

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και υλοποίηση ψηφιακού διδύμου για σύστημα παρακολούθησης και ανάλυσης λειτουργικών δεδομένων»



113708

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ

Επιβλέπων

Τσιακμάκης Κυριάκος

ΙΟΥΝΙΟΣ 2026

Σχεδίαση και υλοποίηση ψηφιακού διδύμου για σύστημα παρακολούθησης και ανάλυσης
λειτουργικών δεδομένων

Κωδικός: **26223**

Φοιτητής: Αλέξανδρος Βασιλικής

Εισηγητής: Τσιακμάκης Κυριάκος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 26-03-2026

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 30-05-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Αλέξανδρου Βασιλική που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη της έννοιας των ψηφιακών διδύμων και τη σχεδίαση ενός λογισμικού συστήματος παρακολούθησης, το οποίο αναπαριστά ψηφιακά τη λειτουργία ενός τεχνικού συστήματος ή μιας εγκατάστασης. Στόχος είναι η συλλογή, αποθήκευση, οπτικοποίηση και ανάλυση δεδομένων λειτουργίας, ώστε να παρέχεται στον χρήστη μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του συστήματος, καθώς και δυνατότητα εντοπισμού αποκλίσεων ή ανωμαλιών. Η εργασία συνδυάζει θεωρητική προσέγγιση και πρακτική ανάπτυξη, παρουσιάζοντας τις βασικές αρχές των ψηφιακών διδύμων, τη διαφορά τους από απλές ψηφιακές αναπαραστάσεις, τα βασικά αρχιτεκτονικά τους στοιχεία και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές παρακολούθησης τεχνικών συστημάτων. Επίσης, φτιάξαμε ένα λογισμικό περιβάλλον που υποστηρίζει την καταχώριση δεδομένων, τη διαχείριση μετρήσεων, την παρουσίαση γραφημάτων και την εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων για τη λειτουργική κατάσταση ενός συστήματος.

«Design and implementation of a digital twin for a system for monitoring and analysis of operational data»

Abstract

This thesis studies the concept of digital twins and the design of a software monitoring system that digitally represents the operation of a technical system or installation. The main objective is to collect, store, visualize and analyze operational data in order to provide the user with a complete view of the system status and support the detection of deviations or anomalies. The thesis combines theoretical analysis and practical software design, focusing on the main principles, architecture and components of digital twins, as well as on their use in monitoring, visualization and anomaly detection scenarios.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου για την καθοδήγηση, τις παρατηρήσεις και τη γενικότερη υποστήριξη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	5
Ευχαριστίες.....	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων	9
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	11
1.1 Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας	11
1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας	13
1.3 Αναγκαιότητα παρακολούθησης τεχνικών συστημάτων.....	13
1.4 Συμβολή της εργασίας	14
1.5 Δομή της πτυχιακής εργασίας	15
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο ψηφιακών διδύμων	16
2.1 Η έννοια του ψηφιακού διδύμου	16
2.2 Διαφορά ψηφιακού μοντέλου, ψηφιακής σκιάς και ψηφιακού διδύμου.....	17
2.3 Βασικά χαρακτηριστικά ψηφιακών διδύμων	19
2.4 Κύκλος ζωής ενός ψηφιακού διδύμου.....	21
2.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί.....	22
Κεφάλαιο 3ο: Εφαρμογές ψηφιακών διδύμων.....	24
3.2 Ψηφιακά δίδυμα σε έξυπνα κτίρια και εγκαταστάσεις.....	26
3.3 Ψηφιακά δίδυμα σε IoT συστήματα.....	27
3.4 Ψηφιακά δίδυμα στη συντήρηση και πρόβλεψη βλαβών	27
3.5 Παραδείγματα εφαρμογών σε διαφορετικούς τομείς	28
Κεφάλαιο 4ο: Αρχιτεκτονική συστήματος παρακολούθησης	30
4.1 Γενική περιγραφή του προτεινόμενου συστήματος.....	32
4.2 Πηγές δεδομένων και λειτουργικές παράμετροι.....	32
4.3 Ροή δεδομένων από το φυσικό στο ψηφιακό σύστημα	33
4.4 Βάση δεδομένων και αποθήκευση μετρήσεων.....	36
4.5 Διασύνδεση χρήστη και συστήματος	37
4.6 Αρχές επεκτασιμότητας και ασφάλειας	37
Κεφάλαιο 5ο: Σχεδίαση του λογισμικού συστήματος.....	38

5.1 Απαιτήσεις συστήματος.....	38
5.2 Ρόλοι χρηστών και λειτουργίες.....	40
5.3 Σχεδίαση βάσης δεδομένων	41
5.5 Τεχνολογίες υλοποίησης.....	42
Κεφάλαιο 6ο: Υλοποίηση του ψηφιακού διδύμου	43
6.1 Περιβάλλον και τεχνολογίες υλοποίησης.....	43
6.3 Εισαγωγή, αποθήκευση και ενημέρωση δεδομένων	44
6.5 Υλοποίηση μηχανισμού εντοπισμού αποκλίσεων.....	45
6.6 Δοκιμαστική λειτουργία και έλεγχος υλοποίησης.....	47
Κεφάλαιο 7ο: Ανάλυση δεδομένων και αξιολόγηση λειτουργίας.....	48
7.1 Περιγραφή και οργάνωση των δεδομένων λειτουργίας.....	48
7.2 Προεπεξεργασία και καθαρισμός δεδομένων.....	49
7.3 Βασική στατιστική ανάλυση	50
7.4 Καθορισμός ορίων κανονικής λειτουργίας.....	51
7.5 Εντοπισμός ασυνήθιστων τιμών και ανωμαλιών	53
7.6 Αξιολόγηση λειτουργίας του συστήματος.....	53
Κεφάλαιο 8ο: Πειραματική χρήση και παρουσίαση αποτελεσμάτων	55
8.1 Σκοπός της πειραματικής χρήσης.....	55
8.2 Περιγραφή του σεναρίου δοκιμής.....	56
8.3 Δεδομένα εισόδου και τρόπος δημιουργίας τους	56
8.4 Εκτέλεση σεναρίων δοκιμής	57
8.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στον πίνακα ελέγχου.....	58
8.6 Αποτελέσματα εντοπισμού αποκλίσεων	59
Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις.....	62
9.1 Συνοπτική αποτίμηση της εργασίας	62
9.5 Μελλοντικές επεκτάσεις	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	66
Παράρτημα Α: Δομή βάσης δεδομένων.....	66
Παράρτημα Β: Ενδεικτικό API εισαγωγής μέτρησης	66
Παράρτημα Γ: Ενδεικτικός έλεγχος αποκλίσεων σε Python.....	67
Παράρτημα Δ: Ενδεικτική οπτικοποίηση με Chart.js	68

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1. Γενική αρχιτεκτονική προτεινόμενου ψηφιακού διδύμου.....	12
Εικόνα 2.1. Διάκριση ψηφιακού μοντέλου, ψηφιακής σκιάς και ψηφιακού διδύμου.....	18
Εικόνα 2.2. Βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος ψηφιακού διδύμου	20
Εικόνα 2.3. Κύκλος ζωής ενός ψηφιακού διδύμου	22
Εικόνα 3.1. Ενδεικτικά πεδία εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων	24
Εικόνα 3.2. Παράδειγμα ψηφιακού διδύμου για έξυπνη εγκατάσταση	26
Εικόνα 3.3. Ροή προγνωστικής συντήρησης με χρήση ψηφιακού διδύμου	28
Εικόνα 4.1. Γενική αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος ψηφιακού διδύμου	31
Εικόνα 4.2. Ροή δεδομένων από τη μέτρηση έως την ένδειξη κατάστασης	35
Εικόνα 4.3. Ενδεικτική λογική οργάνωση βάσης δεδομένων για το ψηφιακό δίδυμο.....	36
Εικόνα 5.1. Λογική σχεδίαση λογισμικού συστήματος ψηφιακού διδύμου	38
Εικόνα 5.2. Ενδεικτικό μοντέλο οντοτήτων της εφαρμογής	41
Εικόνα 6.1. Επίπεδα υλοποίησης λογισμικού ψηφιακού διδύμου	43
Εικόνα 6.2. Ροή υλοποίησης από τη μέτρηση έως την ειδοποίηση	45
Εικόνα 6.3. Λογική εντοπισμού αποκλίσεων	46
Εικόνα 7.1. Βασική ροή ανάλυσης δεδομένων λειτουργίας.....	48
Εικόνα 7.2. Παράδειγμα χρονικής σειράς με περιοχή κανονικής λειτουργίας	52
Εικόνα 7.3. Κύκλος αξιολόγησης και βελτίωσης του ψηφιακού διδύμου	54
Εικόνα 8.1. Σενάριο πειραματικής λειτουργίας του ψηφιακού διδύμου.....	55
Εικόνα 8.2. Ακολουθία εκτέλεσης των δοκιμών	57
Εικόνα 8.3. Μορφή πίνακα ελέγχου ψηφιακού διδύμου	59
Εικόνα 8.4. Συνοπτική απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμών	60

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Βασικοί στόχοι της πτυχιακής εργασίας	13
Πίνακας 1.2. Ενδεικτικές λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος	14
Πίνακας 2.1. Βασικά στοιχεία ενός ψηφιακού διδύμου	17
Πίνακας 2.2. Σύγκριση ψηφιακού μοντέλου, ψηφιακής σκιάς και ψηφιακού διδύμου	18
Πίνακας 2.3. Χαρακτηριστικά που πρέπει να υποστηρίζει ένα ψηφιακό δίδυμο	20
Πίνακας 2.4. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των ψηφιακών διδύμων	23
Πίνακας 3.1. Ενδεικτικές βιομηχανικές χρήσεις ψηφιακού διδύμου.....	25
Πίνακας 3.2. Σύνδεση IoT στοιχείων με λειτουργίες ψηφιακού διδύμου.....	27
Πίνακας 3.3. Συγκριτική παρουσίαση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων	29
Πίνακας 4.1. Βασικά μέρη του συστήματος και λειτουργικός ρόλος τους.....	32
Πίνακας 4.2. Ενδεικτικές λειτουργικές παράμετροι που μπορεί να παρακολουθεί το σύστημα	33
Πίνακας 4.3. Στάδια ροής δεδομένων στο προτεινόμενο σύστημα	34

Πίνακας 5.1. Βασικές λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος	39
Πίνακας 5.2. Μη λειτουργικές απαιτήσεις και σημασία τους για το ψηφιακό δίδυμο	39
Πίνακας 5.3. Ρόλοι χρηστών και βασικές λειτουργίες	40
Πίνακας 5.4. Ενδεικτικοί πίνακες βάσης δεδομένων και βασικά πεδία	42
Πίνακας 6.1. Τεχνολογίες που αξιοποιούνται στην υλοποίηση του συστήματος	44
Πίνακας 6.2. Ενδεικτική δομή εγγραφής μέτρησης	45
Πίνακας 6.3. Κατηγορίες κατάστασης και αντίστοιχες ενέργειες	46
Πίνακας 6.4. Ενδεικτικά σενάρια ελέγχου της υλοποίησης	47
Πίνακας 7.1. Ενδεικτικές κατηγορίες δεδομένων λειτουργίας.....	49
Πίνακας 7.2. Βασικά προβλήματα δεδομένων και τρόποι αντιμετώπισης	50
Πίνακας 7.3. Βασικοί στατιστικοί δείκτες και ερμηνεία τους.....	51
Πίνακας 7.4. Τρόποι καθορισμού ορίων λειτουργίας.....	52
Πίνακας 7.5. Ενδεικτικοί κανόνες εντοπισμού ανωμαλιών.....	53
Πίνακας 8.1. Παράμετροι του πειραματικού σεναρίου	56
Πίνακας 8.2. Σενάρια δοκιμής και αναμενόμενη συμπεριφορά	58
Πίνακας 8.3. Συνοπτικά αποτελέσματα δοκιμών εντοπισμού αποκλίσεων	60

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Τα σύγχρονα τεχνικά συστήματα είτε πρόκειται για βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ενεργειακές υποδομές, εργαστηριακές διατάξεις, συστήματα αυτοματισμού ή εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων, παράγουν συνεχώς δεδομένα που σχετίζονται με την κατάστασή τους και τη λειτουργία τους. Οι μετρήσεις αυτές μπορεί να αφορούν θερμοκρασία, πίεση, στάθμη, ταχύτητα, κατανάλωση ενέργειας, κατάσταση εξοπλισμού, σφάλματα, χρόνους λειτουργίας ή άλλα μεγέθη που περιγράφουν την πραγματική συμπεριφορά ενός συστήματος. Η απλή καταγραφή των δεδομένων δεν είναι πλέον αρκετή. Απαιτείται η οργανωμένη συλλογή, η ασφαλής αποθήκευση, η εύκολη οπτικοποίηση και η βασική ανάλυσή τους, ώστε ο χρήστης να μπορεί να κατανοεί τι συμβαίνει και να εντοπίζει έγκαιρα πιθανές αποκλίσεις.

Έτσι η έννοια του ψηφιακού διδύμου αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Ένα ψηφιακό δίδυμο δεν είναι απλώς μια στατική απεικόνιση ενός συστήματος αλλά μια δυναμική ψηφιακή αναπαράσταση που ενημερώνεται με δεδομένα από το φυσικό σύστημα. Μέσα από αυτήν την αναπαράσταση, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, να συγκρίνει τις πραγματικές τιμές με αναμενόμενα όρια, να εντοπίζει ασυνήθιστες συμπεριφορές και να λαμβάνει καλύτερες αποφάσεις για τη λειτουργία ή τη συντήρηση της εγκατάστασης.

