωμένο ROS σύστημα εκτίμησης στάσης εφαρμόστηκε τόσο σε public benchmarks όσο και σε πιλοτικές εφαρμογές σε πραγματικά σενάρια, δείχνοντας υψηλή ακρίβεια και απόδοση σε πραγματικό χρόνο σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών εφαρμογών. Στο σύνολο δεδομένων Raportic με πέντε καλιμπραρισμένες RGB κάμερες,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

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 68 Μετρικές αξιολόγησης του VoxelPose στο σύνολο δεδομένων Raportic με διαφορετικές ρυθμίσεις καμερών. (A) Οι μετρικές AP (AP@50, AP@75, AP@100, AP@125, AP@150) δείχνουν μείωση της απόδοσης καθώς μειώνεται ο αριθμός των καμερών. (B) Μελέτη μείωσης αριθμού καμερών ως προς το Recall: το Recall μειώνεται ελαφρώς με λιγότερες κάμερες. (C) Μελέτη μείωσης αριθμού καμερών ως προς το Μέσο Σφάλμα Θέσης ανά Αρθρωση (MRPE): το MRPE αυξάνεται, υποδεικνύοντας μειωμένη ακρίβεια με λιγότερες κάμερες.

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



Εικόνα 69 Σύγκριση της απόδοσης εκτίμησης πόζας μεταξύ των μοντέλων YOLO-HRNet και Mask R-CNN-HRNet, χρησιμοποιώντας δύο μετρικές αξιολόγησης: PCP και Recall στα 75 mm (Recall@75mm).

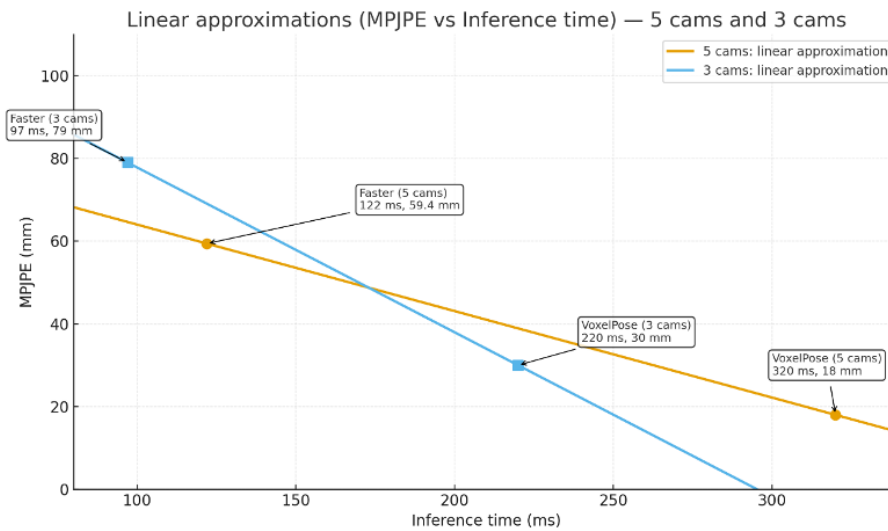
### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκαν, θα μελετηθεί η σχέση ακρίβειας εκτίμησης και ταχύτητας επεξεργασίας για τις δύο σχετικές αρχιτεκτονικές VoxelPose και Faster-VoxelPose στο σύνολο δεδομένων Raportic. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν πώς η απόδοση κάθε προσέγγισης μεταβάλλεται με τον αριθμό των καμερών, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλότερη ακρίβεια με το VoxelPose έναντι ταχύτερου χρόνου εκτέλεσης με το Faster-VoxelPose. Πιο συγκεκριμένα, το VoxelPose στο Raportic επιτυγχάνει 18 MPJPE με 5 κάμερες και χρόνο εκτέλεσης 320 ms, ενώ με 3 κάμερες φτάνει τα 30 MPJPE με χρόνο εκτέλεσης 220 ms. Αντίστοιχα, το Faster-VoxelPose επιτυγχάνει 59.4 MPJPE (122 ms) με 5 κάμερες και 79 MPJPE (97 ms) με 3 κάμερες.

Συνολικά, η χρήση της προτεινόμενης αρθρωτής αρχιτεκτονικής, η οποία βασίζεται στις λειτουργίες του ROS και αξιοποιεί είτε το VoxelPose είτε το Faster-VoxelPose, μας επιτρέπει την ταυτόχρονη επεξεργασία δεδομένων από πολλές κάμερες, αυξάνοντας αποτελεσματικά την απόδοση του συστήματος. Αυτό οδηγεί σε σημαντικά κέρδη τόσο σε ταχύτητα όσο και σε ακρίβεια, καθώς οι πρόσθετες γωνίες λήψης ενισχύουν την ανθεκτικότητα σε συνθήκες συμφόρησης και βελτιώνουν την ποιότητα της ανακατασκευής της στάσης.

Η προτεινόμενη αρθρωτή αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί ρητά για αποδοτικότητα και λειτουργία σε πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, επιτρέπεται η απρόσκοπτη ενσωμάτωση ετερογενών αισθητήρων, τον παράλληλο χειρισμό δεδομένων και τον βελτιστοποιημένο προγραμματισμό των διεργασιών, διασφαλίζοντας ότι τα κέρδη σε απόδοση επιτυγχάνονται σταθερά σε ρεαλιστικές συνθήκες πολλαπλών καμερών και πολλών ατόμων. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ ακρίβειας και χρόνου εκτέλεσης για την αρχιτεκτονική του VoxelPose και του Faster-VoxelPose στην Εικόνα 70, αξιοποιώντας 5 και 3 κάμερες, αντίστοιχα.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 70 Σχέση ακρίβειας εκτίμησης εργονομικών χαρακτηριστικών και χρόνου εκτέλεσης για 5 και 3 κάμερες.

Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική μείωση της ακρίβειας (>160–230% χειρότερα) για μία μείωση του χρόνου εκτέλεσης κατά 2 με 2.6 φορές. Αυτό δικαιολογείται στην περίπτωση που η εφαρμογή μπορεί να ανεχθεί πολύ χονδροειδείς εκτιμήσεις στάσης ή όταν οι απαιτήσεις για εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο είναι πολύ υψηλές. Διαφορετικά, το VoxelPose αποτελεί την προτιμότερη επιλογή. Το Faster-VoxelPose επιτυγχάνει σημαντική μείωση χρόνου εκτέλεσης (~2–2.6×), αλλά με κόστος σημαντικά χειρότερης ακρίβειας ανά άρθρωση (δεκάδες mm — περίπου 2.6–3.3× μεγαλύτερο MPJPE). Κατά συνέπεια, η κατάλληλη αρχιτεκτονική θα ήταν το Faster-VoxelPose όταν η εφαρμογή μπορεί να ανεχθεί χονδροειδείς εκτιμήσεις στάσεις και απαιτεί αυστηρά εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο. Αντίθετα, το VoxelPose είναι η κατάλληλη επιλογή όταν η ακρίβεια εκτίμησης εργονομικών χαρακτηριστικών ανά frame είναι πολύ κρίσιμη (σε εφαρμογές όπως motion capture, biomechanics, animation, κτλ).

Ομοίως, εάν επιχειρούσαμε να μειώσουμε τον χρόνο λειτουργίας του VoxelPose στα επίπεδα του Faster-VoxelPose (π.χ., με πιο αραιά voxels ή ελαφρύτερα backbones), θα έπρεπε να αναμένουμε σημαντική αύξηση του MPJPE, καθώς ο συμβιβασμός είναι ακριβώς αυτός: **ακρίβεια έναντι χρόνου εκτέλεσης**.

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το **Faster-VoxelPose** είναι προτιμότερο όταν η εφαρμογή απαιτεί πολύ χαμηλή καθυστέρηση ( $\leq 120$ – $130$  ms) και μπορεί να ανεχθεί χαμηλή ακρίβεια (MPJPE  $\geq 60$ – $80$  mm), ακόμη και υπό περιστασιακή απώλεια καμερών ή αποκρύψεις. Αντιθέτως, το **VoxelPose** είναι η καλύτερη επιλογή σε σενάρια που απαιτούν υψηλή ακρίβεια (MPJPE  $\leq 30$ – $40$  mm), όπου παραμένει πολύ πιο ακριβές ακόμη και με συνθήκες συμφόρησης.

Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αποδεικνύουν ότι τα βασικά **KPIs** του έργου όπως ορίστηκαν στο παραδοτέο Π1.1 επιτυγχάνονται με μετρήσιμα οφέλη:

- KPI1 Αύξηση ακρίβειας εκτίμησης χαρακτηριστικών του χειριστή: επιτυγχάνεται μέσω της υψηλότερης ακρίβειας που παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική VoxelPose.
- KPI2 Ταχύτερη εκτίμηση εργονομικών χαρακτηριστικών σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις: επιτυγχάνεται μέσω της αρχιτεκτονικής του Faster-VoxelPose, με χρόνο εκτέλεσης σχεδόν 120 ms για 5 κάμερες.
- KPI3 Αύξηση ακρίβειας εκτίμησης εργονομικών χαρακτηριστικών του χειριστή παρουσία πολλών ατόμων: επιτυγχάνεται μέσω της αρχιτεκτονικής του VoxelPose, που αποδίδει πολύ ικανοποιητικά σε συνθήκες συμφόρησης ή χρήσης μικρού αριθμού καμερών.

#### Συμμετοχή Ειδικών της Βιομηχανίας στην Αξιολόγηση

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης της προτεινόμενης λύσης για την αυτόματη εργονομική ανάλυση με βάση το RULA Score, πραγματοποιήθηκε στοχευμένη εμπλοκή ειδικών από δύο αντιπροσωπευτικούς βιομηχανικούς τομείς: διαχείριση απορριμμάτων και logistics/air cargo. Η συμμετοχή των ειδικών

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

κάλυψε το πλήρες φάσμα από τεχνική αξιολόγηση έως αποτίμηση λειτουργικής καταλληλότητας σε πραγματικά περιβάλλοντα εργασίας.

#### Παρουσίαση και αξιολόγηση της λύσης από την PIKEI (Διαχείριση Απορριμμάτων)

Η λύση παρουσιάστηκε αναλυτικά στην εταιρεία PIKEI, η οποία διαθέτει εξειδίκευση σε τεχνολογίες υποστήριξης δημοτικών υπηρεσιών καθαριότητας. Η τεχνική ομάδα της εταιρείας αξιολόγησε:

- την ταχύτητα υπολογισμού του RULA Score σε πραγματικό χρόνο,
- την ακρίβεια της μεθόδου σε σκηνές με πολλαπλούς εργαζομένους,
- την καταλληλότητα της για τις απαιτητικές συνθήκες της συλλογής απορριμμάτων.