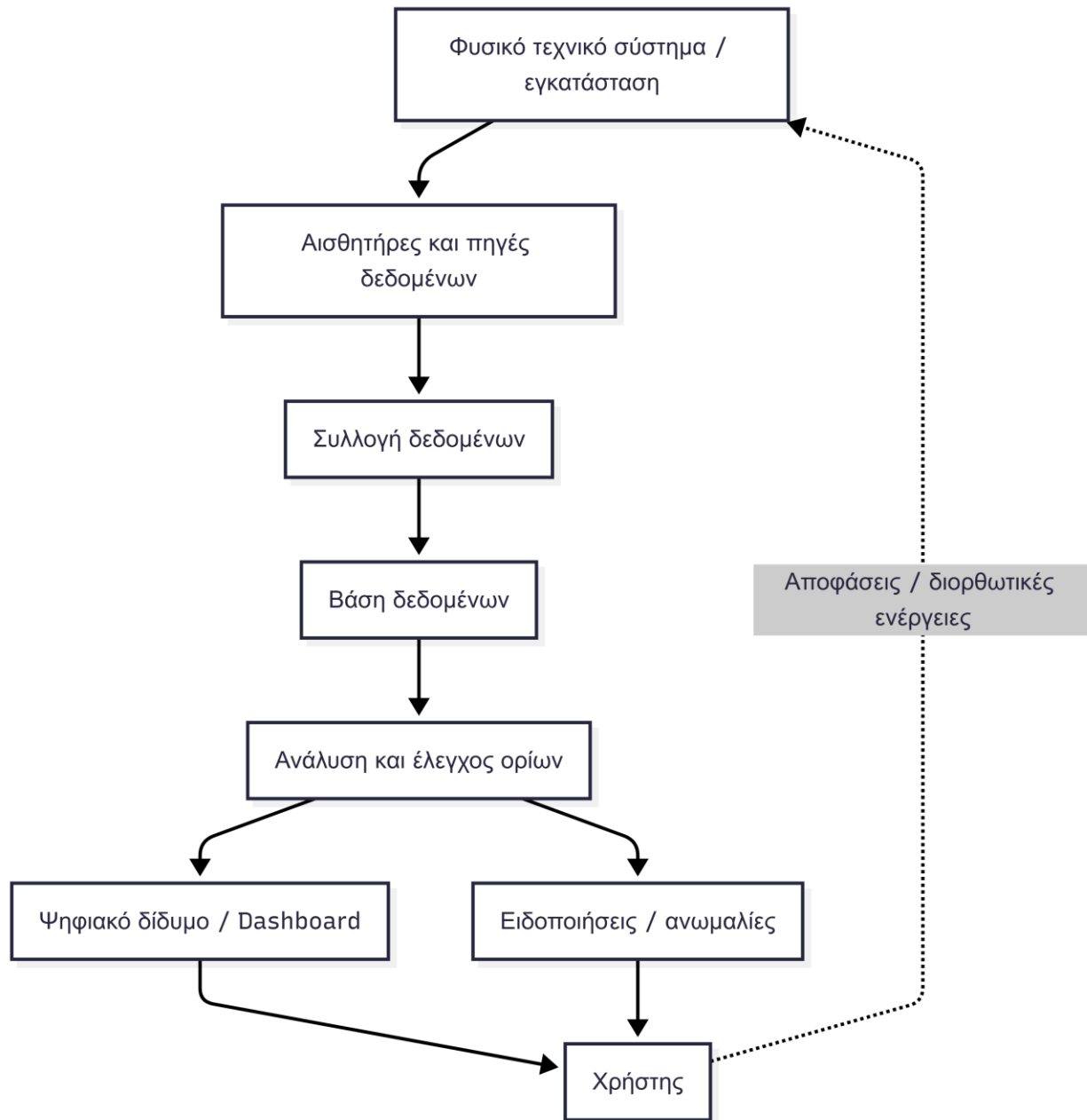
Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως βασικό αντικείμενο τη μελέτη της έννοιας των ψηφιακών διδύμων και την ανάπτυξη ενός λογισμικού συστήματος παρακολούθησης λειτουργικών δεδομένων. Το σύστημα που προτείνεται δεν περιορίζεται σε μία συγκεκριμένη κατηγορία εγκατάστασης, αλλά σχεδιάζεται με τρόπο γενικό, ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές περιπτώσεις τεχνικών συστημάτων. Η έμφαση δίνεται στη λογική της αρχιτεκτονικής, στη ροή των δεδομένων, στην παρουσίαση των μετρήσεων και στην υποστήριξη βασικών μηχανισμών εντοπισμού ανωμαλιών.

1.1 Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η σχεδίαση και υλοποίηση ενός ψηφιακού διδύμου για σύστημα παρακολούθησης και ανάλυσης λειτουργικών δεδομένων. Με τον όρο «ψηφιακό δίδυμο» στην παρούσα εργασία εννοείται ένα λογισμικό περιβάλλον το οποίο δέχεται δεδομένα από ένα φυσικό ή προσομοιωμένο σύστημα, τα οργανώνει σε κατάλληλη βάση δεδομένων, τα εμφανίζει στον χρήστη με κατανοητό τρόπο και υποστηρίζει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.

Το φυσικό σύστημα μπορεί να είναι μια εγκατάσταση, μια μηχανή, ένας χώρος με αισθητήρες, μια παραγωγική διαδικασία ή ακόμη και μια προσομοιωμένη διάταξη που παράγει δεδομένα. Η εργασία δεν εστιάζει στην κατασκευή του φυσικού εξοπλισμού, αλλά στο λογισμικό μέρος που αναλαμβάνει να μετατρέψει τα δεδομένα λειτουργίας σε χρήσιμη πληροφορία. Με τον τρόπο αυτό, το ψηφιακό δίδυμο λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στον πραγματικό κόσμο και στο πληροφοριακό σύστημα.

Η λογική του συστήματος μπορεί να συνοψιστεί σε τέσσερα βασικά βήματα. Αρχικά, πραγματοποιείται συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, συσκευές, αρχεία ή υπηρεσίες. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αποθηκεύονται με οργανωμένο τρόπο ώστε να μπορούν να αναζητηθούν και να αναλυθούν. Έπειτα, παρουσιάζονται στον χρήστη μέσω πινάκων, γραφημάτων και ενδείξεων κατάσταση. Τέλος, εφαρμόζονται βασικοί κανόνες ή μέθοδοι ανάλυσης για τον εντοπισμό τιμών που αποκλίνουν από τα φυσιολογικά όρια.



Εικόνα 1.1. Γενική αρχιτεκτονική προτεινόμενου ψηφιακού δίδυμου

Η Εικόνα 1.1. παρουσιάζει τη βασική ιδέα της εργασίας: το φυσικό σύστημα παράγει δεδομένα, το λογισμικό τα συλλέγει και τα αποθηκεύει, ενώ ο χρήστης λαμβάνει μια συνοπτική και κατανοητή εικόνα της κατάστασης λειτουργίας. Η ύπαρξη ανάδρασης δείχνει ότι η πληροφορία που προκύπτει μπορεί να αξιοποιηθεί για αποφάσεις ή διορθωτικές ενέργειες.

1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου παραδείγματος ψηφιακού διδύμου, το οποίο θα δείχνει πώς ένα τεχνικό σύστημα μπορεί να παρακολουθείται ψηφιακά μέσα από ένα λογισμικό περιβάλλον. Η εργασία αποσκοπεί στο να αναδείξει ότι τα δεδομένα λειτουργίας αποκτούν πραγματική αξία μόνο όταν συνδυάζονται με κατάλληλη οργάνωση, παρουσίαση και ανάλυση.

Ένας σημαντικός στόχος είναι η κατανόηση της θεωρητικής βάσης των ψηφιακών διδύμων. Πριν από την υλοποίηση του λογισμικού, είναι απαραίτητο να παρουσιαστεί τι είναι ένα ψηφιακό δίδυμο, σε τι διαφέρει από ένα απλό ψηφιακό μοντέλο και ποιες δυνατότητες μπορεί να προσφέρει σε εφαρμογές παρακολούθησης. Παράλληλα, στόχος είναι η πρακτική σχεδίαση ενός συστήματος που μπορεί να δεχθεί δεδομένα, να τα αποθηκεύσει και να τα εμφανίσει με κατανοητό τρόπο.

Η διεπαφή χρήστη πρέπει να είναι απλή, ώστε ακόμη και ένας μη εξειδικευμένος χρήστης να μπορεί να καταλάβει αν το σύστημα λειτουργεί κανονικά ή αν υπάρχει κάποια ένδειξη προβλήματος. Για τον λόγο αυτό, η εργασία δίνει έμφαση σε γραφήματα, πίνακες, ενδείξεις κατάστασης και βασικά μηνύματα ειδοποίησης. Ο πίνακας 1.1. συνοψίζει τους βασικούς στόχους της εργασίας.

Πίνακας 1.1. Βασικοί στόχοι της πτυχιακής εργασίας

Στόχος	Περιγραφή	Αναμενόμενο αποτέλεσμα
Μελέτη ψηφιακών διδύμων	Ανάλυση της έννοιας, των χαρακτηριστικών και των εφαρμογών τους.	Κατανόηση του θεωρητικού πλαισίου.
Σχεδίαση αρχιτεκτονικής	Καθορισμός των επιπέδων συλλογής, αποθήκευσης, επεξεργασίας και παρουσίασης δεδομένων.	Οργανωμένο μοντέλο λειτουργίας του συστήματος.
Υλοποίηση λογισμικού	Ανάπτυξη εφαρμογής για καταχώριση, προβολή και βασική ανάλυση δεδομένων.	Πρακτικό σύστημα παρακολούθησης.
Οπτικοποίηση δεδομένων	Χρήση γραφημάτων, πινάκων και ενδείξεων κατάστασης.	Άμεση κατανόηση της κατάστασης του συστήματος.
Εντοπισμός αποκλίσεων	Ορισμός ορίων λειτουργίας και αναγνώριση ασυνήθιστων τιμών.	Βασική υποστήριξη ανίχνευσης ανωμαλιών.

1.3 Αναγκαιότητα παρακολούθησης τεχνικών συστημάτων

Η παρακολούθηση τεχνικών συστημάτων αποτελεί βασική ανάγκη σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές. Ένα τεχνικό σύστημα μπορεί να λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς άμεση ανθρώπινη επίβλεψη, να παράγει συνεχώς μετρήσεις και να παρουσιάζει μεταβολές που δεν είναι εύκολο να γίνουν αντιληπτές χωρίς κατάλληλα εργαλεία. Η καθυστέρηση στην αναγνώριση μιας βλάβης ή μιας απόκλισης μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση, αυξημένο κόστος, σπατάλη ενέργειας ή ακόμη και σε διακοπή λειτουργίας.

Η χρήση ενός ψηφιακού συστήματος παρακολούθησης επιτρέπει τη συγκέντρωση όλων των σημαντικών πληροφοριών σε ένα σημείο. Αντί ο χρήστης να ελέγχει ξεχωριστά διαφορετικές συσκευές ή αρχεία, μπορεί να βλέπει συγκεντρωτικά δεδομένα, ιστορικό μετρήσεων και οπτικές ενδείξεις. Έτσι, η λήψη αποφάσεων γίνεται πιο γρήγορη και περισσότερο τεκμηριωμένη.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η δυνατότητα ανίχνευσης ανωμαλιών. Σε πολλά συστήματα, μια μεμονωμένη τιμή μπορεί να φαίνεται μικρή ή ασήμαντη, αλλά η επαναλαμβανόμενη εμφάνισή της ή η σταδιακή μεταβολή της μπορεί να δείχνει πρόβλημα. Για παράδειγμα, μια μικρή αύξηση θερμοκρασίας, όταν εμφανίζεται σταθερά για αρκετό χρονικό διάστημα, μπορεί να υποδηλώνει υπερφόρτωση ή φθορά εξοπλισμού. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να βοηθήσει στην έγκαιρη αναγνώριση τέτοιων φαινομένων.

1.4 Συμβολή της εργασίας

Η συμβολή της εργασίας είναι τόσο θεωρητική όσο και πρακτική. Σε θεωρητικό επίπεδο, παρουσιάζεται η έννοια του ψηφιακού διδύμου και αναλύεται η σχέση του με την παρακολούθηση δεδομένων, την οπτικοποίηση και την υποστήριξη αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, ο αναγνώστης αποκτά μια συνολική εικόνα για το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων σε πραγματικές εφαρμογές.

Σε πρακτικό επίπεδο, η εργασία προτείνει και υλοποιεί ένα λογισμικό σύστημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για εφαρμογές παρακολούθησης. Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί με δοκιμαστικά ή πραγματικά δεδομένα και να παρουσιάζει στον χρήστη την κατάσταση λειτουργίας μέσω πινάκων και γραφημάτων. Η εργασία δεν μένει σε γενικές περιγραφές αλλά συνδέει τη θεωρία με ένα συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής.

Μπορούν να προστεθούν περισσότερο σύνθετες μέθοδοι ανάλυσης, αλγόριθμοι πρόβλεψης, ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο, σύνδεση με πραγματικούς αισθητήρες ή δυνατότητα ελέγχου ενεργοποιητών. Με αυτόν τον τρόπο, το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να εξελιχθεί σταδιακά σε μια πιο ολοκληρωμένη πλατφόρμα ψηφιακού διδύμου.