Η PIKEI παρείχε πρόσβαση σε πραγματικό πεδίο επιχειρήσεων μέσω της συνεργασίας της με τον Δήμο Χαλκιδέων, επιτρέποντας τη συλλογή δεδομένων και την επικύρωση των μετρήσεων σε αυθεντικές συνθήκες εργασίας. Οι ειδικοί αξιολόγησαν θετικά τη συμβολή της λύσης στον εντοπισμό εργονομικών κινδύνων κατά την ανύψωση, χειρισμό και μεταφορά κάδων, αναγνωρίζοντας τη ως σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση πρακτικών και εκπαιδύσεων εργαζομένων. Αποτέλεσμα της αξιολόγησης ήταν η θετική πρόθεση υιοθέτησης της λύσης σε μελλοντικά έργα και υπηρεσίες της PIKEI.

#### Αξιολόγηση από τη Lödige Greece (Air Cargo Logistics)

Η λύση παρουσιάστηκε επίσης στο ελληνικό τμήμα της Lödige, το οποίο εδρεύει στο Επιστημονικό Πάρκο Πατρών και αναπτύσσει τεχνολογίες για τον κλάδο του αεροπορικού cargo. Ειδικοί της εταιρείας αξιολόγησαν την εφαρμογή του RULA Score στο πλαίσιο χρήσης AGV forklifts, δηλαδή αυτοματοποιημένων περονοφόρων οχημάτων σχεδιασμένων για συνεργασία με χειριστές. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε στα εξής:

- τη δυνατότητα της λύσης να λειτουργεί σε υψηλής κινητικότητας περιβάλλοντα με μεγάλο αριθμό εργαζομένων,
- την αξιοπιστία των εργονομικών μετρήσεων κατά την εκτέλεση σύνθετων διαδικασιών φόρτωσης/εκφόρτωσης,
- τη συμβολή της στην ενίσχυση της ασφάλειας και τη μείωση ανθρωπογενών λαθών,
- την προοπτική ενσωμάτωσής της σε μελλοντικά AGV-based συστήματα αυτοματοποιημένων logistics.

Οι ειδικοί της Lödige κατέγραψαν πολύ θετικά σχόλια σχετικά με την πρακτική χρησιμότητα της λύσης και την ακρίβεια των μετρήσεων σε σύνθετες επιχειρησιακές συνθήκες, εκφράζοντας πρόθεση διερεύνησης ενσωμάτωσής της σε επόμενες φάσεις ανάπτυξης.

#### Συμπεράσματα για τη Συμμετοχή των Ειδικών

Η συμμετοχή των ειδικών από PIKEI και Lödige συνέβαλε ουσιαστικά:

- στην επαλήθευση των τεχνικών χαρακτηριστικών της λύσης,
- στην επιβεβαίωση της επιχειρησιακής της αξίας,
- στη διασφάλιση ότι η μέθοδος RULA μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε δύο πολύ διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς,
- στη διαμόρφωση προϋποθέσεων για πιλοτική ενσωμάτωση της τεχνολογίας σε συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων και air cargo logistics.

Η σύγκλιση θετικών αξιολογήσεων από δύο ανεξάρτητους βιομηχανικούς τομείς αποδεικνύει την ωριμότητα, αξιοπιστία και πρακτική χρησιμότητα της προτεινόμενης λύσης.

## 2.17. Κατανόηση σκηνής με βάση οπτική πληροφορία

Η λύση 17 στοχεύει στην παροχή μιας πλατφόρμας κατανόησης σκηνής που μπορεί να υιοθετηθεί εύκολα και χωρίς μεγάλο κόστος από Ελληνικές επιχειρήσεις και βιομηχανίες. Σαν πηγή οπτικής πληροφορίας η λύση μπορεί να χρησιμοποιήσει μια μεγάλη γκάμα από κοινές έγχρωμες κάμερες εμπορίου χαμηλού κόστους (Webcam, IP Cameras) που είναι ήδη αρκετά διαδεδομένες στην Ελληνική αγορά. Για τους σκοπούς αξιολόγησης χρησιμοποιήσαμε και δοκιμάσαμε τόσο τέτοιες κάμερες όσο και ροές εικόνων video από το internet καταγεγραμμένα με κάμερες άγνωστων στοιχείων πιστοποιώντας την ευρωστία των νευρωνικών δικτύων της λύσης. Με την έννοια σκηνή εννοούνται οι οντότητες που απεικονίζονται σε μια εικόνα όπου η λύση παίρνει σαν κύριο άξονα την ανθρώπινη παρουσία σε μια σκηνή αλλά καθώς επίσης και στο υπόλοιπο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα η λύση μπορεί να παράγει δισδιάστατη, τρισδιάστατη καθώς και αντίστροφη κινηματική επίλυση της στάσης ενός εντοπισμένου ανθρώπινου σώματος. Επιπρόσθετα μπορεί να επιστρέψει χάρτες σχετικού βάθους και κάθετων διανυσμάτων τόσο για το ανθρώπινο σώμα όσο και για όλη την υπόλοιπη σκηνή, καθώς και χάρτες τμηματοποίησης με επισημασμένες περιοχές που εντοπίζονται άνθρωποι, ζώα, οχήματα, κείμενο, γενικής φύσης αντικείμενα και συσκευές. Τέλος η λύση υποστηρίζει την απάντηση ερωτήσεων εκφρασμένες στην Ελληνική γλώσσα ως προς την καταγραφόμενη σκηνή και απάντηση επίσης στην Ελληνική γλώσσα κάνοντας την εξαιρετικά προσιτή. Η ευέλικτη αρχιτεκτονική μας έχει αρκετά χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις με έναν κόμβο που να μπορεί να εκτελεί ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω διεργασίες να μπορεί να φιλοξενηθεί σε ένα μηχάνημα με GPGPU με 16GB VRAM. Η διεπαφή της λύσης βασίζεται σε HTTP API το οποίο την κάνει άμεσα διαθέσιμη απευθείας από συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, tablet, laptop, ακόμα και έξυπνες τηλεοράσεις που μπορεί να διαθέτει στο ενεργητικό της μια επιχείρηση για χρήση από τους εργαζομένους της μέχρι και με πλήρως προγραμματιστικό τρόπο μέσω Python, Javascript κλπ γλώσσες προγραμματισμού από εργαζόμενους του IT τομέα της εκάστοτε επιχείρησης οι οποίοι με εύκολο τρόπο να μπορούν να οργανώσουν περιοδικές ή συνεχείς ροές δεδομένων μέσω του προγραμματιστικού API που προσφέρει η λύση. Έτσι με διαφανή τρόπο και χωρίς να χρειάζεται η ενδελεχής γνώση της εσωτερικής δομής και λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων που προσφέρουμε ερωταπαντήσεις στο σύστημα σχετικά με την σκηνή που καταγράφεται από μια από τις κάμερες της επιχείρησης μπορούν να αυτοματοποιηθούν και να ενοποιηθούν με άλλες παραδοσιακές ροές δεδομένων.

Σχετικά με την βιομηχανική αξιολόγηση της λύσης, το Πανεπιστήμιο Κρήτης υλοποίησε έναν διακομιστή για την επίδειξη της λύσης προσβάσιμο μέσω του διαδικτύου (<http://greece40.csd.uoc.gr/>) ο οποίος δεν απαιτεί καμία ενέργεια αγοράς εξοπλισμού ή εγκατάστασης από επιχειρήσεις για την πρόσβαση τους σε αυτόν. Εν συνέχεια, ήρθε σε επαφή με την ErgoProlipsis η οποία έχει έδρα το Ηράκλειο Κρήτης και προσφέρει υπηρεσίες διαχείρισης κινδύνων, επαγγελματικής Υγείας & Ασφάλειας (Υ&Α) και περιβάλλοντος σε βιομηχανίες δίνοντας πρόσβαση στις λειτουργίες τις πλατφόρμας. Τέλος για κάθε ένα από τα νευρωνικά δίκτυα της λύσης η ομάδα μας διενέργησε διεξοδικό έλεγχο τόσο με βάση σύνολα δεδομένων τα οποία χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία για το εκάστοτε υποπρόβλημα που επιλύει η λύση, αλλά όσο και με ροές δεδομένων από διάφορες πραγματικές επιχειρήσεις που βρήκαμε στο διαδίκτυο όπως επίσης και με εργαστηριακά πειράματα ποιοτικής αποτίμησης των αποτελεσμάτων.

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Για τον έλεγχο και αξιολόγηση του πρώτου άξονα της λύσης μας, την ανίχνευση της δισδιάστατης, τρισδιάστατης θέσης αλλά επίσης και της αντίστροφης κινηματικής (A/K) του ανθρώπου από μια εικόνα χρησιμοποιήθηκε το σύνολο δεδομένων Human 3.6M το οποίο είναι ένα από τα διεθνή de-facto σημεία αναφοράς με παραπάνω από 4700 βιβλιογραφικές αναφορές για την ποσοτική αποτίμηση τέτοιων μεθόδων. Σε εργαστηριακές συνθήκες χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο για την αποτίμηση της στάσης και της κίνησης ενός ανθρώπου ο οποίος κάνει χρήση κράνους εικονικής πραγματικότητας για την εξαγωγή του ανθρώπινου σκελετού. Με αυτό τον τρόπο μηχανήματα και οχήματα μπορούν να ενημερώνονται για την θέση του εργαζομένου ο οποίος λόγω του κράνους έχει ελλιπή οπτική και ηχητική αντίληψη για το περιβάλλον του. Τέλος κάναμε χρήση της μεθόδου σε video από το διαδίκτυο με κάμερες αγνώστου

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

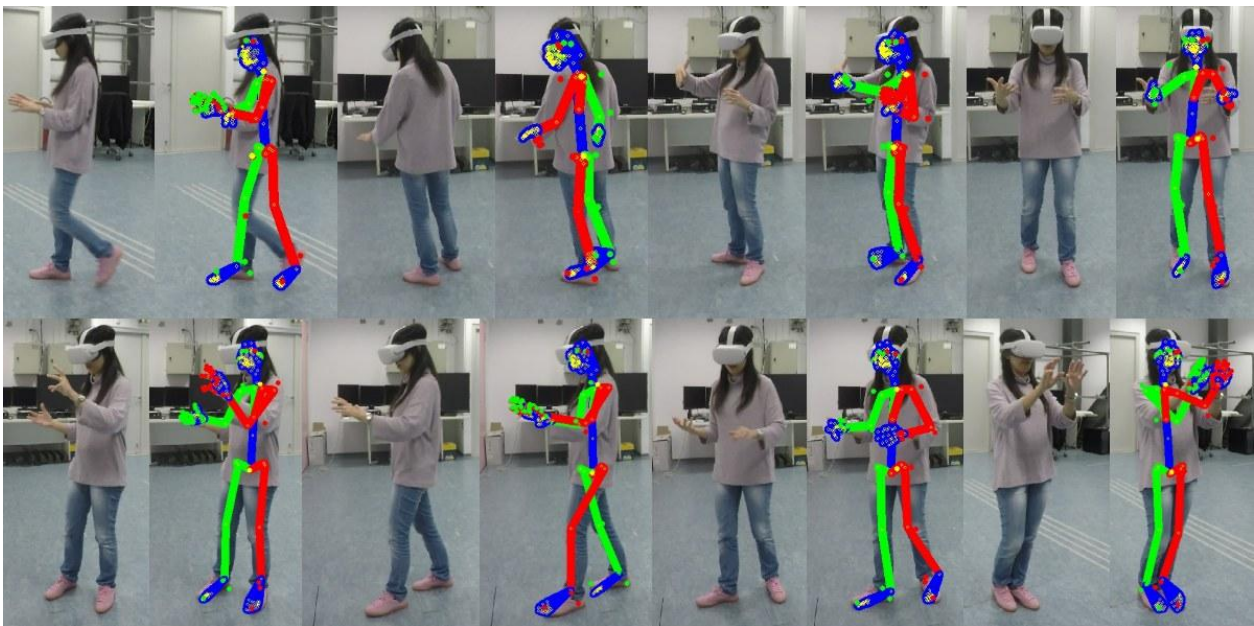
προέλευσης σε μια σκηνή όπου ένας άνθρωπος μεταχειρίζεται αντικείμενα με την βοήθεια ενός ρομποτικού βραχίονα.