Πίνακας 1.2. Ενδεικτικές λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος

Απαίτηση	Περιγραφή	Σημασία
Καταχώριση δεδομένων	Το σύστημα πρέπει να μπορεί να δέχεται μετρήσεις από πηγές δεδομένων.	Αποτελεί τη βάση της παρακολούθησης.
Αποθήκευση ιστορικού	Οι μετρήσεις πρέπει να αποθηκεύονται με χρονική σήμανση.	Επιτρέπει σύγκριση και ανάλυση στον χρόνο.
Οπτικοποίηση	Τα δεδομένα πρέπει να εμφανίζονται σε πίνακες και γραφήματα.	Διευκολύνει την κατανόηση της κατάστασης.
Έλεγχος ορίων	Το σύστημα πρέπει να συγκρίνει τις τιμές με καθορισμένα όρια.	Υποστηρίζει τον εντοπισμό αποκλίσεων.

Απλή διεπαφή	Η εφαρμογή πρέπει να είναι κατανοητή και εύχρηστη.	Μειώνει την ανάγκη τεχνικής εξειδίκευσης.
--------------	--	---

Ο πίνακας παρουσιάζει ενδεικτικές λειτουργικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί ένα σύστημα παρακολούθησης τύπου ψηφιακού διδύμου.

1.5 Δομή της πτυχιακής εργασίας

Η πτυχιακή εργασία οργανώνεται σε κεφάλαια που ακολουθούν τη λογική πορεία από τη θεωρητική μελέτη προς την πρακτική υλοποίηση. Αρχικά παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο και η σημασία του θέματος. Στη συνέχεια αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των ψηφιακών διδύμων, οι εφαρμογές τους και η αρχιτεκτονική που απαιτείται για την ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης.

Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστεί η σχεδίαση του λογισμικού συστήματος, η βάση δεδομένων, η διεπαφή χρήστη, οι λειτουργίες εισαγωγής και προβολής δεδομένων, καθώς και οι μηχανισμοί βασικής ανάλυσης. Τέλος, θα παρουσιαστούν παραδείγματα χρήσης, αποτελέσματα και συμπεράσματα, μαζί με προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο ψηφιακών διδύμων

Τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν μία από τις πιο χαρακτηριστικές τεχνολογικές έννοιες του σύγχρονου ψηφιακού μετασχηματισμού. Η βασική ιδέα είναι ότι ένα φυσικό αντικείμενο, μια μηχανή, μια εγκατάσταση, μια διεργασία ή ακόμη και ένα ολοκληρωμένο σύστημα μπορεί να αποκτήσει μια ψηφιακή αναπαράσταση, η οποία ενημερώνεται με δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο. Η αναπαράσταση αυτή δεν είναι απλώς ένα σχέδιο ή ένα στατικό μοντέλο, αλλά ένα δυναμικό πληροφοριακό σύστημα που επιτρέπει την παρακολούθηση, την ανάλυση, τη σύγκριση και, σε πιο προχωρημένες περιπτώσεις, την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος.

Η έννοια συνδέεται στενά με τις τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων, των αισθητήρων, των βάσεων δεδομένων, των συστημάτων οπτικοποίησης, της ανάλυσης δεδομένων και της τεχνητής νοημοσύνης. Ωστόσο, το ψηφιακό δίδυμο δεν ταυτίζεται με καμία από αυτές τις τεχνολογίες μεμονωμένα. Αντίθετα, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που συνδυάζει τεχνολογίες και δεδομένα με στόχο την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας ενός πραγματικού συστήματος.

Στη βιβλιογραφία, η ιδέα του ψηφιακού διδύμου συνδέεται συχνά με την ανάγκη δημιουργίας μιας ψηφιακής οντότητας που αντιστοιχεί σε ένα φυσικό αντικείμενο ή σύστημα και ακολουθεί την εξέλιξή του σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Οι Grieves και Vickers αναφέρουν ότι το ψηφιακό δίδυμο βασίζεται στην ύπαρξη φυσικού προϊόντος, ψηφιακού προϊόντος και σύνδεσης δεδομένων μεταξύ τους [1]. Η σύνδεση αυτή είναι το στοιχείο που μετατρέπει μια απλή ψηφιακή απεικόνιση σε ζωντανή αναπαράσταση της πραγματικότητας.

2.1 Η έννοια του ψηφιακού διδύμου

Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να οριστεί ως μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου, συστήματος ή διεργασίας, η οποία ενημερώνεται με δεδομένα από το αντίστοιχο φυσικό σύστημα και επιτρέπει την παρακολούθηση και ανάλυση της συμπεριφοράς του. Σε αντίθεση με ένα απλό τρισδιάστατο σχέδιο, μια φωτογραφία ή ένα διάγραμμα, το ψηφιακό δίδυμο χαρακτηρίζεται από τη σύνδεσή του με πραγματικά δεδομένα λειτουργίας.

Η πρακτική αξία ενός ψηφιακού διδύμου προκύπτει από το γεγονός ότι παρέχει στον χρήστη μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του συστήματος. Αντί να βλέπει μεμονωμένες μετρήσεις, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί το σύστημα ως ενιαία οντότητα. Για παράδειγμα, σε μια εγκατάσταση μπορεί να εμφανίζονται ταυτόχρονα η θερμοκρασία, η κατανάλωση ενέργειας, η κατάσταση λειτουργίας και οι ειδοποιήσεις. Η συνολική εικόνα είναι πιο χρήσιμη από την απομονωμένη ανάγνωση κάθε μέτρησης.

Σύμφωνα με σύγχρονες προσεγγίσεις, ένα ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιείται για παρακολούθηση, προσομοίωση, ανάλυση, συντήρηση και υποστήριξη αποφάσεων [2]. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχει μόνο περιγραφικό χαρακτήρα, αλλά μπορεί να αποκτήσει και διαγνωστικό ή προβλεπτικό ρόλο. Στο απλούστερο επίπεδο, ενημερώνει τον χρήστη για την τρέχουσα κατάσταση. Σε πιο σύνθετο επίπεδο, μπορεί να εκτιμά μελλοντικές καταστάσεις ή να προτείνει ενέργειες.

Για την παρούσα πτυχιακή εργασία, ο ορισμός του ψηφιακού διδύμου προσαρμόζεται στις ανάγκες ενός λογισμικού συστήματος παρακολούθησης. Το φυσικό ή προσομοιωμένο σύστημα παράγει δεδομένα, τα δεδομένα αποθηκεύονται και αναλύονται, ενώ η εφαρμογή παρουσιάζει μια ψηφιακή εικόνα της

λειτουργίας. Έτσι, το ψηφιακό δίδυμο αντιμετωπίζεται ως πρακτικό εργαλείο παρακολούθησης και όχι ως αποκλειστικά θεωρητική έννοια.

Πίνακας 2.1. Βασικά στοιχεία ενός ψηφιακού διδύμου

Στοιχείο	Περιγραφή	Παράδειγμα στην παρούσα εργασία
Φυσικό σύστημα	Το πραγματικό αντικείμενο, εγκατάσταση ή διεργασία που παρακολουθείται.	Τεχνικό σύστημα ή προσομοιωμένη εγκατάσταση.
Δεδομένα λειτουργίας	Μετρήσεις και καταγραφές που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος.	Θερμοκρασία, πίεση, κατανάλωση, κατάσταση λειτουργίας.
Ψηφιακή αναπαράσταση	Το λογισμικό μοντέλο που παρουσιάζει την κατάσταση του συστήματος.	Dashboard με δείκτες, πίνακες και γραφήματα.
Μηχανισμός ανάλυσης	Κανόνες ή μέθοδοι που αξιολογούν τα δεδομένα.	Έλεγχος ορίων και εντοπισμός αποκλίσεων.
Ανάδραση	Πληροφορία που επιστρέφει στον χρήστη ή στο σύστημα για λήψη απόφασης.	Ειδοποίηση ή επισήμανση πιθανής ανωμαλίας.

Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τα βασικά στοιχεία που χρειάζονται για να χαρακτηριστεί ένα λογισμικό σύστημα ως ψηφιακό δίδυμο.

2.2 Διαφορά ψηφιακού μοντέλου, ψηφιακής σκιάς και ψηφιακού διδύμου

Στη βιβλιογραφία γίνεται συχνά διάκριση ανάμεσα σε τρεις συγγενείς έννοιες: το ψηφιακό μοντέλο, την ψηφιακή σκιά και το ψηφιακό δίδυμο. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, επειδή όχι κάθε ψηφιακή αναπαράσταση μπορεί να θεωρηθεί ψηφιακό δίδυμο. Ένα απλό σχέδιο CAD, ένα διάγραμμα ή μια στατική βάση δεδομένων μπορεί να περιγράφει ένα σύστημα, αλλά δεν ενημερώνεται απαραίτητα αυτόματα από τη λειτουργία του.

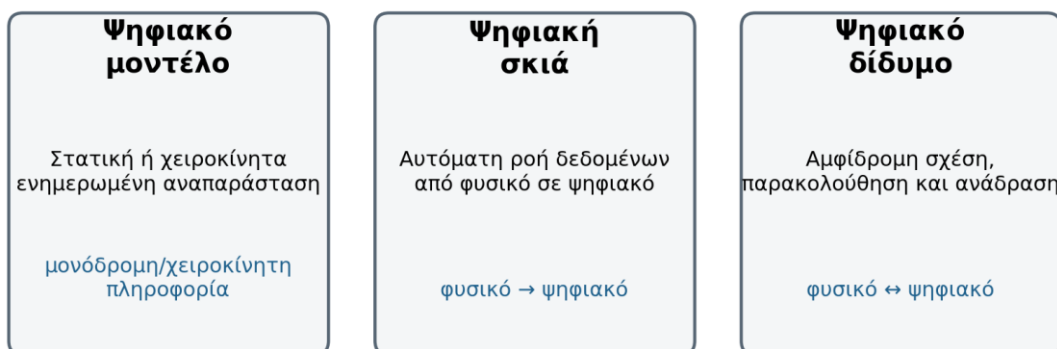
Το ψηφιακό μοντέλο είναι συνήθως μια στατική ή χειροκίνητα ενημερωμένη αναπαράσταση. Περιγράφει τη δομή ή τη συμπεριφορά ενός συστήματος, αλλά δεν έχει αναγκαστικά συνεχή σύνδεση με πραγματικά δεδομένα. Για παράδειγμα, ένα σχεδιάγραμμα μιας εγκατάστασης ή ένα αρχείο παραμέτρων μπορεί να είναι χρήσιμο, αλλά δεν αποτελεί από μόνο του ψηφιακό δίδυμο.

Η ψηφιακή σκιά αποτελεί ένα ενδιάμεσο στάδιο. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει αυτόματη ροή δεδομένων από το φυσικό σύστημα προς το ψηφιακό περιβάλλον. Το λογισμικό ενημερώνεται από τις πραγματικές μετρήσεις, αλλά η σχέση είναι κυρίως μονόδρομη. Το ψηφιακό περιβάλλον παρακολουθεί την κατάσταση, χωρίς απαραίτητα να επηρεάζει ή να ενημερώνει το φυσικό σύστημα.

Το ψηφιακό δίδυμο προϋποθέτει πιο ολοκληρωμένη σχέση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού συστήματος. Η ροή δεδομένων μπορεί να είναι αμφίδρομη και η ψηφιακή αναπαράσταση μπορεί να χρησιμοποιείται όχι μόνο για παρατήρηση, αλλά και για ανάλυση, πρόβλεψη ή λήψη αποφάσεων. Η ταξινόμηση αυτή έχει

παρουσιάζεται σε εργασίες που διακρίνουν τα επίπεδα ψηφιακής αναπαράστασης με βάση τη ροή δεδομένων και τον βαθμό αυτοματοποίησης [3].

Διαβάθμιση ψηφιακής αναπαράστασης ανάλογα με τη ροή δεδομένων



Εικόνα 2.1. Διάκριση ψηφιακού μοντέλου, ψηφιακής σκιάς και ψηφιακού διδύμου

Η Εικόνα 2.1. συνοψίζει τη διαφορά ανάμεσα στις τρεις έννοιες. Όσο αυξάνεται η σύνδεση με το φυσικό σύστημα και ο βαθμός αυτοματοποίησης, τόσο η αναπαράσταση μετακινείται από το απλό ψηφιακό μοντέλο προς το πραγματικό ψηφιακό δίδυμο.

Πίνακας 2.2. Σύγκριση ψηφιακού μοντέλου, ψηφιακής σκιάς και ψηφιακού διδύμου

Κατηγορία	Σύνδεση με φυσικό σύστημα	Ενημέρωση δεδομένων	Ρόλος
Ψηφιακό μοντέλο	Περιορισμένη ή ανύπαρκτη αυτόματη σύνδεση.	Χειροκίνητη ή στατική ενημέρωση.	Περιγραφή και τεκμηρίωση.
Ψηφιακή σκιά	Αυτόματη ροή από το φυσικό προς το ψηφιακό σύστημα.	Συνεχής ή περιοδική ενημέρωση από μετρήσεις.	Παρακολούθηση και καταγραφή.
Ψηφιακό δίδυμο	Δυναμική και πιθανώς αμφίδρομη σύνδεση.	Συνεχής ενημέρωση και αξιοποίηση δεδομένων.	Παρακολούθηση, ανάλυση, πρόβλεψη και υποστήριξη αποφάσεων.

Η σύγκριση δείχνει ότι το κύριο κριτήριο δεν είναι μόνο η ύπαρξη ψηφιακής αναπαράστασης, αλλά κυρίως η ποιότητα της σύνδεσης με το φυσικό σύστημα και ο τρόπος αξιοποίησης των δεδομένων.

2.3 Βασικά χαρακτηριστικά ψηφιακών διδύμων

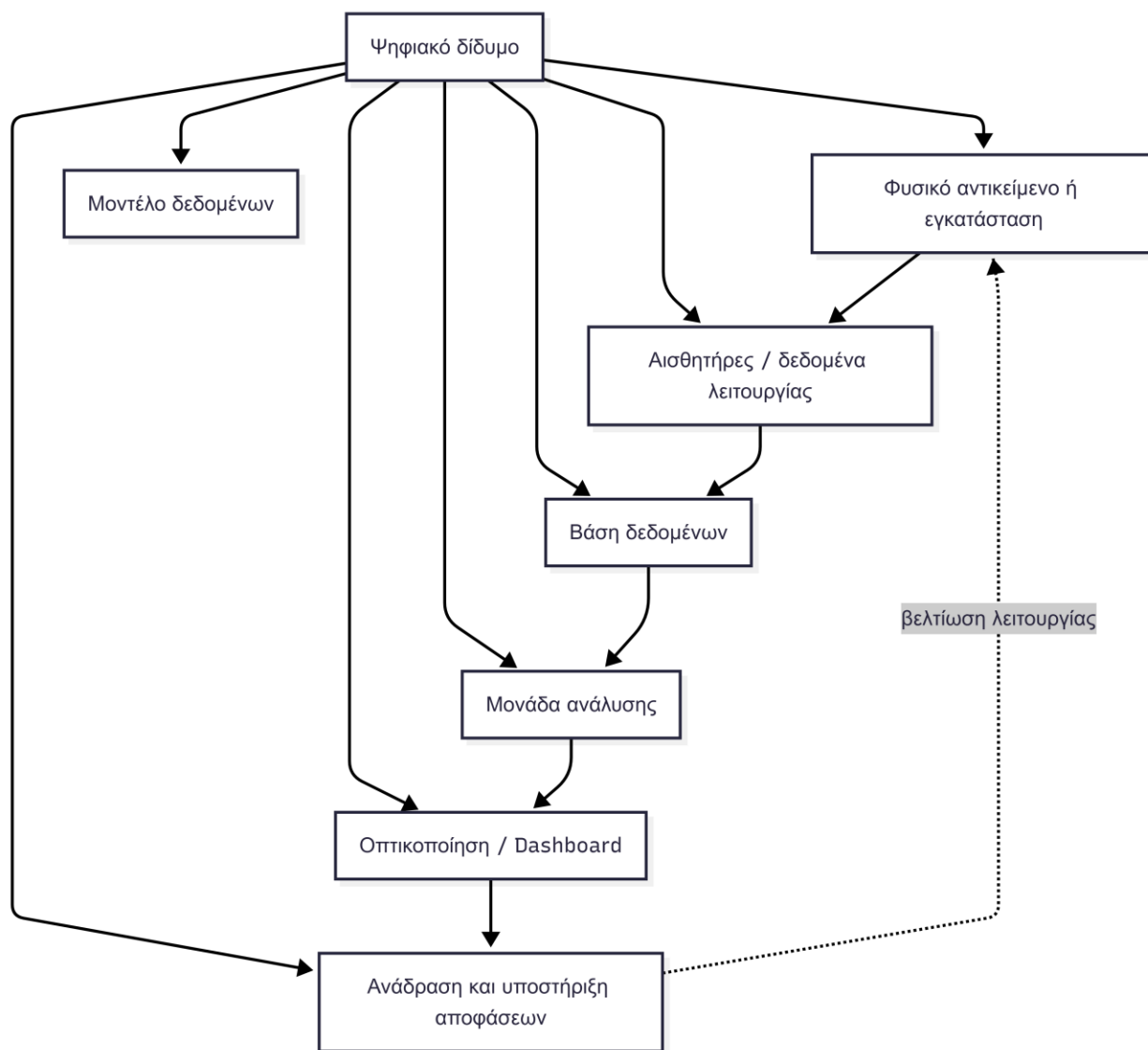
Ένα ψηφιακό δίδυμο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ιδιότητες που το διαφοροποιούν από ένα απλό πληροφοριακό σύστημα. Η πρώτη και σημαντικότερη ιδιότητα είναι η σύνδεση με δεδομένα πραγματικής λειτουργίας. Χωρίς δεδομένα, η ψηφιακή αναπαράσταση παραμένει θεωρητική. Η σύνδεση αυτή μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο ή περιοδικά, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Δεύτερο βασικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα αναπαράστασης της κατάστασης του φυσικού συστήματος. Το ψηφιακό δίδυμο πρέπει να μπορεί να δείχνει τι συμβαίνει τώρα, τι συνέβη στο παρελθόν και, σε πιο προχωρημένες εφαρμογές, τι ενδέχεται να συμβεί στο μέλλον. Αυτό απαιτεί κατάλληλη αποθήκευση ιστορικών δεδομένων, ώστε να μπορούν να γίνονται συγκρίσεις και να αναγνωρίζονται τάσεις.

Τρίτο χαρακτηριστικό είναι η οπτικοποίηση. Τα δεδομένα πρέπει να παρουσιάζονται με τρόπο που να είναι κατανοητός και χρήσιμος. Οι πίνακες βοηθούν στην ακριβή ανάγνωση τιμών, ενώ τα γραφήματα βοηθούν στην κατανόηση της εξέλιξης των μετρήσεων στον χρόνο. Οι χρωματικές ενδείξεις και οι ειδοποιήσεις μπορούν να βοηθήσουν τον χρήστη να εντοπίζει γρήγορα κρίσιμες καταστάσεις.

Τέταρτο χαρακτηριστικό είναι η αναλυτική ικανότητα. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να περιλαμβάνει απλούς κανόνες ελέγχου, όπως σύγκριση τιμών με όρια, ή πιο σύνθετους αλγορίθμους ανάλυσης δεδομένων. Σε συστήματα υψηλής πολυπλοκότητας, η ανάλυση μπορεί να περιλαμβάνει μοντέλα πρόβλεψης, μηχανική μάθηση ή προσομοιώσεις διαφορετικών σεναρίων [4].

Τέλος, σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα επέκτασης. Ένα καλά σχεδιασμένο ψηφιακό δίδυμο πρέπει να μπορεί να δεχθεί νέες πηγές δεδομένων, νέες παραμέτρους, νέους κανόνες ελέγχου και νέες μορφές παρουσίασης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την παρούσα εργασία, καθώς το προτεινόμενο σύστημα σχεδιάζεται ως γενική πλατφόρμα παρακολούθησης και όχι ως κλειστή εφαρμογή για μία μόνο περίπτωση.



Εικόνα 2.2. Βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος ψηφιακού δίδυμου

Η Εικόνα 2.2. παρουσιάζει τα κύρια δομικά στοιχεία που συνθέτουν ένα ψηφιακό δίδυμο. Το φυσικό αντικείμενο, οι αισθητήρες, η βάση δεδομένων, η ανάλυση, η οπτικοποίηση και η ανάδραση συνεργάζονται ώστε να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας.

Πίνακας 2.3. Χαρακτηριστικά που πρέπει να υποστηρίζει ένα ψηφιακό δίδυμο

Χαρακτηριστικό	Ερμηνεία	Σύνδεση με την υλοποίηση
Δυναμική ενημέρωση	Η ψηφιακή αναπαράσταση ενημερώνεται από νέα δεδομένα.	Καταχώριση μετρήσεων με χρονική σήμανση.
Ιστορικότητα	Διατηρείται αρχείο προηγούμενων καταστάσεων.	Πίνακες δεδομένων και ιστορικά γραφήματα.

Οπτικοποίηση	Τα δεδομένα μετατρέπονται σε κατανοητές απεικονίσεις.	Dashboard, γραφήματα και δείκτες κατάστασης.
Ανάλυση	Οι μετρήσεις αξιολογούνται με βάση κανόνες ή μοντέλα.	Έλεγχος ορίων και επισημάνση αποκλίσεων.
Επεκτασιμότητα	Το σύστημα μπορεί να δεχθεί νέες λειτουργίες.	Προσθήκη νέων αισθητήρων, πεδίων και κανόνων.

2.4 Κύκλος ζωής ενός ψηφιακού διδύμου

Ο κύκλος ζωής ενός ψηφιακού διδύμου περιλαμβάνει όλα τα στάδια από τη σχεδίαση μέχρι τη συνεχή χρήση και βελτίωσή του. Αρχικά, πρέπει να καθοριστεί ποιο φυσικό σύστημα θα αναπαρασταθεί και ποια δεδομένα είναι σημαντικά για την παρακολούθησή του. Η επιλογή των παραμέτρων είναι κρίσιμη, επειδή ένα ψηφιακό δίδυμο δεν χρειάζεται να αναπαριστά τα πάντα, αλλά όσα είναι χρήσιμα για τον σκοπό της εφαρμογής.

Στο δεύτερο στάδιο δημιουργείται η σύνδεση με τα δεδομένα. Αυτό μπορεί να γίνει με αισθητήρες, αρχεία καταγραφής, API, χειροκίνητη καταχώριση ή προσομοιωμένα δεδομένα. Η παρούσα εργασία μπορεί να λειτουργήσει με δεδομένα που εισάγονται στο σύστημα και αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων, επιτρέποντας την ανάπτυξη και δοκιμή της εφαρμογής ακόμη και χωρίς μόνιμη σύνδεση με πραγματικό εξοπλισμό.

Στη συνέχεια, το ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιείται για παρακολούθηση. Σε αυτό το στάδιο, ο χρήστης βλέπει τις τρέχουσες και ιστορικές τιμές, συγκρίνει την κατάσταση του συστήματος και αναγνωρίζει πιθανές αλλαγές. Η παρακολούθηση γίνεται πιο αποτελεσματική όταν συνοδεύεται από κατάλληλη οπτικοποίηση και σαφή οργάνωση της πληροφορίας.

Το επόμενο στάδιο είναι η ανάλυση και διάγνωση. Εδώ το σύστημα δεν περιορίζεται στην προβολή δεδομένων, αλλά επιχειρεί να αξιολογήσει αν οι τιμές είναι φυσιολογικές. Για παράδειγμα, μπορεί να ελέγχεται αν μια μέτρηση ξεπερνά ένα όριο ή αν μεταβάλλεται απότομα σε σχέση με προηγούμενες τιμές. Σε πιο σύνθετες εφαρμογές, ο κύκλος ζωής μπορεί να περιλαμβάνει προγνωστική συντήρηση και βελτιστοποίηση λειτουργίας.

Στο στάδιο της ανάδρασης και βελτίωσης και συμπεράσματα που προκύπτουν από το ψηφιακό δίδυμο μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας του φυσικού συστήματος ή στη βελτίωση του ίδιου του μοντέλου. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται, καθώς το σύστημα συνεχίζει να παράγει δεδομένα και το ψηφιακό δίδυμο ενημερώνεται συνεχώς.



Εικόνα 2.3. Κύκλος ζωής ενός ψηφιακού διδύμου

Η Εικόνα 2.3. παρουσιάζει τον κύκλο ζωής ενός ψηφιακού διδύμου ως επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Η σχεδίαση, η σύνδεση με δεδομένα, η παρακολούθηση, η ανάλυση και η ανάδραση δεν αποτελούν ανεξάρτητα στάδια, αλλά συνεχή κύκλο βελτίωσης.

2.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Η χρήση ψηφιακών διδύμων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο πλεονέκτημα είναι η καλύτερη εποπτεία του συστήματος. Ο χρήστης μπορεί να βλέπει συγκεντρωτικά την κατάσταση λειτουργίας και να εντοπίζει γρήγορα τιμές που χρειάζονται προσοχή. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συστήματα που παράγουν πολλά δεδομένα ή λειτουργούν σε διαφορετικά σημεία.

Δεύτερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα αξιοποίησης ιστορικών δεδομένων. Μέσα από την αποθήκευση και ανάλυση των μετρήσεων, μπορούν να αναγνωριστούν τάσεις και μοτίβα. Για παράδειγμα, μπορεί να διαπιστωθεί ότι μια παράμετρος αυξάνεται σταδιακά, ότι ένα σύστημα παρουσιάζει συχνότερες αποκλίσεις σε συγκεκριμένες ώρες ή ότι κάποια λειτουργική κατάσταση συνδέεται με αυξημένη κατανάλωση.

Τρίτο πλεονέκτημα είναι η υποστήριξη αποφάσεων. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να βοηθήσει τον χρήστη να αποφασίσει πότε χρειάζεται έλεγχος, συντήρηση ή αλλαγή λειτουργίας. Σε πιο σύνθετες εφαρμογές, η τεχνολογία αυτή συνδέεται με προγνωστική συντήρηση και βελτιστοποίηση παραγωγικών διαδικασιών [5].

Η ποιότητα ενός ψηφιακού διδύμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων. Αν οι μετρήσεις είναι λανθασμένες, ελλιπείς ή μη αντιπροσωπευτικές τότε και τα συμπεράσματα μπορεί να είναι αναξιόπιστα. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται προσοχή στη συλλογή, αποθήκευση και καθαρότητα των δεδομένων.

Ένας δεύτερος περιορισμός είναι η πολυπλοκότητα της υλοποίησης. Όσο πιο σύνθετο είναι το φυσικό σύστημα, τόσο πιο δύσκολη είναι η δημιουργία ακριβούς ψηφιακής αναπαράστασης. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται γνώσεις αισθητήρων, δικτύων, βάσεων δεδομένων, λογισμικού, ανάλυσης δεδομένων και ασφάλειας.

Ένα ψηφιακό δίδυμο δεν αντικαθιστά πλήρως την ανθρώπινη κρίση. Μπορεί να παρέχει πληροφορίες, ειδοποιήσεις και ενδείξεις, αλλά η τελική αξιολόγηση και απόφαση παραμένει ευθύνη του χρήστη ή του υπεύθυνου λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός της διεπαφής και η σαφήνεια των αποτελεσμάτων είναι εξίσου σημαντικά με την τεχνική υλοποίηση.