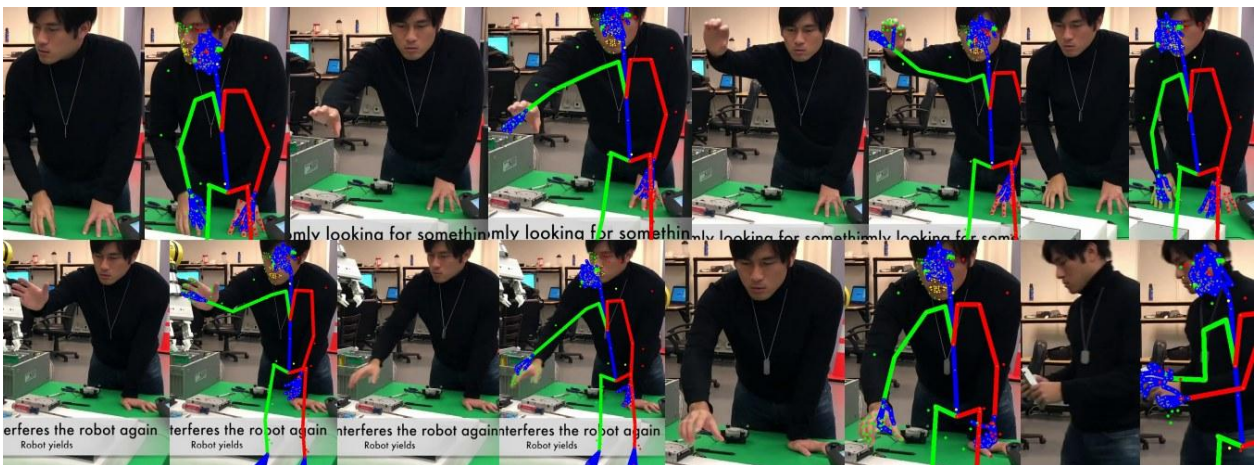
Εικόνα 71 Ενδεικτικές εικόνες κατά την εργαστηριακή χρήση της μεθόδου εξαγωγής αντίστροφης κινηματικής (A/K) σε σύνολα δεδομένων τα οποία καταγράψαμε όπου γίνεται χρήση κράνους εικονικής πραγματικότητας και όπου κατά την διάρκεια κατά την οποία ο χρήστης μετακινείται και αλληλεπιδρά με αντικείμενα στο μετασύμπαν το σύστημα μας παρακολουθεί την κίνηση του στον χώρο για την διασφάλιση της ασφάλειας του και σε video όπου γίνεται συναρμολόγηση με την βοήθεια ρομποτικού βραχίονα.



### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



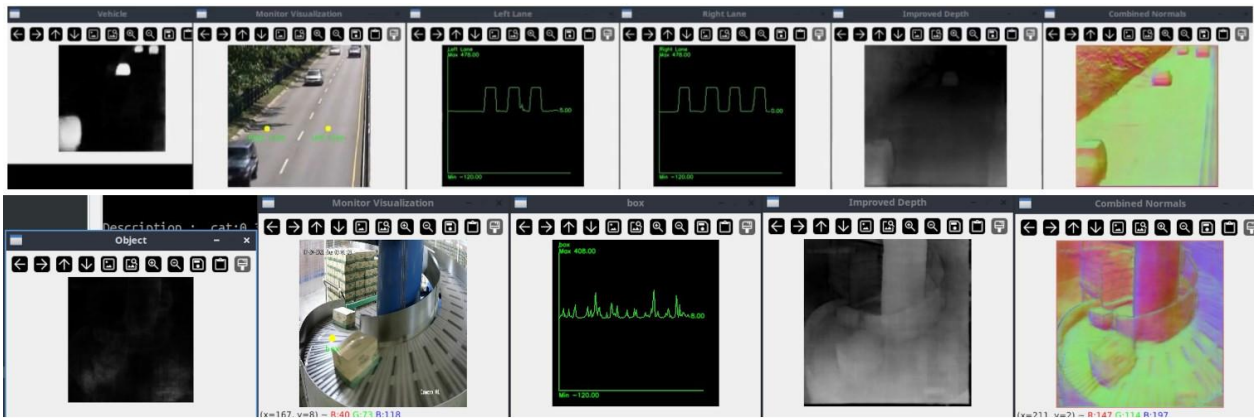
Εικόνα 72 Παρατηρούμε την εύρωστη παρακολούθηση ατόμων διαφορετικών φύλων και σωματότυπου καθ'όλη την διάρκεια παρακολούθησης των προσώπων



Εικόνα 73 Κατά την χρήση της λύσης σε σκηνή όπου ένας χρήστης αλληλεπιδρά με ένα ρομποτικό θραχίονα, παρατηρούμε σε γενικές γραμμές εύρωστη εξαγωγή αντίστροφης κινηματικής (Α/Κ) ακόμα και για άκρα τα οποία δεν είναι πλήρως ορατά (πόδια).

Το ανθρώπινο σώμα παρουσιάζει ομοιομορφία στους βαθμούς ελευθερίας και τα μοτίβα της κίνησης του ανεξαρτήτως του μέρους στο οποίο ο άνθρωπος κινείται. Αντίθετα για την αποτίμηση κατανόησης της υπόλοιπης σκηνής πανεπιστημιακά και ερευνητικά εργαστήρια αλλά ακόμα και βιομηχανικά περιβάλλοντα παρουσιάζουν περιορισμένη ποικιλομορφία. Για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η άντληση δεδομένων από μια ευρεία γκάμα σεναρίων τοποθεσιών και σκηνών για μια σωστή αξιολόγηση. Για τον έλεγχο και την ποσοτική αποτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου χρησιμοποιούμε σύγκριση με τις παγκοσμίως ακριβέστερα νευρωνικά δίκτυα αιχμής και εξαγωγή ποσοστιαίας ακρίβειας της λύσης σε σχέση με την εκτέλεση ενός από αυτά στο σύνολο επαλήθευσης δεδομένων COCO που για άλλη μια φορά αποτελεί διεθνές πρότυπο επαλήθευσης κατανόησης σκηνής με πάνω από 65000 βιβλιογραφικές αναφορές. Για την ποιοτική αποτίμηση συλλέγουμε δημοσίως διαθέσιμα βίντεο τα οποία απεικονίζουν βιομηχανικά περιβάλλοντα από το διαδίκτυο και εκτελούμε την λύση μας στην ροή δεδομένων. Τέλος υλοποιούμε με Pythοn κώδικα μια εφαρμογή συνεχής δειγματοληψίας μιας ροής δεδομένων από κάμερες ασφαλείας και πραγματοποιούμε τον μετασχηματισμό των εικόνων σε πληροφορία χρήσιμη για την δυναμική απαρίθμηση συμβάντων που συμβαίνουν από μετακίνηση στοιχείων της σκηνής.




### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 74 Ενδεικτικά αποτελέσματα κατά την χρήση της λύσης για δυναμική απαρίθμηση/κατανόηση συμβάντων στην σκηνή. Τοποθετούμε σημεία δειγματοληψίας (κίτρινες κουκίδες στις εικόνες εισόδου). Παρατηρώντας τις εναλλαγές στον χάρτη βάθους και τμηματοποίησης της σκηνής και αντιστοιχώντας τις αλλαγές σε μια γραφική παράσταση σε περιπτώσεις που η σκηνή περιέχει αντικείμενα στα οποία το νευρωνικό δίκτυο έχει εκπαιδευτεί παρατηρούμε μεγάλη ευρωστία στην γραφική παράσταση. Αντίθετα σε εικόνες με ταχεία εξεζητημένα κινούμενα αντικείμενα (πχ κουτιά με εταιρικά σήματα) ο εντοπισμός είναι πιο θορυβώδης αλλά παρόλα αυτά παραμένει ακριβής.

Τέλος για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων του μοντέλου γλώσσας/όρασης χρησιμοποιούμε και πάλι εικόνες από γραμμές παραγωγής στις οποίες αυτή την φορά δίνουμε μια ελεύθερης μορφής ερώτηση στην Ελληνική γλώσσα και λαμβάνουμε μια απάντηση και πάλι στα Ελληνικά.

Πίνακας 31 Ενδεικτικά παραδείγματα ερωτήσεων και απαντήσεων κατά την αξιολόγηση του μοντέλου γλώσσας/όρασης

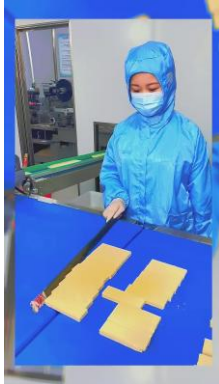
Εικόνα Εισόδου	Ερώτηση στο Σύστημα	Απάντηση Συστήματος
	Φορούν οι εργαζόμενοι προστατευτικά γάντια και κράνη;	Ναι, το κάνουν.
	Φοράνε οι εργαζόμενοι προστατευτικά γάντια;	Όχι
	Είναι γεμάτη η γραμμή παραγωγής;	Όχι, δεν φαίνεται ότι η γραμμή παραγωγής είναι πλήρως κατειλημμένη.
	Υπάρχει εργαζόμενος που επιβλέπει την θέση παραγωγής;	Όχι

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Φορούν οι εργαζόμενοι προστατευτικά κράνη και γιλέκα;

Ναι, φοράνε προστατευτικά κράνη και γιλέκα.