Πίνακας 2.4. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των ψηφιακών διδύμων

Πλευρά	Περιγραφή	Σχόλιο για την παρούσα εργασία
Πλεονέκτημα	Καλύτερη εποπτεία της λειτουργικής κατάστασης.	Υλοποιείται μέσω dashboard και γραφημάτων.
Πλεονέκτημα	Αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων για σύγκριση.	Υποστηρίζεται μέσω αποθήκευσης μετρήσεων.
Πλεονέκτημα	Υποστήριξη εντοπισμού αποκλίσεων.	Υλοποιείται με ελέγχους ορίων.
Περιορισμός	Εξάρτηση από την ποιότητα των δεδομένων.	Απαιτείται σωστή εισαγωγή και έλεγχος τιμών.
Περιορισμός	Αυξημένη πολυπλοκότητα σε μεγάλα συστήματα.	Η εργασία ξεκινά από γενικό και επεκτάσιμο μοντέλο.

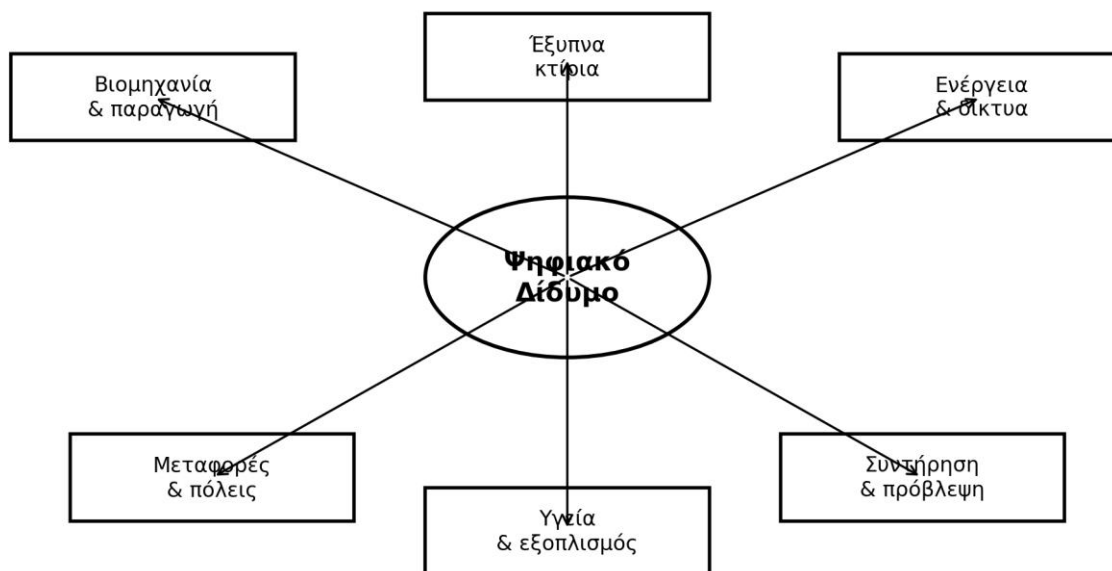
Το θεωρητικό υπόβαθρο των ψηφιακών διδύμων δείχνει ότι η τεχνολογία αυτή μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη σύγχρονη παρακολούθηση τεχνικών συστημάτων.

Κεφάλαιο 3ο: Εφαρμογές ψηφιακών διδύμων

Τα ψηφιακά δίδυμα δεν αποτελούν μια τεχνολογία που περιορίζεται σε έναν μόνο επιστημονικό ή επαγγελματικό χώρο. Αντίθετα μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε περίπτωση όπου υπάρχει ένα φυσικό αντικείμενο, μια εγκατάσταση, μια διαδικασία ή ένα σύνθετο σύστημα του οποίου η λειτουργία μπορεί να παρακολουθείται μέσω δεδομένων. Η βασική ιδέα είναι ότι το φυσικό σύστημα παράγει μετρήσεις και πληροφορίες οι οποίες μεταφέρονται σε ένα λογισμικό περιβάλλον όπου οργανώνονται, αναλύονται και παρουσιάζονται με τρόπο κατανοητό στον χρήστη.

Η αξία των ψηφιακών διδύμων γίνεται ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλοντα με πολλές μεταβλητές, συνεχή λειτουργία και ανάγκη γρήγορης απόκρισης. Σε τέτοια συστήματα, η απλή καταγραφή δεδομένων δεν είναι αρκετή. Ο χρήστης χρειάζεται μια συνολική εικόνα της κατάστασης, δυνατότητα σύγκρισης με ιστορικά δεδομένα, αναγνώριση τάσεων και έγκαιρη ειδοποίηση όταν εμφανίζονται κάποιες αποκλίσεις. Γι' αυτό τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές μονάδες, κτίρια, ενεργειακές υποδομές, μεταφορές, υγειονομικό εξοπλισμό και συστήματα συντήρησης [6], [7].

Από τις εφαρμογές που παρουσιάζονται παρακάτω προκύπτουν βασικές απαιτήσεις, όπως η αποθήκευση μετρήσεων, η απεικόνιση κατάστασης, η χρήση γραφημάτων, η παρακολούθηση ορίων και η εμφάνιση προειδοποιήσεων.



Εικόνα 3.1. Ενδεικτικά πεδία εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων

Η Εικόνα 3.1. παρουσιάζει συνοπτικά βασικούς τομείς στους οποίους η έννοια του ψηφιακού διδύμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση, ανάλυση και υποστήριξη αποφάσεων.

3.1 Ψηφιακά δίδυμα στη βιομηχανία και στην παραγωγή

Η βιομηχανία και η παραγωγή αποτελούν από τους σημαντικότερους χώρους εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων. Σε μια βιομηχανική μονάδα υπάρχουν μηχανές, γραμμές παραγωγής, κινητήρες, αισθητήρες, ρομποτικοί μηχανισμοί και συστήματα ελέγχου, τα οποία παράγουν συνεχώς δεδομένα. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να συγκεντρώνει αυτές τις πληροφορίες και να παρουσιάζει την κατάσταση της παραγωγής σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Σε αυτό το περιβάλλον, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της απόδοσης μηχανών, την αναγνώριση καθυστερήσεων, την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας και την ανίχνευση μη κανονικών καταστάσεων. Για παράδειγμα μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας ενός κινητήρα μπορεί να αποτελεί ένδειξη αυξημένης τριβής ή επιβάρυνσης. Αν το σύστημα καταγράφει και αναλύει τη μεταβολή αυτή τότε μπορεί να ειδοποιήσει τον τεχνικό πριν εμφανιστεί σοβαρή βλάβη.

Η χρήση ψηφιακών διδύμων στη βιομηχανία συνδέεται επίσης με την έννοια της Βιομηχανίας 4.0, όπου οι μηχανές, οι αισθητήρες, τα πληροφοριακά συστήματα και οι άνθρωποι λειτουργούν ως διασυνδεδεμένο οικοσύστημα. Σχετικές μελέτες παρουσιάζουν τα ψηφιακά δίδυμα ως βασικό μηχανισμό για τη βελτίωση της παραγωγικότητας, της ποιότητας και της προβλεπτικής συντήρησης [6], [8].

Η βιομηχανική χρήση αποτελεί ένα χρήσιμο παράδειγμα, διότι δείχνει ότι το λογισμικό δεν πρέπει να περιορίζεται στην απλή εμφάνιση τιμών. Πρέπει να οργανώνει τις μετρήσεις, να τις συσχετίζει με την κατάσταση του συστήματος και να δίνει στον χρήστη καθαρή εικόνα για το αν η λειτουργία βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων.

Πίνακας 3.1. Ενδεικτικές βιομηχανικές χρήσεις ψηφιακού διδύμου

Βιομηχανικό στοιχείο	Ενδεικτικά δεδομένα	Χρήση στο ψηφιακό δίδυμο	Πιθανό όφελος
Κινητήρας	Θερμοκρασία, ρεύμα, στροφές	Παρακολούθηση φορτίου και απόκλισης	Πρόληψη υπερφόρτωσης
Γραμμή παραγωγής	Ρυθμός παραγωγής, στάσεις, χρόνοι κύκλου	Ανάλυση απόδοσης και εντοπισμός καθυστερήσεων	Βελτίωση παραγωγικότητας
Ρομποτικός μηχανισμός	Θέση, ταχύτητα, αριθμός κύκλων	Έλεγχος επαναληψιμότητας και φθοράς	Μείωση αστοχιών
Σύστημα ψύξης	Θερμοκρασίες, πίεση, ροή	Έλεγχος ορίων λειτουργίας	Προστασία εξοπλισμού

Ο πίνακας αυτός δείχνει ότι ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να συνδέσει διαφορετικά είδη μετρήσεων με πρακτικές αποφάσεις.

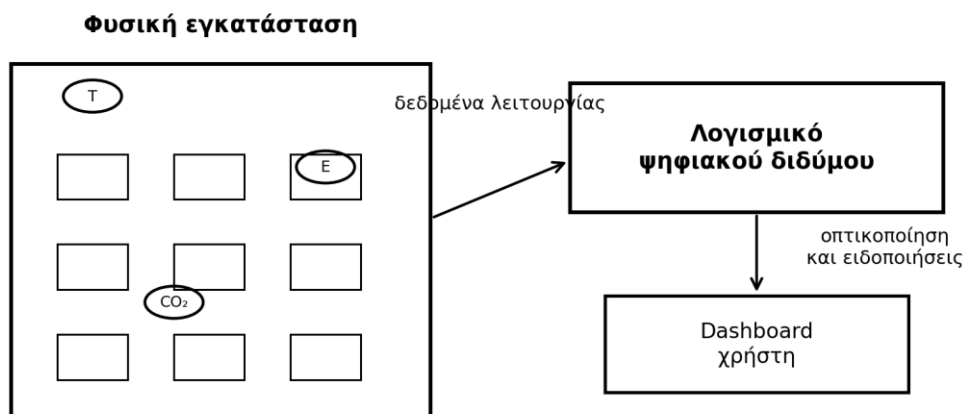
3.2 Ψηφιακό δίδυμο σε έξυπνα κτίρια και εγκαταστάσεις

Μια άλλη σημαντική περιοχή εφαρμογής είναι τα έξυπνα κτίρια και οι τεχνικές εγκαταστάσεις. Ένα κτίριο μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθετο τεχνικό σύστημα επειδή περιλαμβάνει ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, συστήματα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού, φωτισμό, αισθητήρες παρουσίας, συστήματα ασφάλειας και συστήματα διαχείρισης ενέργειας.

Σε ένα τέτοιο περιβάλλον το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να παρουσιάζει την κατάσταση του κτιρίου σε μια ενιαία οθόνη. Ο χρήστης μπορεί να βλέπει θερμοκρασίες ανά χώρο, υγρασία, κατανάλωση ενέργειας, επίπεδα φωτισμού, ποιότητα αέρα και ειδοποιήσεις. Η συγκεντρωτική απεικόνιση βοηθά στη γρήγορη κατανόηση της κατάστασης και επιτρέπει καλύτερη διαχείριση.

Η χρήση ψηφιακού διδύμου σε κτίρια μπορεί επίσης να συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αν το σύστημα παρακολουθεί την κατανάλωση και τη συσχετίζει με ώρες λειτουργίας, θερμοκρασία χώρων και παρουσία χρηστών, μπορεί να μας βρει περιπτώσεις άσκοπης κατανάλωσης. Για παράδειγμα μπορεί να βγάλει ειδοποίηση όταν λειτουργεί κλιματισμός σε χώρο χωρίς παρουσία ή όταν υπάρχει ασυνήθιστα υψηλή ενεργειακή κατανάλωση.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, ένα έξυπνο κτίριο αποτελεί πολύ κατάλληλο παράδειγμα τεχνικής εγκατάστασης. Το προτεινόμενο λογισμικό θα μπορούσε να προσαρμοστεί ώστε να παρακολουθεί χώρους, αισθητήρες και επιμέρους υποσυστήματα, παρουσιάζοντας στον χρήστη μια οργανωμένη εικόνα της λειτουργικής κατάστασης.



Εικόνα 3.2. Παράδειγμα ψηφιακού διδύμου για έξυπνη εγκατάσταση

Η εικόνα αυτή παρουσιάζει ένα ενδεικτικό σενάριο στο οποίο μια φυσική εγκατάσταση παράγει δεδομένα μέσω αισθητήρων και το λογισμικό ψηφιακού διδύμου τα μετατρέπει σε πληροφορία που εμφανίζεται σε πίνακα ελέγχου.

3.3 Ψηφιακά δίδυμα σε IoT συστήματα

Τα ψηφιακά δίδυμα συνδέονται στενά με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Σε ένα IoT σύστημα, αισθητήρες και μικροελεγκτές συλλέγουν δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον και τα μεταφέρουν σε έναν server ή σε μια cloud πλατφόρμα. Αυτή η ροή δεδομένων είναι η βάση για τη δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου.

Η διαφορά ανάμεσα σε ένα απλό IoT dashboard και σε ένα ψηφιακό δίδυμο βρίσκεται στον τρόπο οργάνωσης και αξιοποίησης των δεδομένων. Ένα απλό dashboard εμφανίζει συνήθως τιμές αισθητήρων. Ένα ψηφιακό δίδυμο, όμως, προσπαθεί να αναπαραστήσει την κατάσταση του φυσικού συστήματος. Δηλαδή, συνδέει τις τιμές με συγκεκριμένα στοιχεία, λειτουργίες, όρια και καταστάσεις.

Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα περιβαλλοντικής παρακολούθησης, οι μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας και ποιότητας αέρα μπορούν να συνδυαστούν ώστε να εξαχθεί συνολική εικόνα για την κατάσταση ενός χώρου. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί πάνω από ένα όριο, η υγρασία μειωθεί και ο αερισμός είναι ανεπαρκής, το σύστημα μπορεί να εμφανίσει ότι ο χώρος βρίσκεται σε μη επιθυμητή κατάσταση.

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας, η λογική των IoT συστημάτων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Ακόμη και αν τα δεδομένα προέρχονται αρχικά από δοκιμαστικό αρχείο ή προσομοιωμένες τιμές, το λογισμικό μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε στο μέλλον να δέχεται δεδομένα από πραγματικούς αισθητήρες μέσω API.

Πίνακας 3.2. Σύνδεση IoT στοιχείων με λειτουργίες ψηφιακού διδύμου

Στοιχείο IoT	Ρόλος	Σύνδεση με ψηφιακό δίδυμο	Παράδειγμα
Αισθητήρας	Μετρά φυσικό μέγεθος	Τροφοδοτεί το δίδυμο με δεδομένα	Θερμοκρασία, υγρασία
Μικροελεγκτής	Συλλέγει και αποστέλλει μετρήσεις	Λειτουργεί ως κόμβος δεδομένων	ESP32, Raspberry Pi
API / Server	Παραλαμβάνει τα δεδομένα	Ενημερώνει τη βάση και τη διεπαφή	HTTP request, JSON
Βάση δεδομένων	Αποθηκεύει ιστορικό	Επιτρέπει ανάλυση τάσεων	Μετρήσεις ανά χρόνο
Dashboard	Παρουσιάζει την κατάσταση	Εμφανίζει το ψηφιακό δίδυμο στον χρήστη	Κάρτες, γραφήματα, ειδοποιήσεις

Ο πίνακας παρουσιάζει πώς τα βασικά στοιχεία ενός IoT συστήματος μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου. Η ύπαρξη αισθητήρων και επικοινωνίας αποτελεί την τεχνική βάση, ενώ η οργάνωση, ανάλυση και οπτικοποίηση των δεδομένων δημιουργούν την αξία για τον χρήστη.

3.4 Ψηφιακά δίδυμα στη συντήρηση και πρόβλεψη βλαβών

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων είναι η συντήρηση και ειδικότερα η προγνωστική συντήρηση. Στην παραδοσιακή συντήρηση, οι έλεγχοι πραγματοποιούνται είτε μετά από

βλάβη είτε σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει είτε σε καθυστερημένη αντιμετώπιση προβλημάτων είτε σε άσκοπες εργασίες συντήρησης.

Με τη χρήση ψηφιακού δίδυμου, η συντήρηση μπορεί να γίνει περισσότερο βασισμένη στην πραγματική κατάσταση του εξοπλισμού. Το σύστημα παρακολουθεί συνεχώς κρίσιμες παραμέτρους και εντοπίζει αλλαγές στη συμπεριφορά. Αν μια τιμή αρχίζει να αποκλίνει σταδιακά από τη συνηθισμένη της περιοχή, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να εμφανίσει προειδοποίηση.

Η προγνωστική συντήρηση βασίζεται στην ιδέα ότι πολλές βλάβες δεν εμφανίζονται ξαφνικά, αλλά προηγούνται μικρές μεταβολές στη λειτουργία. Τέτοιες μεταβολές μπορεί να είναι αυξημένη θερμοκρασία, αυξημένη κατανάλωση ρεύματος, αλλαγή στη δόνηση, μείωση απόδοσης ή συχνότερες μικρές διακοπές. Η συστηματική καταγραφή αυτών των δεδομένων επιτρέπει την έγκαιρη διάγνωση [9].

Για το λογισμικό της παρούσας εργασίας, η λογική αυτή μπορεί να υλοποιηθεί αρχικά με απλούς κανόνες. Για παράδειγμα, κάθε μέτρηση μπορεί να συγκρίνεται με ένα κατώτερο και ανώτερο όριο. Επιπλέον, μπορεί να υπολογίζεται μέσος όρος ή μεταβολή σε σχέση με προηγούμενες τιμές. Ακόμη και μια απλή τέτοια ανάλυση είναι αρκετή για να δείξει πώς το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό αποκλίσεων.



Η προγνωστική συντήρηση βασίζεται στη συνεχή σύγκριση πραγματικής και αναμενόμενης συμπεριφοράς.

Εικόνα 3.3. Ροή προγνωστικής συντήρησης με χρήση ψηφιακού δίδυμου

Η εικόνα 3.3. δείχνει τη βασική ροή από τη συλλογή μετρήσεων μέχρι την εμφάνιση προειδοποίησης και την απόφαση για συντήρηση. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε συστήματα όπου η βλάβη μπορεί να έχει οικονομικό ή λειτουργικό κόστος.

3.5 Παραδείγματα εφαρμογών σε διαφορετικούς τομείς

Πέρα από τη βιομηχανία και τα κτίρια, τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται ή μελετώνται σε πολλούς ακόμη τομείς. Στον ενεργειακό τομέα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ενέργειας. Σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση φορτίων, στη διαχείριση παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές και στην αξιολόγηση της κατάστασης εξοπλισμού [10].

Στις έξυπνες πόλεις τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να αναπαριστούν υποδομές, δρόμους, μεταφορές, δίκτυα, κτίρια και περιβαλλοντικά δεδομένα. Η χρήση τους επιτρέπει τη μελέτη σεναρίων, όπως κυκλοφοριακή συμφόρηση, κατανάλωση ενέργειας, κίνδυνος ή διαχείριση δημόσιων χώρων. Η εφαρμογή αυτή είναι πιο σύνθετη και απαιτεί πολλά διαφορετικά είδη δεδομένων και συνεργασία πολλών φορέων [11].

Στον τομέα της υγείας η έννοια του ψηφιακού διδύμου μπορεί να εφαρμοστεί σε ιατρικό εξοπλισμό, νοσοκομειακές εγκαταστάσεις ή ακόμη και σε εξατομικευμένα μοντέλα ασθενών. Παρότι τέτοιες εφαρμογές απαιτούν αυξημένη ακρίβεια, προστασία δεδομένων και επιστημονική επικύρωση δείχνουν το εύρος της τεχνολογίας.

Στις μεταφορές, ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οχήματα, σιδηροδρομικά συστήματα, λιμάνια ή στόλους. Η παρακολούθηση δεδομένων λειτουργίας, θέσης, κατανάλωσης και κατάστασης εξοπλισμού μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της ασφάλειας και της διαχείρισης.

Τα παραπάνω παραδείγματα δείχνουν ότι το ψηφιακό δίδυμο είναι περισσότερο μια γενική αρχιτεκτονική προσέγγιση παρά ένα συγκεκριμένο προϊόν. Κάθε εφαρμογή προσαρμόζει την έννοια στις δικές της ανάγκες, στα διαθέσιμα δεδομένα και στον σκοπό του χρήστη.

Πίνακας 3.3. Συγκριτική παρουσίαση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων

Τομέας εφαρμογής	Τι αναπαριστά το ψηφιακό δίδυμο	Ενδεικτικά δεδομένα	Κύριος σκοπός
Βιομηχανία	Μηχανές, γραμμές παραγωγής, διαδικασίες	Θερμοκρασία, δονήσεις, ρυθμός παραγωγής	Απόδοση και συντήρηση
Έξυπνα κτίρια	Χώροι, HVAC, φωτισμός, ενέργεια	Θερμοκρασία, παρουσία, κατανάλωση	Άνεση και εξοικονόμηση
Ενέργεια	Δίκτυα, μονάδες παραγωγής, φορτία	Παραγωγή, ζήτηση, κατάσταση εξοπλισμού	Σταθερότητα και βελτιστοποίηση
Έξυπνες πόλεις	Υποδομές, μεταφορές, περιβάλλον	Κυκλοφορία, αέρας, ενέργεια	Σχεδιασμός και αποφάσεις
Υγεία	Εξοπλισμός ή μοντέλα ασθενών	Μετρήσεις, εικόνες, ιστορικό	Παρακολούθηση και υποστήριξη διάγνωσης

Ο πίνακας συνοψίζει διαφορετικά πεδία εφαρμογής.

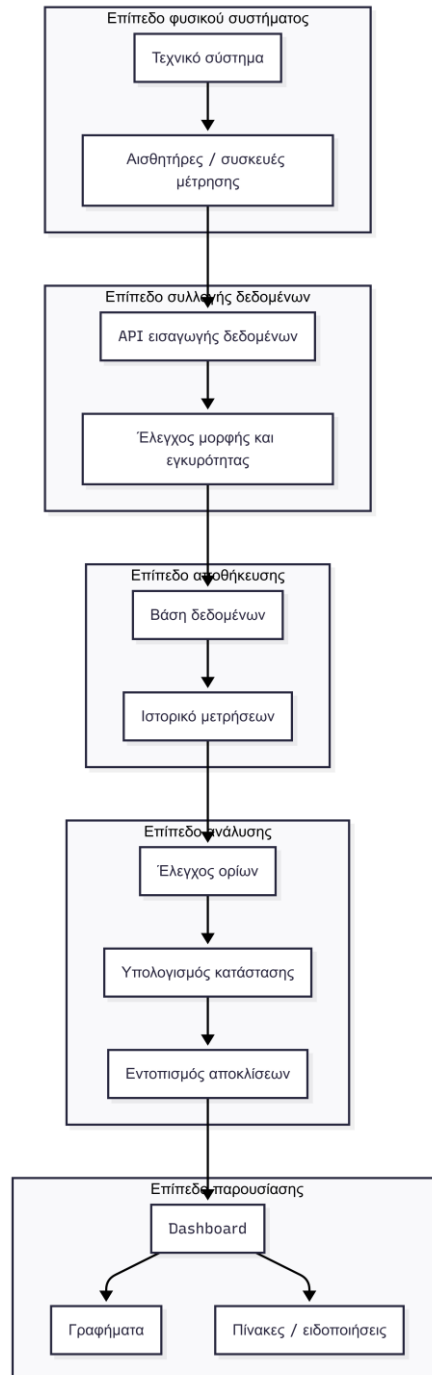
Κεφάλαιο 4ο: Αρχιτεκτονική συστήματος παρακολούθησης

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική του λογισμικού συστήματος που θα υποστηρίξει τη λειτουργία του ψηφιακού δίδυμου μας. Η αρχιτεκτονική αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο ανάμεσα στη θεωρητική έννοια του ψηφιακού δίδυμου και στην πραγματική υλοποίηση της εφαρμογής.

Στην παρούσα εργασία το σύστημα αντιμετωπίζεται ως ένα γενικό λογισμικό παρακολούθησης τεχνικής εγκατάστασης. Η εγκατάσταση μπορεί να είναι ένα μικρό βιομηχανικό σύστημα, ένας χώρος εργαστηρίου, ένας σταθμός μέτρησης, ένα ενεργειακό υποσύστημα ή οποιοδήποτε τεχνικό περιβάλλον στο οποίο παράγονται μετρήσιμα λειτουργικά δεδομένα. Η επιλογή αυτή δίνει ευελιξία στην εργασία διότι δεν περιορίζει το ψηφιακό δίδυμο σε μία μόνο εφαρμογή αλλά επιτρέπει τη σχεδίαση μιας υποδομής που μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές περιπτώσεις.

Η βασική ιδέα είναι ότι το φυσικό σύστημα παράγει δεδομένα λειτουργίας τα οποία συλλέγονται, ελέγχονται, αποθηκεύονται και τελικά παρουσιάζονται στον χρήστη μέσα από ένα περιβάλλον οπτικοποίησης. Παράλληλα, τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απλή ανάλυση, έλεγχο ορίων και αναγνώριση αποκλίσεων. Έτσι, το ψηφιακό δίδυμο δεν αποτελεί μόνο μια οθόνη προβολής τιμών αλλά μια οργανωμένη αναπαράσταση της κατάστασης και της συμπεριφοράς του συστήματος.

Η αρχιτεκτονική που προτείνεται ακολουθεί λογική πολυεπίπεδης οργάνωσης. Διακρίνεται το επίπεδο του φυσικού συστήματος, το επίπεδο συλλογής δεδομένων, το επίπεδο αποθήκευσης, το επίπεδο ανάλυσης και το επίπεδο διεπαφής χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε μέρος του συστήματος έχει συγκεκριμένο ρόλο και μπορεί να αναπτυχθεί ή να βελτιωθεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα.



Εικόνα 4.1. Γενική αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος ψηφιακού διδύμου

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η συνολική λογική της αρχιτεκτονικής. Το φυσικό σύστημα βρίσκεται στην αρχή της ροής και αποτελεί την πηγή των δεδομένων. Στη συνέχεια τα δεδομένα περνούν από μηχανισμούς συλλογής και μεταφέρονται στο λογισμικό μέσω κατάλληλης υπηρεσίας εισαγωγής. Η βάση δεδομένων κρατά το ιστορικό, ενώ το επίπεδο ανάλυσης και η διεπαφή χρήστη μετατρέπουν τις απλές μετρήσεις σε πληροφορία χρήσιμη για παρακολούθηση και λήψη αποφάσεων.