Τι μέτρα προστασίας χρησιμοποιεί ο εργαζόμενος;

Ο εργαζόμενος παίρνει προσωπικό προστατευτικό εξοπλισμό (PPE) συμπεριλαμβανομένης μιας μπλε στολή κουκούλα, γάντια, και μάσκα προσώπου για προστασία.



Τι δείχνει η εικόνα?

Η εικόνα δείχνει ένα εργοστάσιο κατασκευής αυτοκινήτων με αρκετά κόκκινα σπορ αυτοκίνητα σε διάφορα στάδια συναρμολόγησης. Τα αυτοκίνητα παρατάσσονται σε μια γραμμή συναρμολόγησης, και υπάρχουν εναέρια σήματα που δείχνουν διαφορετικά τμήματα ή εργασίες στο πλαίσιο της διαδικασίας παραγωγής.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

RGB Input	Normal Output	Depth Output	Joints	Parts	Segment.	Person	Vehicle	Animal	Object	Furniture	Appliance	Response Text
												kitchen:0.89 preparing:0.69 food:0.63 woman:0.41 man:0.30 two:0.22
												man:0.74 holding:0.56 hat:0.50 wearing:0.45 kitchen:0.26
												man:0.64 cake:0.28 table:0.23 holding:0.20 woman:0.20
												filled:0.61 kitchen:0.51 conveyor:0.38 belt:0.32 lots:0.31 display:0.23
												airport:0.78 luggage:0.75 standing:0.59 next:0.54 woman:0.32 man:0.32
												woman:0.78 girl:0.32 cake:0.29 sitting:0.28 little:0.23 her:0.22 bathroom:0.22
												woman:0.63 her:0.42 hair:0.41 brushing:0.39 scissors:0.37 teeth:0.33 man:0.27
												people:0.57 crowd:0.33 large:0.30 group:0.27 display:0.22 watching:0.21
												man:0.84 sitting:0.64 laptop:0.30 holding:0.25
												cake:0.76 man:0.62 cutting:0.59 woman:0.42 table:0.22
												kitchen:0.77 man:0.67 preparing:0.51 food:0.31 woman:0.28 standing:0.23
												sitting:0.93 man:0.68 laptop:0.50 chair:0.24
												man:0.67 woman:0.45 cutting:0.34 hospital:0.22
												boy:0.30 man:0.28 woman:0.26 young:0.25 wearing:0.23
												woman:0.74 her:0.35 holding:0.34 phone:0.23

Εικόνα 75 Ενδεικτικά αποτελέσματα κατά την χρήση της λύσης για εξαγωγή βάθους, κάθετων διανυσμάτων και χαρτών τμηματοποίησης για σκηνές από αλυσίδες παραγωγής διαφόρων βιομηχανιών.

### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Οι δείκτες αξιολόγησης του Παραδοτέου 1.1 ορίστηκαν ως:

- **KPI1:** Οπτική παρακολούθηση των αρθρώσεων του ανθρώπινου σώματος με μια σχετικά καθαρή ροή εικόνας. και εξαγωγή AP/MPJPE (Average Precision/Mean Per Joint Estimation Error).
- **KPI2:** Επεξεργασία μιας ροής εικόνων σε πραγματικό χρόνο και καταγραφή του ρυθμού επεξεργασίας σε Hertz.
- **KPI3:** Δια συνδεσιμότητα των δεδομένων εξόδου της λύσης με προσιτό API από άλλες εφαρμογές / λύσεις / πακέτα λογισμικού των επιχειρήσεων.
- Για την αποτίμηση του **KPI1** χρησιμοποιούνται οι μετρικές AP, MPJPE, MSE και HDM.

Το **MSE (Mean Squared Error)** αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μετρικές αξιολόγησης για συνεχείς μεταβλητές. Μετρά τη μέση τιμή του τετραγώνου της διαφοράς μεταξύ των προβλεπόμενων ορθών τιμών και των τιμών που επιστρέφει μια μέθοδος. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του MSE, τόσο ακριβέστερη θεωρείται η πρόβλεψη του μοντέλου προσεγγίζοντας το 0 σε μια τέλεια επίλυση.

Για ένα ζεύγος δεδομένων  $y_{true}, y_{pred}$  η μετρική ορίζεται ως:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{true_i} - y_{pred_i})^2$$

όπου (N) είναι ο συνολικός αριθμός τιμών (π.χ. pixels, βάθη, διανύσματα, embeddings κλπ.).

Το **MPJPE** είναι η κατεξοχήν μετρική αξιολόγησης των συστημάτων τρισδιάστατης εκτίμησης ανθρώπινης στάσης (3D Human Pose Estimation) στο διεθνές σύνολο δεδομένων Human3.6M. Μετρά τη μέση Ευκλείδεια απόσταση σε χιλιοστά (mm) μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης θέσης κάθε άρθρωσης του σώματος. Γνωρίζοντας την πραγματική τρισδιάστατη θέση κάποιων σημείων και συγκρίνοντας τα με προβλέψεις θέσης  $p_{true}, p_{pred}$ , η μετρική ορίζεται ως:

$$MPJPE = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J \sqrt{(p_{true_i} - p_{pred_i})^2}$$

όπου (J) = πλήθος αρθρώσεων και το αποτέλεσμα είναι η μέση πραγματική απόσταση σε σύγκριση με τις προβλέψεις του νευρωνικού δικτύου. Η μετρική χρησιμοποιείται διεθνώς ως βασική ποσοτική αξιολόγηση ακρίβειας για 3D pose estimation.

Τέλος για την αξιολόγηση εξόδων τύπου heatmap (π.χ. χάρτες βάθους, κάθετων διανυσμάτων), χρησιμοποιούμε την **Heatmap Distance Metric (HDM)**. Η μετρική υπολογίζει το ποσοστό των pixel για τα οποία η προβλεπόμενη τιμή βρίσκεται εντός ενός ανεκτού περιθωρίου απόκλισης T από την πραγματική τιμή. Για heatmaps κανονικοποιημένα στο εύρος  $[0,1]$ , η μετρική ορίζεται ως εξής:  $Y = 1 \text{ εαν } |(y_{true} - y_{pred})| \leq T$  ειδάλλως  $Y = 0$   $HDM = \frac{1}{pixels} \sum |Y - 1|$

Ξεκινώντας με το KPI1 ακολουθώντας το πρωτόκολλο του συνόλου δεδομένων H36M[7] παρατηρούμε στην ποσοτική αποτίμηση της εξαγωγής της τρισδιάστατης αντίστροφης κινηματικής του σώματος ένα μέσο λάθος της τάξης των 99 χιλιοστών. Το κάθε υποπρωτόκολλο εξετάζει κάποιες συγκεκριμένες δράσεις με την κατηγορία “Dir” να εξετάζει κινήσεις που κάνει κάποιος που ζητάει οδηγίες, “Dis” συζήτηση, “Eat” γεύμα, “Gre” χαιρετισμούς κοκ. Αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 32.

Πίνακας 32 Συγκεντρωτικός πίνακας μέσης ακρίβειας ανά άκρο (Mean Per Joint Estimation Error) της τρισδιάστατης επίλυσης της ανθρώπινης κινηματικής της λύσης μας σε χιλιοστά (mm) στο σύνολο επαλήθευσης του H3.6M.

Dir	Dis	Eat	Gre	Pho	Pos	Pur	Sit	Sm	Pho	Wai	Wal	Dog	Wa	Sit	Avg
71	78	107	86	98	79	113	121	99	98	84	100	122	104	138	99

Συνεχίζοντας με την ποσοτική αξιολόγηση της λύσης συγκρίνουμε τις δυνατότητες της λύσης στις υποδιεργασίες εξαγωγής αρθρώσεων και διανυσμάτων μεταξύ αρθρώσεων, συγκρίνοντας με το σύνολο δεδομένων COCO (Common Objects in Context). Για την εξαγωγή χαρτών βάθους και 3D διανυσμάτων με την μέθοδο Depth Anything V2 που τον καιρό της υλοποίησης ήταν η καλύτερη παγκοσμίως

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

βιβλιογραφική μέθοδος εξαγωγής χαρτών βαθών από απλές κάμερες, και τέλος για τον εντοπισμό περιοχών στην σκηνή με κείμενο την μέθοδο DPText και για τον εντοπισμό κλάσης με το Detectron 2.

Πίνακας 33 Συγκεντρωτικός πίνακας μέσης ακρίβειας (Average Precision) της λύσης με την χρήση της μετρικής HDM και Mean Squared Error (MSE) έναντι του σετ επαλήθευσης δεδομένων COCO ή των αποτελεσμάτων των καλύτερων παγκοσμίως νευρωνικών δικτύων την στιγμή εκπόνηση

Τύπος	Σύγκριση	HDM 0.1	HDM 0.3	HDM 0.5	HDM 0.8	MSE
Αρθρώσεις	COCO-GT	98%	98%	99%	99%	1.34
Διαν.Αρθρ.	COCO-GT	97%	97%	97%	98%	1.09
Βάθος	DAv2	53%	57%	57%	58%	58.49
3Δ Διανύσματα	DAv2	50%	60%	63%	68%	54.59
Εντ. Κειμένου	DPText	98%	98%	98%	98%	0.67
Εντ. Κλάσης	Detectron2	97%	97%	97%	98%	1.62

Η σύγκριση αποκαλύπτει μεγάλη σύγκλιση > 97% τόσο ως προς το σύνολο δεδομένων COCO όσο και με τις μεθόδους τελευταίας τεχνολογίας DPText και Detectron 2. Αντίστοιχα στην εξαγωγή βάθους και 3Δ διανυσμάτων παρατηρούμε χαμηλότερη ακρίβεια της τάξης του 53% - 68% ανάλογα με το κατώφλι T που χρησιμοποιούμε. Ο λόγος είναι ότι οι χάρτες βάθους που παράγει η τεχνική DAV2 είναι σχετικές με το ελάχιστο και μέγιστο βάθος μιας σκηνής και άρα ακόμα και πολύ μικρές αυξομειώσεις σε αυτά τα 2 όρια προκαλούν μεγάλα σφάλματα σε όλες τις τιμές του χάρτη εξηγώντας τις μεγαλύτερες τιμές.

Ως προς το KPI2 εκτελώντας όλα τα νευρωνικά δίκτυα ταυτόχρονα σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή AMD Ryzen 9 9900X και κάρτα γραφικών GeForce RTX 5080 με 16GB RAM επιτυγχάνεται επεξεργασία ροών δεδομένων με ~15Hz για εξαγωγή τρισδιάστατης αντίστροφης κινηματικής και ~18Hz για την ταυτόχρονη εξαγωγή δισδιάστατης πόζας, βάθους, διανυσμάτων και κατάτμησης της σκηνής σε αντικείμενα. Τέλος η εκτέλεση του μοντέλου γλώσσας/εικόνας μπορεί να υποστηριχθεί σε ρυθμούς 0.82Hz στην αγγλική γλώσσα και 0.67Hz στα Ελληνικά από τον δοκιμαστικό διακομιστή στο Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Λειτουργία	Παράμετροι	Συσκευή	Ρυθμός	Ακρίβεια
Εξαγωγή A/K	13M	CPU	14.91Hz	99 mm
Εξαγωγή 2Δ πόζας	329M	GPU >=8GB	18.08Hz*	98%
Εξαγωγή 3Δ βάθους	329M	GPU >=8GB	18.08Hz*	53%
Εξαγωγή 3Δ διανυσμάτων	329M	GPU >=8GB	18.08Hz*	50%
Εξαγωγή χάρτη κλάσεων	329M	GPU >=8GB	18.08Hz*	97%
Ερωταπαντήσεις Αγγλικά[14]	3300M	GPU>=16GB	0.82Hz	61% MMMUBenchmark
Ερωταπαντήσεις Ελληνικά[14]	3300M	GPU>=16GB	0.67Hz	61% MMMUBenchmark

Πίνακας 34 Συγκριτικός πίνακας σχετικού μεγέθους νευρωνικών δικτύων τελευταίας τεχνολογίας που εκτελεί κάποια εξειδικευμένη διεργασία κατανόησης σκηνής. Η λύση μας παράγει έναν μοναδικό διεθνή συνδυασμό εξόδων κατανόησης σκηνής χρησιμοποιώντας ένα κλάσμα του μεγέθους δικτύων που απαιτούνται από τις βέλτιστες τεχνικές στην διεθνή βιβλιογραφία. Για την λειτουργία ερωταπαντήσεων σε φυσική γλώσσα στα Ελληνικά κάνουμε χρήση του οπτικού-γλωσσικού μοντέλου Deep Seek VL2 το οποίο έχει δισεκατομμύρια παραμέτρους και έχει κόστος εκπαίδευσης πολλών εκατομμυρίων κάτι το οποίο καθιστά ανέφικτη την κατασκευή μιας ιθαγενούς Ελληνικής λύσης με τους διαθέσιμους πόρους.

Νευρωνικό Δίκτυο	Μέγεθος	Άνθρωποι	3Δ Βάθος	3Δ Κάθετα διανύσματα	Εντοπισμός Κλάσεων	Εντοπισμός Κειμένου	Περιγραφή	Φυσική γλώσσα
OpenPose	28M <sup>1</sup>	✓						
DAv2	335M <sup>1</sup>		✓	✓				

Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Detectron2	63M <sup>1</sup>				✓			
DPTText	44M <sup>1</sup>					✓		
VisionGPT2	239M <sup>1</sup>						✓	
DeepSeek VL-2	3300M <sup>2</sup>						✓	✓
Η Λύση μας	342M <sup>1</sup> +3300M <sup>2</sup>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

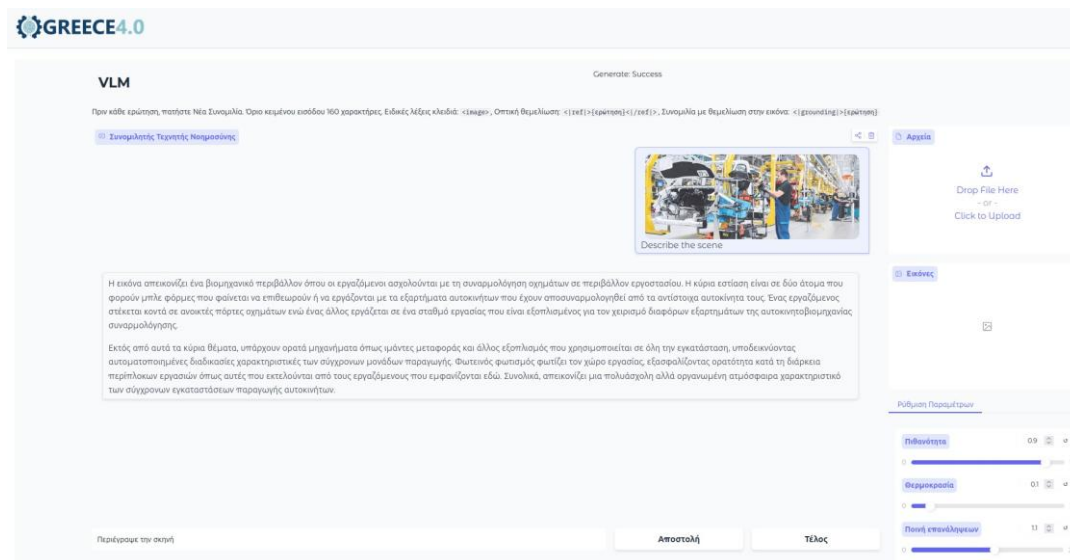
Τα παραπάνω αποτελέσματα (Πίνακας 34) αποδεικνύουν ότι η αρχιτεκτονική της λύσης επιτυγχάνει πολύ υψηλή σχέση ακρίβειας σε σύγκριση με μεγαλύτερα μοντέλα αιχμής της διεθνούς βιβλιογραφίας. Παίρνοντας υπόψιν τον Πίνακα 34, επίσης παρατηρούμε ότι το μέγεθος δικτύων που χρησιμοποιούμε είναι σημαντικά μικρότερο κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό έτσι ώστε να συμβαδίζει με τους τυπικά περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους διαθέσιμους στην Ελληνική βιομηχανία. Συγκεκριμένα, η εξαγωγή αντίστροφης κινηματικής (A/K) παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλό ρυθμό εκτέλεσης σε συμβατικό CPU hardware, ενώ επιτυγχάνουμε υψηλή ακρίβεια καθώς και δυνατότητα εξαγωγής πολλαπλών χαρτών (joints, βάθος, normals, segmentation) σε ένα μόνο πέρασμα πετυχαίνοντας αξιοσημείωτη αποδοτικότητα σε σύγκριση με τα μοντέλα της βιβλιογραφίας, παρότι αυτά είναι σημαντικά μεγαλύτερα σε αριθμό παραμέτρων. Το σύστημα πολυτροπικής κατανόησης εικόνας-γλώσσας (DeepSeekVL-2[14]) επιτυγχάνει τις απαιτούμενες επιδόσεις για την υποστήριξη ερωταπαντήσεων, ενώ η προσθήκη της Ελληνικής γλώσσας με την υλοποίηση ενός επιπέδου μετάφρασης, επιβεβαιώνει τη λειτουργικότητα του γλωσσικού σκέλους της λύσης. Συνολικά, όλες οι υλοποιημένες υπο-μονάδες ικανοποιούν τις απαιτήσεις ταχύτητας και ακρίβειας για χρήση σε πραγματικό χρόνο με βιομηχανικές κάμερες.

Τέλος ως προς το **KPI3** η λύση βασίζεται στο λογισμικό εξυπηρετητή Gradio και υποστηρίζει διασύνδεση με τις γλώσσες Python, Javascript, BASH Shell. ενώ μέσω της βιβλιοθήκης libcurl είναι δυνατή η χρήση της από γλώσσες όπως C/C++, Java, Rust, Pascal και άλλες. Χρησιμοποιώντας την γλώσσα python αναπτύξαμε επίσης μια εφαρμογή που να εξομοιώνει κάποια πιθανή χρήση από επιχειρήσεις για την καταμέτρηση γεγονότων με βάση οπτική πληροφορία όπως φαίνεται στην Εικόνα 74. Σαν ενδεικτική εφαρμογή για την εξαγωγή αντίστροφης κινηματικής υλοποιήσαμε μια απλή εφαρμογή παρακολούθησης των αρθρώσεων και καταγραφής του εύρους της κίνησης τους. Τέλος δοκιμάσαμε την υλοποίηση εφαρμογής ελέγχου συνθηκών σε μια σκηνή με την μορφή συνεχών ιδίων ερωτήσεων και εγγραφή συμβάντος όταν αυτές παραβιάζονται (πχ προστατευτικά κράνη, γάντια κτλ.).

#### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η συνολική αξιολόγηση της Τεχνολογικής Λύσης 17 απέδειξε ότι το σύστημα επιτυγχάνει υψηλό επίπεδο ακρίβειας και λειτουργικής ανθεκτικότητας σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών καταγραφής, ανεξαρτήτως τύπου κάμερας, φωτισμού, σωματότυπου των ανθρώπων στην σκηνή ή μορφολογίας του περιβάλλοντος. Η ποσοτική αποτίμηση (KPI1) στα σύνολα δεδομένων H36M και COCO καθώς και σε σύγκριση με διεθνή μοντέλα, κατέδειξε ότι η απόδοση της λύσης αποδίδει MPJPE, HDM, MSE εντός των αναμενόμενων ορίων. και σε γενικές γραμμές η λύση προσφέρει έναν μοναδικό συνδυασμό πλούσιων δυνατοτήτων κατανόησης σκηνής από οπτική πληροφορία χρησιμοποιώντας πολύ λίγους υπολογιστικούς πόρους συγκριτικά με την διεθνή βιβλιογραφία. Η ταχύτητα απόκρισης της λύσης (KPI2) είναι ικανοποιητική καθώς το σύστημα είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε πραγματικό χρόνο στις ερωτήσεις των χρηστών. Αντίστοιχα λόγω της διαδικτυακής αρχιτεκτονικής που επιλέξαμε καθίσταται εύκολη η προσθήκη παραπάνω από έναν διακομιστών για υποστήριξη μεγάλου αριθμού ερωτήσεων ενώ η ανάπτυξη εφαρμογών πελατών (KPI3) είναι αρκετά πρόσβαση, εύκολη και γρήγορη καθώς το μόνο που απαιτείται είναι η μεταγωγή των εικόνων και ερωτημάτων εισόδου στον διακομιστή και η αντιγραφή των αποτελεσμάτων. Η λύση μας αποκρύπτει όλη την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης και συντήρησης των ίδιων των νευρωνικών δίκτυα για την βιομηχανία και επιτρέπει την εστίαση στην εισαγωγή των αποτελεσμάτων στο πληροφοριακό σύστημα της εκάστοτε επιχείρησης και την κατάλληλη απεικόνιση των δεδομένων.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 76 Ενδεικτικά αποτελέσματα κατά την χρήση της λύσης στην πλατφόρμα <http://greece40.csd.uoc.gr> ερωτώντας το μοντέλο γλώσσας /όρασης στην Ελληνική γλώσσα “Περιέγραψε την σκηνή” απευθείας από τον φυλλομετρητή.