4.1 Γενική περιγραφή του προτεινόμενου συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο λογισμικών μερών που συνεργάζονται για να δημιουργήσουν μια ψηφιακή εικόνα ενός τεχνικού συστήματος. Η υλοποίηση μπορεί να δεχθεί δεδομένα είτε από πραγματικούς αισθητήρες είτε από δοκιμαστικά δεδομένα που δημιουργούνται για τις ανάγκες της πτυχιακής εργασίας. Η δυνατότητα χρήσης δοκιμαστικών δεδομένων είναι σημαντική επειδή επιτρέπει την ανάπτυξη και αξιολόγηση του λογισμικού χωρίς να απαιτείται απαραίτητα μόνιμη σύνδεση με πραγματική εγκατάσταση.

Σε λειτουργικό επίπεδο, το σύστημα πρέπει να επιτρέπει την καταχώριση τεχνικών συστημάτων, την περιγραφή των παραμέτρων που παρακολουθούνται, την αποθήκευση διαδοχικών μετρήσεων και την προβολή της τρέχουσας κατάστασης. Για παράδειγμα, ένα τεχνικό σύστημα μπορεί να έχει παραμέτρους όπως θερμοκρασία, υγρασία, στάθμη, πίεση, κατανάλωση ισχύος, τάση, ρεύμα, φωτεινότητα ή αριθμό συμβάντων. Κάθε παράμετρος συνδέεται με μονάδα μέτρησης, επιτρεπτά όρια και χρονική εξέλιξη.

Η τελευταία τιμή μιας παραμέτρου είναι χρήσιμη για άμεση εποπτεία όμως το ψηφιακό δίδυμο αποκτά μεγαλύτερη αξία όταν ο χρήστης μπορεί να δει την εξέλιξη μιας παραμέτρου στον χρόνο. Μέσα από ιστορικά γραφήματα μπορούν να εντοπιστούν τάσεις, επαναλαμβανόμενα μοτίβα και καταστάσεις που δεν είναι εμφανείς από μία μόνο μέτρηση.

Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη μηχανισμού κατάστασης. Το σύστημα δεν πρέπει να εμφανίζει μόνο αριθμητικές τιμές, αλλά να μετατρέπει τις τιμές σε κατανοητές ενδείξεις, όπως κανονική λειτουργία, προειδοποίηση ή κρίσιμη κατάσταση. Η μετάβαση από την απλή μέτρηση στην ένδειξη κατάστασης είναι κεντρικό στοιχείο του ψηφιακού διδύμου επειδή βοηθά τον χρήστη να αντιλαμβάνεται γρήγορα αν το φυσικό σύστημα λειτουργεί όπως αναμένεται. Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει τα βασικά μέρη του συστήματος.

Πίνακας 4.1. Βασικά μέρη του συστήματος και λειτουργικός ρόλος τους

Μέρος συστήματος	Ρόλος	Ενδεικτική λειτουργία
Φυσικό σύστημα	Πηγή λειτουργικών δεδομένων	Παράγει μετρήσεις ή καταστάσεις λειτουργίας
Αισθητήρες / πηγές δεδομένων	Συλλογή τιμών	Καταγράφουν θερμοκρασία, υγρασία, τάση, ρεύμα ή άλλα μεγέθη
Υπηρεσία εισαγωγής δεδομένων	Παραλαβή και έλεγχος δεδομένων	Δέχεται τιμές, ελέγχει τη μορφή και τις καταχωρίζει
Βάση δεδομένων	Αποθήκευση ιστορικού	Διατηρεί συστήματα, παραμέτρους, μετρήσεις και ειδοποιήσεις
Μονάδα ανάλυσης	Μετατροπή μετρήσεων σε πληροφορία	Ελέγχει όρια, υπολογίζει δείκτες και εντοπίζει αποκλίσεις
Διεπαφή χρήστη	Οπτικοποίηση και εποπτεία	Προβάλλει κάρτες κατάστασης, πίνακες, γραφήματα και ειδοποιήσεις

4.2 Πηγές δεδομένων και λειτουργικές παράμετροι

Οι πηγές δεδομένων αποτελούν το σημείο εκκίνησης για κάθε ψηφιακό δίδυμο. Χωρίς δεδομένα δεν μπορεί να υπάρξει πραγματική ή προσομοιωμένη ενημέρωση της ψηφιακής αναπαράστασης. Στην παρούσα

εργασία οι πηγές δεδομένων μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: πραγματικοί αισθητήρες, αρχεία ή δοκιμαστικές εγγραφές και χειροκίνητη εισαγωγή από τον χρήστη ή τον διαχειριστή.

Οι πραγματικοί αισθητήρες μπορούν να συνδέονται με μικροελεγκτές, ενσωματωμένα συστήματα ή άλλες διατάξεις συλλογής δεδομένων. Για παράδειγμα, ένα ESP32, ένα Raspberry Pi ή ένας τοπικός υπολογιστής μπορεί να στέλνει περιοδικά μετρήσεις προς την εφαρμογή. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να αποστέλλονται μέσω HTTP αιτήσεων, αρχείων, MQTT μηνυμάτων ή άλλου κατάλληλου μηχανισμού επικοινωνίας. Η λογική των δικτυακών αρχιτεκτονικών και των τυποποιημένων μηχανισμών ανταλλαγής δεδομένων είναι χρήσιμη σε τέτοια συστήματα [12], [13]. Το σημαντικό για την αρχιτεκτονική είναι ότι η εφαρμογή πρέπει να δέχεται δεδομένα με ενιαία μορφή, ανεξάρτητα από το πώς αυτά παράγονται.

Τα δοκιμαστικά δεδομένα είναι επίσης χρήσιμα, ειδικά για εκπαιδευτική και πειραματική υλοποίηση. Μπορούν να δημιουργούνται από το ίδιο το λογισμικό ή να εισάγονται από αρχείο, ώστε να προσομοιώνεται η λειτουργία μιας εγκατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να δοκιμαστούν σενάρια κανονικής λειτουργίας, σταδιακής μεταβολής, απότομης υπέρβασης ορίου ή εμφάνισης ανωμαλίας.

Κάθε λειτουργική παράμετρος πρέπει να περιγράφεται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Δεν αρκεί να αποθηκεύεται μόνο η αριθμητική τιμή. Χρειάζεται να είναι γνωστό το όνομα της παραμέτρου, η μονάδα μέτρησης, το σύστημα στο οποίο ανήκει, το επιτρεπτό εύρος τιμών και η χρονική στιγμή της μέτρησης. Η λογική αυτή συνδέεται και με πρότυπες προσεγγίσεις περιγραφής αισθητηριακών δεδομένων, όπως η SensorThings API [14]. Η οργάνωση αυτή επιτρέπει στο ψηφιακό δίδυμο να παρουσιάζει τα δεδομένα με κατανοητό τρόπο και να εκτελεί βασικούς ελέγχους.

Πίνακας 4.2. Ενδεικτικές λειτουργικές παράμετροι που μπορεί να παρακολουθεί το σύστημα

Κατηγορία	Παράμετρος	Μονάδα	Χρήση στο ψηφιακό δίδυμο
Περιβαλλοντικές συνθήκες	Θερμοκρασία	°C	Έλεγχος θερμικής κατάστασης χώρου ή εξοπλισμού
Περιβαλλοντικές συνθήκες	Υγρασία	%	Εκτίμηση συνθηκών λειτουργίας και πιθανών κινδύνων
Ηλεκτρικά μεγέθη	Τάση	V	Παρακολούθηση τροφοδοσίας ή ενεργειακού υποσυστήματος
Ηλεκτρικά μεγέθη	Ρεύμα	A	Εντοπισμός αυξημένης κατανάλωσης ή υπερφόρτωσης
Μηχανική λειτουργία	Πίεση ή στάθμη	bar / cm	Έλεγχος λειτουργίας αντλίας, δεξαμενής ή σωλήνωσης
Κατάσταση συστήματος	Συμβάν λειτουργίας	-	Καταγραφή ενεργοποίησης, διακοπής ή βλάβης

Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει παραδείγματα παραμέτρων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της εργασίας.

4.3 Ροή δεδομένων από το φυσικό στο ψηφιακό σύστημα

Η ροή των δεδομένων είναι ένα από τα πιο σημαντικά σημεία της αρχιτεκτονικής. Ένα ψηφιακό δίδυμο πρέπει να έχει σαφή μηχανισμό ενημέρωσης, ώστε η ψηφιακή αναπαράσταση να αντιστοιχεί όσο το

δυνατόν περισσότερο στην κατάσταση του φυσικού συστήματος. Η ενημέρωση αυτή μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο ή περιοδικά, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Στην απλούστερη μορφή, η ροή ξεκινά με τη δημιουργία μιας μέτρησης. Η μέτρηση περιλαμβάνει την τιμή, τη μονάδα, το αναγνωριστικό της παραμέτρου και τη χρονική σήμανση. Στη συνέχεια, η μέτρηση αποστέλλεται στο λογισμικό σύστημα, όπου ελέγχεται αν είναι σωστή και πλήρης. Αν λείπουν κρίσιμα στοιχεία ή αν η μορφή δεν είναι αποδεκτή τότε το σύστημα μπορεί να απορρίψει την εγγραφή ή να την καταγράψει ως προβληματική.

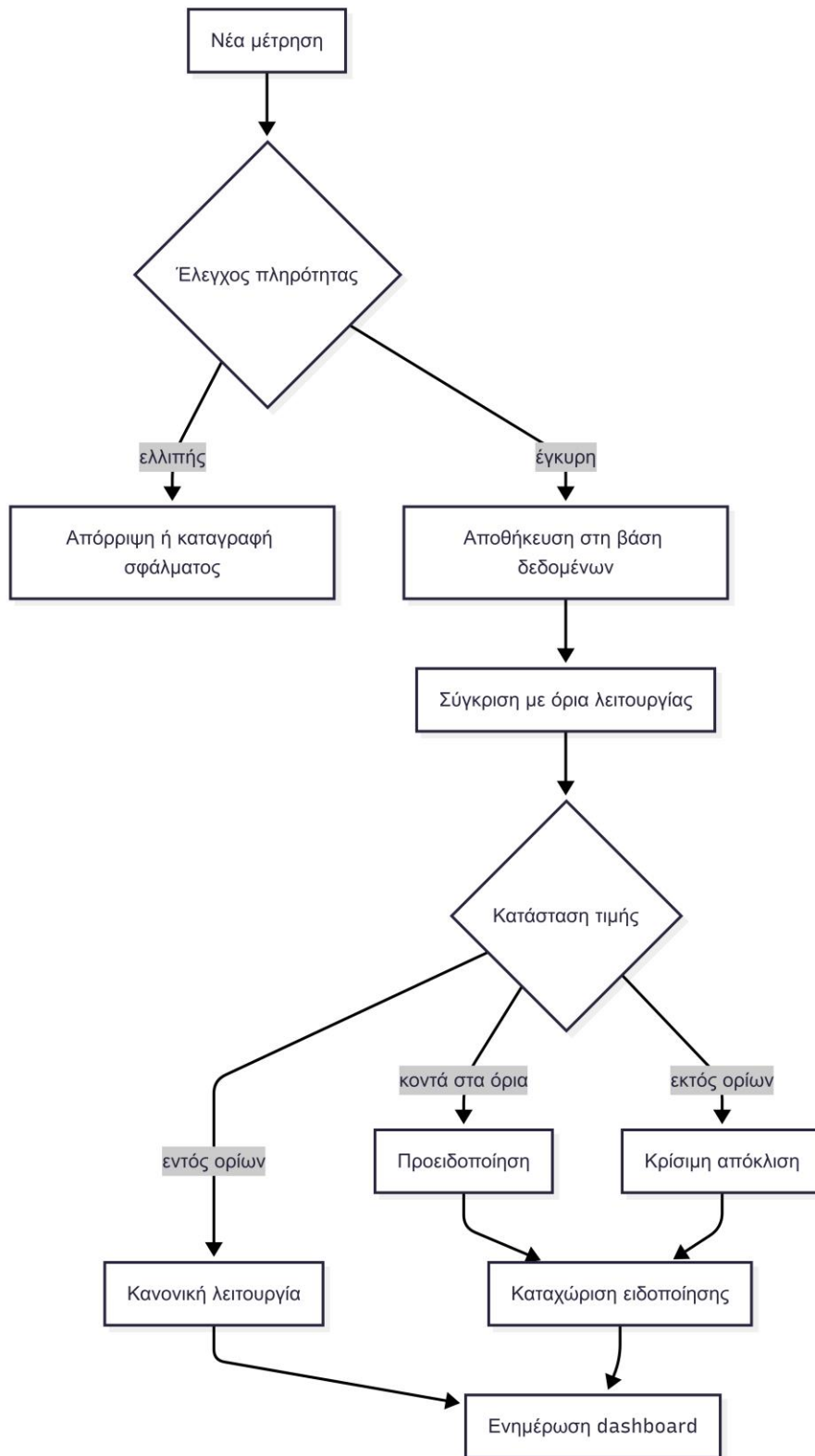
Μετά τον αρχικό έλεγχο, η μέτρηση αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων. Η αποθήκευση πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η εύκολη αναζήτηση ανά σύστημα, αισθητήρα, χρονική περίοδο και κατάσταση. Έπειτα, η εφαρμογή μπορεί να υπολογίσει αν η τιμή βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Αν η τιμή είναι φυσιολογική, ενημερώνεται η κατάσταση του ψηφιακού διδύμου. Αν υπάρχει υπέρβαση, δημιουργείται προειδοποίηση.

Η τελευταία φάση της ροής είναι η οπτικοποίηση. Ο χρήστης δεν χρειάζεται να δει μόνο τη γραμμή δεδομένων όπως αποθηκεύτηκε στη βάση. Χρειάζεται να δει την πληροφορία με τρόπο άμεσο και κατανοητό: χρώματα κατάστασης, γραφήματα μεταβολής, πίνακες τελευταίων μετρήσεων και ειδοποιήσεις. Η μετατροπή της ακατέργαστης μέτρησης σε οπτική πληροφορία είναι ουσιαστικό μέρος της λειτουργίας του ψηφιακού διδύμου.