- Η ποιοτική αξιολόγηση σε πραγματικές ροές δεδομένων από βιομηχανικές κάμερες, όπως παρουσιάζεται στις εικόνες Εικόνα 71-Εικόνα 75, ανέδειξε την ιδιαίτερα ικανοποιητική ικανότητα της λύσης να:
- Παρακολουθεί ανθρώπους διαφορετικού σωματότυπου, φύλων και κινήσεων.
- Παράγει σταθερά και εύρωστα αποτελέσματα Α/Κ ακόμη και υπό μερική απόκρυψη άκρων.
- Εξάγει αξιόπιστους χάρτες σχετικού βάθους και κάθετων διανυσμάτων σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενη γεωμετρία και κινούμενα υποκείμενα και αντικείμενα.
- Πραγματοποιεί τμηματοποίηση με υψηλή συνέπεια σε ποικίλα αντικείμενα βιομηχανικού ενδιαφέροντος, ενώ παρέχει την δυνατότητα βελτίωσης του εντοπισμού με περαιτέρω εκπαίδευση σε συγκεκριμένα αντικείμενα μετά από συνεννόηση με κάποια επιχείρηση.
- Υποστηρίζει ερωτήσεις-απαντήσεις σε φυσική Ελληνική γλώσσα (Εικόνα 76).

Ως πιθανούς περιορισμούς σε σκηνές στις οποίες η λύση παύει να λειτουργεί διαπιστώσαμε ως προς την εξαγωγή αντίστροφης κινηματικής σκηνές με πολλούς ανθρώπους όπου ο σκελετός που επιλύεται με αυτόματη επιλογή μπορεί να μην είναι ο επιθυμητός (η αντίστροφη κινηματική ορίζεται για έναν άνθρωπο), πράγμα που μπορεί να λυθεί με κόψιμο της εικόνας γύρω από μια επιθυμητή περιοχή της εικόνας (πχ μια θέση εργασίας) ή όταν άνω το 40% του σώματος δεν είναι ορατό όπου και πάλι καθίσταται αδύνατο να οριστεί η αντίστροφη κινηματική λόγω της έλλειψης οπτικής πληροφορίας. Ως προς την εξαγωγή βάθους, κλάσης παρατηρούμε λιγότερο εύρωστο εντοπισμό όταν η εικόνα απομακρύνεται από τις κλάσεις του συνόλου δεδομένου COCO. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων αυτό όμως είναι κάτι το οποίο επιδέχεται εύκολης βελτίωσης καθώς μπορούμε να εκπαιδύσουμε το νευρωνικό δίκτυο που εκτελεί αυτές τις διεργασίες με αυτοματοποιημένο τρόπο και έτσι να βελτιώσουμε την απόδοση του σε εξειδικευμένες σκηνές.

Τέλος ως προς το μοντέλο γλώσσας/όρασης παρατηρούμε σαν κύριους περιορισμούς ότι ανάλογα με την διατύπωση υπάρχουν περιπτώσεις απαντήσεων που μπορεί να μην είναι γενικόλογες ή επαναλαμβανόμενες και γενικά όχι οι επιθυμητές. Σε αυτή την περίπτωση με την χρήση των ρυθμίσεων Πιθανότητας, “Θερμοκρασίας απάντησης” και ποινής επανάληψης καθώς και την επαναδιατύπωση της ερώτησης με όσο πιο σαφή και όσο το δυνατό λιγότερο διφορούμενο τρόπο είναι δυνατή ή καλύτερη λειτουργία του συγκεκριμένου μοντέλου. Τέλος λόγω της προσθήκης της Ελληνικής γλώσσας που πραγματοποιήσαμε μέσω της δυναμικής μετάφρασης ερωτήσεων και απαντήσεων παρατηρούμε ότι ορισμένες φράσεις μπορεί να “χαθούν στην μετάφραση” με αποτέλεσμα αλλοιωμένο νόημα που με την σειρά του μπορεί να φέρει διαφορετική απάντηση από την αναμενόμενη. Σε τέτοιες περιπτώσεις και ιδιαίτερα σε βιομηχανικά περιβάλλοντα με επαναλαμβανόμενες ερωτήσεις τέτοια προβλήματα μπορούν

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

να ξεπεραστούν με διατύπωση της ερώτησης στα αγγλικά που είναι η ιθαγενής γλώσσα του μοντέλου ή οποία επίσης βελτιώνει και την ταχύτητα απόκρισης (Πίνακας Υ4).

Η λειτουργική αξιολόγηση στον διακομιστή επίδειξης (<http://greece40.csd.uoc.gr>) του Πανεπιστημίου Κρήτης έδειξε ότι η λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από επιχειρήσεις χωρίς εγκατάσταση τοπικού εξοπλισμού, γεγονός που επιβεβαιώνει την ωριμότητα και την πρακτική χρησιμότητα της πλατφόρμας. Η συνεργασία με την εταιρία ErgoProlipsis ενίσχυσε περαιτέρω το συμπέρασμα ότι η λύση μπορεί να ενσωματωθεί σε πραγματικά περιβάλλοντα Υ&Α και βιομηχανικής παρακολούθησης, παρέχοντας έγκαιρη και αξιόπιστη πληροφόρηση για την ανθρώπινη δραστηριότητα και τη δυναμική της σκηνής. Συνολικά, όλα τα KPIs του Παραδοτέου 1.1 ικανοποιήθηκαν ή υπερκαλύφθηκαν, επιβεβαιώνοντας την τεχνολογική αρτιότητα, τη σταθερότητα και την εφαρμοσιμότητα της λύσης σε πραγματικές συνθήκες βιομηχανικού ενδιαφέροντος.

## 2.18. Έξυπνη, οπτική επιθεώρηση διαδικασιών και αξιολόγησης πρωτοκόλλων

Η Τεχνολογική Λύση 18 αναπτύχθηκε ως ολοκληρωμένη πλατφόρμα αναγνώρισης, ανάλυσης και αξιολόγησης αποκλίσεων κατά την εκτέλεση δραστηριοτήτων που υπόκεινται σε αυστηρά προκαθορισμένα πρωτόκολλα εκτέλεσης. Ενδεικτικά, η προτεινόμενη προσέγγιση εστιάζει σε βιομηχανικές διεργασίες συναρμολόγησης προϊόντων, όπου η τήρηση της σωστής ακολουθίας ενεργειών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα ποιότητας και αποδοτικότητας. Τα επιμέρους εργαλεία που ενσωματώθηκαν στη Λύση 18, όπως τεκμηριώνονται στα Παραδοτέα 2.2 και 3.1, αξιολογήθηκαν μέσω εκτεταμένων πειραματικών δοκιμών σε επιλεγμένα δημόσια και επικυρωμένα σύνολα δεδομένων, καθώς και σε νέο σύνολο δεδομένων που συλλέχθηκε και επισημάνθηκε σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον. Η διαμόρφωση των συνόλων δεδομένων πραγματοποιήθηκε με σκοπό την προσομοίωση ρεαλιστικών βιομηχανικών σεναρίων, εξασφαλίζοντας υψηλό βαθμό αντιπροσωπευτικότητας των πραγματικών συνθηκών παραγωγής.

Τέλος, για την τεχνολογική και βιομηχανική επικύρωση της λύσης από εξωτερικούς βιομηχανικούς εταίρους, το Πανεπιστήμιο Κρήτης ήρθε σε επαφή με βιομηχανικό εταίρο του οποίου το αντικείμενο δραστηριότητας εμπίπτει στην αξιοποίηση τεχνολογιών επιθεώρησης και βελτιστοποίησης διαδικασιών στον τομέα της παραγωγικής συναρμολόγησης προϊόντων. Συγκεκριμένα, προσεγγίστηκε η εταιρία [ErgoProlipsis](#), με έδρα το Ηράκλειο Κρήτης, η οποία προσφέρει κορυφαίας ποιότητας συμβουλευτικές υπηρεσίες διαχείρισης κινδύνων, επαγγελματικής Υγείας & Ασφάλειας (Y&A) και περιβάλλοντος σε βιομηχανίες. Το πλαίσιο δραστηριοτήτων της εταιρείας είναι απολύτως συναφές με την τεχνολογική φύση της αναπτυχθείσας λύσης, καθώς η πλατφόρμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου επιτρέπει την οπτική επιθεώρηση διαδικασιών παραγωγής μέσω αναγνώρισης δραστηριότητας και επιμέρους δράσεων (βημάτων), καθώς και την ανίχνευση αποκλίσεων ή σφαλμάτων από το προκαθορισμένο πρωτόκολλο εκτέλεσης. Η λειτουργικότητα αυτή καθιστά δυνατή την αυτόματη αξιολόγηση της ορθότητας εκτέλεσης εργασιακών διαδικασιών, με στόχο τη βελτίωση της εργονομίας, της αποδοτικότητας και της ασφάλειας των εργαζομένων στον χώρο παραγωγής.

### Σενάρια Ελέγχου και Αξιολόγησης

Σύμφωνα με το Παραδοτέο Π.3.2, τα σενάρια ελέγχου διαμορφώθηκαν με σκοπό την πειραματική αξιολόγηση της Τεχνολογικής Λύσης 18 ως προς: (α) την αναγνώριση δράσεων και δραστηριοτήτων στο πλαίσιο σύνθετων διαδικασιών, και (β) την ανίχνευση αποκλίσεων από προκαθορισμένα πρωτόκολλα εκτέλεσης. Η αξιολόγηση βασίστηκε στο σύνολο δεδομένων HA4M [1], το οποίο περιγράφει τη συναρμολόγηση πλανητικού συστήματος οδοντωτών τροχών. Όπως τεκμηριώθηκε στο Π.3.1, η διεργασία αυτή διαχωρίζεται σε τρία διακριτά στάδια, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε διαφορετική δραστηριότητα συναρμολόγησης με ανεξάρτητο σύνολο ενεργειών.

Δεδομένου ότι το HA4M δεν περιλαμβάνει σενάρια σφαλμάτων, δημιουργήθηκε συμπληρωματικό υποσύνολο δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει τρεις αντιπροσωπευτικές ακολουθίες: (1) ορθή εκτέλεση με διαφοροποίηση οπτικού αισθητήρα και θέσης λήψης, (2) λανθασμένη έναρξη σταδίου με ασύμφωνη δράση ως προς το πρωτόκολλο, και (3) *παράλειψη δράσης* στο δεύτερο και τρίτο στάδιο της διεργασίας συναρμολόγησης. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε τόσο ποσοτικά, με τη χρήση μετρικών όπως το *mean Accuracy, Precision, Recall* και *F1-score*, όσο και ποιοτικά, με τη χρήση οπτικοποιήσεων αποτελεσμάτων (παραδειγμάτων ορθής και εσφαλμένης ταξινόμησης). Η ποιοτική αξιολόγηση της ικανότητας ανίχνευσης σφαλμάτων εκτέλεσης πρωτοκόλλου διαδικασιών (δραστηριοτήτων) μέσω οπτικοποίησης έγινε με την χρήση των σχετικών μηχανισμών ανίχνευσης και απεικόνισης οι οποίοι έχουν ενσωματωθεί στην πλατφόρμα της λύσης. Η διαδικτυακή έκδοση της πλατφόρμας είναι διαθέσιμη στον ακόλουθο [σύνδεσμο](#).

### Έλεγχος Λειτουργίας και Επιβεβαίωση KPIs

Όπως αναφέρεται και στο Π.3.1, για την πιστοποίηση της λειτουργίας των μοντέλων έχουν οριστεί συγκεκριμένα σενάρια χρήσης, με στόχο την επαλήθευση δύο βασικών KPIs: (1) επίτευξη τουλάχιστον 50% μέσης ακρίβειας στην αναγνώριση δράσεων και δραστηριοτήτων, και (2) αξιολόγηση της ικανότητας εντοπισμού αποκλίσεων στην εκτέλεση των πρωτοκόλλων. Επιπρόσθετα, στο αποθετήριο διατίθενται και οι διαχωρισμοί των υποσυνόλων εκπαίδευσης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν για την ποσοτική

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου ως προς την ικανότητα αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων.

*Σενάριο 1: Ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης στο υποσύνολο ελέγχου του συνόλου δεδομένων HA4M.*

*Στόχος: Αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου.*

*Πίνακας 35 Αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου στο HA4M σετ δεδομένων.*

	Top 1/ Top 5 Accuracy	Precision	Recall	F1-score
<b>Αναγνώριση Δραστηριότητας</b>	93.73% / 100.0%	98.99%	87.55%	91.99%
<b>Αναγνώριση Ρήματος Δράσης</b>	91.15% / 100.0%	92.21%	90.49%	91.21%
<b>Αναγνώριση Ουσιαστικού Δράσης</b>	80.61% / 99.81%	82.86%	77.28%	79.54%

*Σενάριο 2: Ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση της απόδοσης σε βίντεο που συλλέχθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον (χώρος Πανεπιστημίου Κρήτης), σε διαφορετικές συνθήκες λήψης από εκείνες που υπήρχαν στα βίντεο των δεδομένων εκπαίδευσης. Στόχος: Αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου σε διαφορετικές συνθήκες λήψης βίντεο (παραβίαση πρωτοκόλλου τοποθέτησης των οπτικών αισθητήρων).*

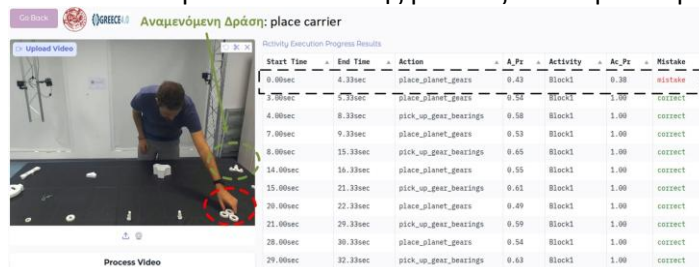
*Πίνακας 36 Αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου στο σύνολο δεδομένων με διαφορετικές προδιαγραφές τοποθέτησης των οπτικών αισθητήρων σε σχέση με εκείνες στα βίντεο εκπαίδευσης.*

	Top 1/ Top 5 Accuracy	Precision	Recall	F1-score
<b>Αναγνώριση Δραστηριότητας</b>	82.81% / 100.0%	84.60%	92.19%	89.69%
<b>Αναγνώριση Ρήματος Δράσης</b>	65.63% / 100.0%	62.94%	63.54%	62.50%
<b>Αναγνώριση Ουσιαστικού Δράσης</b>	55.69% / 95.31%	55.24%	55.73%	54.13%

*Σενάριο 3: Ποιοτική αξιολόγηση της απόδοσης σε βίντεο με λανθασμένη σειρά εκτέλεσης βημάτων σε ένα από τα στάδια της διαδικασίας.*

Η προσομοίωση του σεναρίου έγινε με την λήψη μιας λανθασμένης ακολουθίας για το στάδιο 1 (συναρμολόγηση του Block 1). Η ορθή σειρά εκτέλεσης βημάτων (δράσεων) για το συγκεκριμένο στάδιο {place carrier->pick up gear bearings (x3) -> place planet gears (x3) -> place carrier shaft }. Περισσότερες πληροφορίες καθώς και σχηματική απεικόνιση των σταδίων και των αντικειμένων που εμπλέκονται παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π.3.1. Για το σενάριο ελέγχου η σειρά τροποποιήθηκε για να έχει ως εκκίνηση την δράση place planet gears (πλανητικά γρανάζια) αντί της place carrier (βάσης), με τα επόμενα βήματα να εκτελούνται κανονικά.

Στην Εικόνα 77 παρουσιάζεται το οπτικό αποτέλεσμα που προσφέρει η πλατφόρμα για την ανίχνευση του σφάλματος που αποτυπώνεται στο συγκεκριμένο σενάριο. Η πλατφόρμα αξιοποιεί τις ενσωματωμένες ρουτίνες ανίχνευσης σφαλμάτων, οι οποίες χρησιμοποιούν ως είσοδο: α) την εκτίμηση της τρέχουσας δράσης και δραστηριότητας από το υποσύστημα αναγνώρισης δράσεων και δραστηριοτήτων, και β) το γράφημα του πρωτοκόλλου εκτέλεσης της συγκεκριμένης δραστηριότητας, όπως αυτός έχει εξαχθεί από τα δεδομένα εκπαίδευσης μέσω εξειδικευμένων ρουτινών ανάλυσης.



Start Time	End Time	Action	A_Pr	Activity	Ac_Pr	Mistake
0.00sec	4.33sec	place_planet_gears	0.43	Block1	0.38	mistake
4.33sec	5.33sec	place_planet_gears	0.58	Block1	1.00	correct
4.00sec	8.33sec	pick_up_gear_bearings	0.58	Block1	1.00	correct
7.00sec	9.33sec	place_planet_gears	0.53	Block1	1.00	correct
8.00sec	15.33sec	pick_up_gear_bearings	0.65	Block1	1.00	correct
14.00sec	16.33sec	place_planet_gears	0.55	Block1	1.00	correct
15.00sec	21.33sec	pick_up_gear_bearings	0.61	Block1	1.00	correct
20.00sec	22.33sec	place_planet_gears	0.49	Block1	1.00	correct
21.00sec	29.33sec	pick_up_gear_bearings	0.59	Block1	1.00	correct
28.00sec	30.33sec	place_planet_gears	0.54	Block1	1.00	correct
29.00sec	32.33sec	pick_up_gear_bearings	0.63	Block1	1.00	correct

Εικόνα 77 Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος λανθασμένης σειράς εκτέλεσης κατά την εκτέλεση των βημάτων (δράσεων) της δραστηριότητας Block 1.

*Σενάριο 4: Ποιοτική αξιολόγηση της απόδοσης σε βίντεο με παράλειψη εκτέλεσης βήματος σε ένα από τα στάδια της διαδικασίας.*

Η προσομοίωση του σεναρίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο σκόπιμα λανθασμένων ακολουθιών εκτέλεσης: (α) για το **Στάδιο 2 (Block 2)** και (β) για το **Στάδιο 3**, που αφορά την **τελική συναρμολόγηση του πλανητικού συστήματος (EGT)**.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

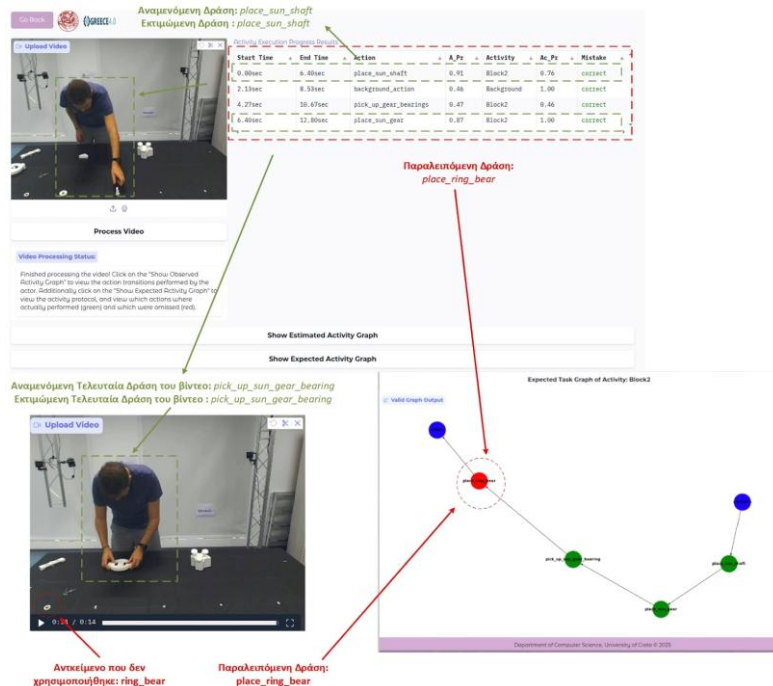
Στην Εικόνα 78 και στην Εικόνα 79 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως απεικονίζονται από την πλατφόρμα της προτεινόμενης λύσης, για κάθε σενάριο εκτέλεσης. Και στις δύο εικόνες, οι δράσεις που έχουν παραλειφθεί απεικονίζονται στο γράφημα με κόμβους κόκκινου χρώματος, ενώ οι δράσεις που έχουν εκτελεστεί ορθά με πράσινο. Όπως έχει αναφερθεί στο παραδοτέο Π.2.2, η πλατφόρμα της λύσης υποστηρίζει δύο διακριτούς μηχανισμούς οπτικοποίησης σφαλμάτων:

1. **Μηχανισμός παραβίασης πρωτοκόλλου εκτέλεσης:** επισημαίνει το επόμενο βήμα (δράση) ως λανθασμένο όταν ανιχνεύεται απόκλιση από τις επιτρεπόμενες μεταβάσεις του γράφου δραστηριοτήτων.
2. **Μηχανισμός σύγκρισης γράφων εκτέλεσης:** υπολογίζει και απεικονίζει τη διαφορά μεταξύ του εκτιμώμενου γράφου εκτέλεσης και του αναμενόμενου γράφου αναφοράς, αποτυπώνοντας αποκλίσεις σε επίπεδο παρουσίας ή απουσίας δράσεων.

Η προσθήκη του διπλού αυτού μηχανισμού κρίθηκε απαραίτητη, καθώς η εκδήλωση συγκεκριμένων τύπων σφαλμάτων (όπως παραλείψεις δράσεων) δεν εντοπίζεται επαρκώς από τον πρώτο μηχανισμό. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση παραλείψεων, οι μεταβάσεις μεταξύ των ανιχνευμένων δράσεων ενδέχεται να παραμένουν συμβατές με το πρωτόκολλο, με αποτέλεσμα η απόκλιση να μην εμφανίζεται ως σφάλμα. Αντιθέτως, ο δεύτερος μηχανισμός, μέσω της σύγκρισης του εκτελεσμένου γράφου με τον αναμενόμενο, εντοπίζει ορθά τη μη ολοκλήρωση της δραστηριότητας λόγω της απουσίας της τελικής δράσης. Η ύπαρξη του δεύτερου μηχανισμού απεικόνισης είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις όπου έχει παραλειφθεί το τελευταίο βήμα εκτέλεσης, όπως στο παρόν σενάριο ελέγχου. Οι ακολουθίες των περιπτώσεων του σεναρίου είναι οι εξής:

- **Στάδιο 2 - Block 2:** Η ορθή σειρά εκτέλεσης βημάτων (δράσεων) για το συγκεκριμένο στάδιο είναι η εξής: {place sun shaft -> place sun gear -> pick up sun gear bearing -> place ring bear}. Για το σενάριο ελέγχου η σειρά τροποποιήθηκε ανάλογα έτσι ώστε να μην γίνει εκτέλεση του βήματος place ring bear.
- **Στάδιο 3 - EGT:** Η ορθή σειρά εκτέλεσης βημάτων (δράσεων) για το συγκεκριμένο στάδιο είναι η εξής: {place block 2 onto block 1 -> place cover -> place screws-> pick and return Allen key}. Για το σενάριο ελέγχου η σειρά τροποποιήθηκε αναλόγως ώστε να παραλειφθεί το βήμα pick and return Allen key.

Περισσότερες πληροφορίες καθώς και σχηματική απεικόνιση των σταδίων και των αντικειμένων που εμπλέκονται παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π.3.1.



Εικόνα 78 Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος υπο την μορφή παράλειψης εκτέλεσης κατά την εκτέλεση των βημάτων (δράσεων) της δραστηριότητας Block 2.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον



Εικόνα 79 Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος υπο την μορφή παράλειψης εκτέλεσης κατά την εκτέλεση των βημάτων (δράσεων) της δραστηριότητας EGT.

### Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

#### Πιλοτική Εφαρμογή σε Εργαστηριακές Συνθήκες

Η πειραματική ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης της λύσης στο HA4M (Human Assembly 4 Manufacturing) dataset κάλυψε δύο διαμορφώσεις του περιβάλλοντος δοκιμών, (α) τήρηση των προδιαγραφών τοποθέτησης αισθητήρα όπως αυτές καθορίστηκαν κατά το στάδιο εκπαίδευσης του μοντέλου, και β. διαφοροποίηση τους με σκοπό την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας και γενίκευσης της λύσης σε συνθήκες μεταβλητής διάταξης λήψης. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε τρία ιεραρχικά επίπεδα αναγνώρισης: (α) δραστηριότητας, (β) ρήματος δράσης, και (γ) ουσιαστικού δράσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στους παραπάνω πίνακες (Πίνακας 35, Πίνακας 36).

Στην περίπτωση διατήρησης των προδιαγραφών τοποθέτησης του αισθητήρα (Πίνακας 35), τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την υψηλή ικανότητα του μοντέλου να αναγνωρίζει με ακρίβεια τη συνολική δραστηριότητα καθώς και τις επιμέρους δράσεις που την απαρτίζουν. Η σχεδόν τέλεια Top-5 Accuracy στο επίπεδο δραστηριότητας (100.0%) και ρήματος δράσης (100.0%) υποδηλώνει ότι το μοντέλο έχει μάθει αποτελεσματικά τη δομική και χρονική ακολουθία της διαδικασίας συναρμολόγησης. Παράλληλα, οι τιμές των Precision, Recall και F1-score ενισχύουν την παραπάνω εκτίμηση, καθώς το μοντέλο επιτυγχάνει υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης (Precision) και ικανοποιητική πληρότητα εντοπισμού (Recall), με αποτέλεσμα F1-score άνω του 90% στα δύο πρώτα επίπεδα αναγνώρισης. Αυτό υποδηλώνει ισορροπημένη συμπεριφορά του συστήματος, χωρίς σημαντική μεροληψία προς υπερ- ή υπο-ανίχνευση δράσεων. Η ελαφρώς μειωμένη απόδοση στο επίπεδο ουσιαστικού δράσης (Precision: 82.86%, Recall: 77.28%, F1-score: 79.54%) αντικατοπτρίζει τη φυσική δυσκολία διάκρισης αντικειμένων με παρόμοια οπτικά ή λειτουργικά χαρακτηριστικά, ιδίως σε περιπτώσεις αλληλεπικαλυπτόμενων ή μερικώς ορατών εξαρτημάτων/μερών του μηχανισμού. Παρόλα αυτά, οι τιμές αυτές εξακολουθούν να υπερβαίνουν σημαντικά το ελάχιστο KPI του 50%, επιβεβαιώνοντας τη συνέπεια και σταθερότητα της αναγνώρισης σε πραγματικές συνθήκες συναρμολόγησης. Η απόδοση της λύσης υπερκαλύπτει τον ορισμένο KPI, επιβεβαιώνοντας την τεχνολογική εγκυρότητα και ωριμότητα της προσέγγισης στο πλαίσιο ελεγχόμενων συνθηκών τοποθέτησης του αισθητήρα.

### Π3.2 - Δοκιμή, έλεγχος και αξιολόγηση των λύσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον

Ως προς την περίπτωση παραβίασης των προδιαγραφών τοποθέτησης το μοντέλο επιδεικνύει καλή απόδοση ακόμη και όταν δεν τηρούνται οι ιδανικές προδιαγραφές τοποθέτησης του αισθητήρα. Συγκεκριμένα, στο επίπεδο αναγνώρισης δραστηριότητας, οι επιδόσεις παραμένουν σε σχετικά υψηλά επίπεδα (Top-1 Accuracy: 82.81%, F1: 89.69%), γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο διατηρεί μια σφαιρική κατανόηση της γενικής δομής της διαδικασίας, ακόμη και υπό συνθήκες μη βέλτιστης τοποθέτησης. Αναφορικά με την απόδοση σε επίπεδο αναγνώρισης ρήματος και ουσιαστικού τα οποία συνθέτουν την δράση, στην συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται μια μείωση της απόδοσης του μοντέλου. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη, καθώς η αλλαγή γωνίας λήψης αφενός οδηγεί στη μερική απόκρυψη του σώματος ή των άκρων μειώνει την καθαρότητα των χωροχρονικών ενδείξεων που χρησιμοποιεί το μοντέλο για να εντοπίσει το σωστό μοτίβο κίνησης (ρήμα), και αφετέρου τα οπτικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων (σχήμα και προσανατολισμός) παραμορφώνονται ή αποκρύπτονται σε σχέση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά που είχε μάθει ότι αντιστοιχούν στα εκάστοτε αντικείμενα το μοντέλο κατά την εκπαίδευση, οδηγώντας σε λανθασμένες ή ασαφείς προβλέψεις. Παρά την πτώση της απόδοσης στην περίπτωση μη τήρησης των προδιαγραφών, το μοντέλο παραμένει αξιόπιστο, με το F1-score να παραμένει άνω του 60% σε όλες τις κατηγορίες και με ικανοποιητική γενίκευση σε συνθήκες διαφοροποιημένης τοποθέτησης του αισθητήρα. Η συγκεκριμένη πειραματική αποτίμηση ανέδειξε την ανθεκτικότητα του μοντέλου και την ικανότητά του να λειτουργεί υπό συνθήκες πραγματικής παραγωγής, όπου οι συνθήκες τοποθέτησης μπορεί να μην είναι πάντα ιδανικές. Συνολικά, τα αποτελέσματα της πειραματικής αξιολόγησης ανέδειξαν πως η απόδοση του μοντέλου είναι αξιόπιστη τόσο σε ελεγχόμενα όσο και σε δυναμικά, μη τυποποιημένα περιβάλλοντα.

Τέλος, αναφορικά με την ικανότητα των μηχανισμών της προτεινόμενης λύσης για την ανίχνευση αποκλίσεων από το πρωτόκολλο εκτέλεσης της εκάστοτε διαδικασίας (δραστηριότητας), τα αποτελέσματα των σεναρίων ελέγχου που παρουσιάζονται στις Εικόνα 78 και Εικόνα 79 καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος στην αναγνώριση και επισήμανση σφαλμάτων εκτέλεσης. Συγκεκριμένα, η πλατφόρμα εντοπίζει παραλείψεις δράσεων (μη εκτέλεση απαιτούμενων βημάτων) καθώς και παραβιάσεις της προβλεπόμενης ακολουθίας ενεργειών, παρέχοντας οπτική και γραφική αναπαράσταση των αποκλίσεων τόσο στο επίπεδο της ροής δράσεων όσο και στο επίπεδο του γράφου δραστηριότητας. Όπως φαίνεται ενδεικτικά στην Εικόνα 79, το σύστημα αναγνωρίζει και επισημαίνει τη μη εκτέλεση της δράσης *place\_ring\_bear*, ενός κρίσιμου βήματος της συναρμολόγησης, καθώς και την απόκλιση στη σειρά εκτέλεσης που προκύπτει από την πρόωρη μετάβαση στην επόμενη ενέργεια. Η διπλή απεικόνιση (μέσω γραφικού περιβάλλοντος και αναπαράστασης γράφου) καθιστά το αποτέλεσμα ερμηνεύσιμο και τεχνικά επαληθεύσιμο, επιβεβαιώνοντας ότι ο μηχανισμός ανίχνευσης σφαλμάτων λειτουργεί με συνέπεια και ακρίβεια υπό ρεαλιστικές συνθήκες εκτέλεσης.

#### *Αξιολόγηση από τον Βιομηχανικό Εταίρο*

Η συνεργασία με τον βιομηχανικό εταίρο επικεντρώθηκε στην τεχνολογική και βιομηχανική επικύρωση της λύσης, με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργικότητας, της επεκτασιμότητας και της επιχειρησιακής συνάφειας της πλατφόρμας. Ο εταίρος επισήμανε αρχικά πως η λύση παρουσιάζει ιδιαίτερα θετικές προοπτικές για εφαρμογή σε βιομηχανικούς κλάδους που επιδιώκουν αυτοματοποιημένη επιθεώρηση διαδικασιών, ανάλυση εργονομίας και βελτιστοποίηση παραγωγικών ακολουθιών. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η επιτυχής ενσωμάτωση της λύσης σε πραγματικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα θα απαιτήσει προσαρμογή των επιμέρους μονάδων (π.χ. διεπαφής, μοντέλου αναγνώρισης ή προδιαγραφές τοποθέτησης αισθητήρων καταγραφής βίντεο) ώστε να ευθυγραμμίζονται με τα πρότυπα λειτουργίας, τις διαδικασίες ασφάλειας και τις τεχνικές προδιαγραφές κάθε βιομηχανίας. Σύμφωνα με την αξιολόγηση του εταίρου η προσφερόμενη λύση βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, παρουσιάζοντας ικανοποιητική λειτουργικότητα και σταθερότητα. Με περαιτέρω βελτιστοποιήσεις και παραμετροποίηση, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε πιλοτικές εφαρμογές εντός επιλεγμένων επιχειρησιακών περιβαλλόντων.