Πίνακας 4.3. Στάδια ροής δεδομένων στο προτεινόμενο σύστημα

Στάδιο	Περιγραφή	Έλεγχος / αποτέλεσμα
Δημιουργία μέτρησης	Ο αισθητήρας ή η προσομοίωση παράγει νέα τιμή	Υπάρχει τιμή, χρόνος και αναγνωριστικό παραμέτρου
Μεταφορά στο λογισμικό	Η τιμή αποστέλλεται προς την εφαρμογή	Έλεγχος μορφής και πληρότητας
Αποθήκευση	Η μέτρηση καταχωρίζεται στη βάση	Διατήρηση ιστορικού για μελλοντική ανάλυση
Έλεγχος ορίων	Η τιμή συγκρίνεται με αποδεκτά όρια	Κανονική λειτουργία, προειδοποίηση ή κρίσιμη κατάσταση
Οπτικοποίηση	Η πληροφορία εμφανίζεται στον χρήστη	Κάρτες, πίνακες, γραφήματα και ειδοποιήσεις

Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται ότι η πληροφορία δεν μεταφέρεται απλώς από το φυσικό σύστημα προς την οθόνη. Παρεμβάλλονται στάδια ελέγχου, αποθήκευσης και ανάλυσης. Αυτό είναι σημαντικό, διότι επιτρέπει στο λογισμικό να διατηρεί ιστορικό, να εντοπίζει σφάλματα και να υποστηρίζει πιο αξιόπιστη παρακολούθηση.



Εικόνα 4.2. Ροή δεδομένων από τη μέτρηση έως την ένδειξη κατάστασης

4.4 Βάση δεδομένων και αποθήκευση μετρήσεων

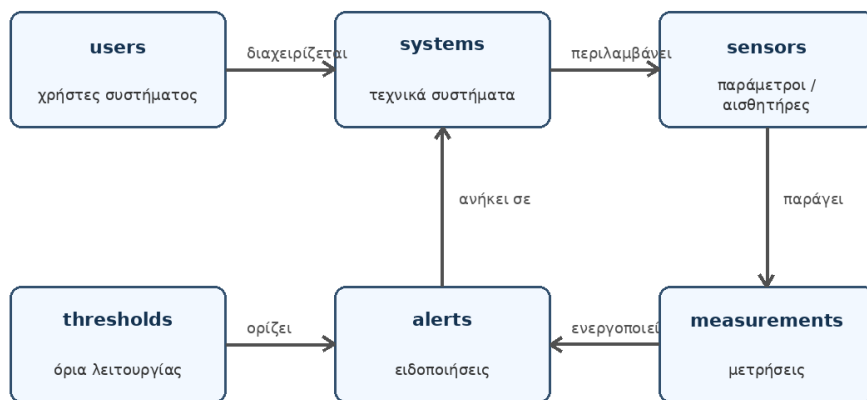
Η βάση δεδομένων είναι το κεντρικό σημείο αποθήκευσης του συστήματος. Σε μια εφαρμογή ψηφιακού δίδυμου, η βάση δεν χρησιμοποιείται μόνο για να κρατά απλά δεδομένα χρήστη, αλλά για να αποτυπώνει τη λειτουργική ιστορία του τεχνικού συστήματος. Κάθε μέτρηση που αποθηκεύεται αποτελεί ένα μικρό στιγμιότυπο της κατάστασης του φυσικού συστήματος σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Η σχεδίαση της βάσης πρέπει να υποστηρίζει βασικές οντότητες, όπως χρήστες, τεχνικά συστήματα, αισθητήρες ή παραμέτρους, μετρήσεις, όρια λειτουργίας και ειδοποιήσεις. Ο χρήστης μπορεί να διαχειρίζεται ένα ή περισσότερα συστήματα, κάθε σύστημα μπορεί να έχει πολλές παραμέτρους και κάθε παράμετρος μπορεί να έχει πολλές μετρήσεις. Παράλληλα, τα όρια λειτουργίας βοηθούν στον χαρακτηρισμό των τιμών ως φυσιολογικών ή μη φυσιολογικών.

Η ύπαρξη ιστορικού μετρήσεων επιτρέπει την παραγωγή γραφημάτων και στατιστικών. Για παράδειγμα, μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή μιας παραμέτρου για μια χρονική περίοδο, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή, ο αριθμός υπερβάσεων ή η διάρκεια μιας μη φυσιολογικής κατάστασης. Ακόμη και απλές στατιστικές λειτουργίες μπορούν να προσφέρουν σημαντική πληροφορία στον χρήστη.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η χρονική σήμανση. Κάθε μέτρηση πρέπει να συνοδεύεται από ημερομηνία και ώρα, ώστε να είναι δυνατή η αναπαράσταση της χρονικής εξέλιξης. Χωρίς χρονική σήμανση, το σύστημα θα μπορούσε να εμφανίζει μόνο στιγμιαίες τιμές και όχι πραγματικό ιστορικό λειτουργίας.

Ενδεικτική λογική οργάνωση βάσης δεδομένων



Εικόνα 4.3. Ενδεικτική λογική οργάνωση βάσης δεδομένων για το ψηφιακό δίδυμο

Η Εικόνα 4.3 παρουσιάζει ενδεικτικά τη λογική οργάνωση της βάσης δεδομένων. Το διάγραμμα δεν αποτελεί απαραίτητα το τελικό φυσικό σχήμα της βάσης, αλλά δείχνει τις βασικές οντότητες που απαιτούνται για να λειτουργήσει το σύστημα παρακολούθησης με τρόπο οργανωμένο και επεκτάσιμο.

4.5 Διασύνδεση χρήστη και συστήματος

Η διεπαφή χρήστη είναι το σημείο μέσα από το οποίο ο χρήστης αντιλαμβάνεται το ψηφιακό δίδυμο. Ακόμη και αν η συλλογή και η αποθήκευση δεδομένων λειτουργούν σωστά, το σύστημα δεν θα είναι πρακτικά χρήσιμο αν η πληροφορία δεν παρουσιάζεται με καθαρό και οργανωμένο τρόπο. Για τον λόγο αυτό, η διεπαφή πρέπει να είναι απλή και κατανοητή και προσανατολισμένη στην άμεση εποπτεία.

Η αρχική οθόνη του χρήστη μπορεί να περιλαμβάνει συνοπτικές κάρτες κατάστασης. Κάθε κάρτα μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα τεχνικό σύστημα ή σε μια βασική παράμετρο και να εμφανίζει την τελευταία τιμή, τη μονάδα μέτρησης, την ώρα ενημέρωσης και το χρώμα κατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης αποκτά γρήγορα εικόνα για το αν το σύστημα λειτουργεί κανονικά ή αν υπάρχει κάποια προειδοποίηση.

Επίσης τα γραφήματα βοηθούν στην κατανόηση της χρονικής εξέλιξης των δεδομένων και στην αναγνώριση τάσεων. Για παράδειγμα μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να είναι σημαντική ακόμη και αν η τιμή δεν έχει ξεπεράσει ακόμη το κρίσιμο όριο. Το γράφημα επιτρέπει στον χρήστη να δει αυτή τη μεταβολή πριν γίνει σοβαρό πρόβλημα.

Η διεπαφή πρέπει επίσης να περιλαμβάνει πίνακα τελευταίων μετρήσεων και λίστα ειδοποιήσεων. Ο πίνακας μετρήσεων δίνει πιο αναλυτική εικόνα, ενώ οι ειδοποιήσεις βοηθούν στον γρήγορο εντοπισμό συμβάντων. Για εκπαιδευτικούς σκοπούς είναι χρήσιμο να υπάρχει και σελίδα διαχείρισης ορίων ώστε ο χρήστης να μπορεί να δει πώς η αλλαγή των ορίων επηρεάζει τον χαρακτηρισμό μιας μέτρησης.

4.6 Αρχές επεκτασιμότητας και ασφάλειας

Το σύστημα πρέπει να μπορεί να δεχθεί περισσότερα τεχνικά συστήματα και περισσότερους αισθητήρες και μεγαλύτερο όγκο δεδομένων χωρίς να απαιτείται πλήρης επανασχεδίαση. Η επεκτασιμότητα, η αξιοπιστία, η συντηρησιμότητα και η ασφάλεια συνδέονται με βασικά χαρακτηριστικά ποιότητας λογισμικού [15]. Η χρήση ξεκάθαρων οντοτήτων στη βάση δεδομένων και διακριτών λειτουργικών υπομονάδων βοηθά σε αυτή την κατεύθυνση.

Η επεκτασιμότητα αφορά και τη δυνατότητα προσθήκης νέων λειτουργιών και στο αρχικό στάδιο, ο εντοπισμός ανωμαλιών μπορεί να βασίζεται σε απλά όρια. Σε μελλοντική έκδοση θα μπορούσαν να προστεθούν πιο σύνθετες μέθοδοι, όπως υπολογισμός κινούμενου μέσου όρου, στατιστική απόκλιση ή αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Η αρχιτεκτονική πρέπει να επιτρέπει τέτοιες επεκτάσεις χωρίς να αλλάζει ο βασικός τρόπος αποθήκευσης και προβολής των δεδομένων.

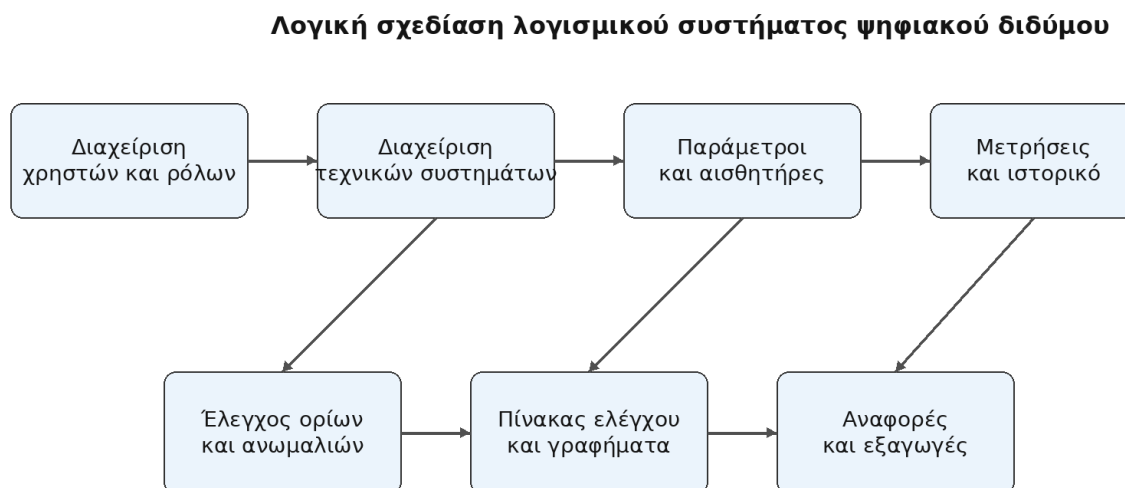
Η ασφάλεια είναι επίσης σημαντική ακόμη και σε ένα πρωτότυπο σύστημα και ο χρήστης πρέπει να έχει πρόσβαση μόνο στα δεδομένα που τον αφορούν, ενώ οι λειτουργίες διαχείρισης πρέπει να περιορίζονται σε εξουσιοδοτημένους χρήστες.

Πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για ποιότητα δεδομένων και λανθασμένες, ελλιπείς ή ακραίες τιμές μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένη εικόνα του ψηφιακού διδύμου. Για αυτόν τον λόγο το σύστημα πρέπει να ελέγχει αν οι τιμές είναι αριθμητικές, αν ανήκουν σε λογικό εύρος και αν συνοδεύονται από τα απαραίτητα στοιχεία. Η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιοπιστία της ψηφιακής αναπαράστασης.

Κεφάλαιο 5ο: Σχεδίαση του λογισμικού συστήματος

Η σχεδίαση του λογισμικού είναι κρίσιμη, επειδή καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης θα αλληλεπιδρά με την ψηφιακή αναπαράσταση του τεχνικού συστήματος. Το ψηφιακό δίδυμο δεν είναι μόνο μια βάση με μετρήσεις ούτε μόνο μια σελίδα με γραφήματα. Είναι ένα οργανωμένο σύστημα που συνδέει δεδομένα, κανόνες, οπτικοποιήσεις και ενδείξεις κατάστασης ώστε να υποστηρίζει την κατανόηση της λειτουργίας μιας εγκατάστασης.

Η σχεδίαση πρέπει να είναι αρκετά απλή ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί και να παρουσιαστεί ολοκληρωμένα αλλά ταυτόχρονα αρκετά γενική ώστε να μπορεί να επεκταθεί σε πραγματικές εγκαταστάσεις, με πραγματικούς αισθητήρες, μεγαλύτερο πλήθος δεδομένων και περισσότερους χρήστες. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται τα βασικά λογισμικά μέρη της εφαρμογής.



Κάθε υποσύστημα υλοποιείται ανεξάρτητα, αλλά ανταλλάσσει δεδομένα μέσω κοινής βάσης και ελεγχόμενων λειτουργιών.

Εικόνα 5.1. Λογική σχεδίαση λογισμικού συστήματος ψηφιακού διδύμου

5.1 Απαιτήσεις συστήματος

Οι απαιτήσεις συστήματος περιγράφουν τι πρέπει να μπορεί να κάνει η εφαρμογή και ποια χαρακτηριστικά πρέπει να διαθέτει. Στην περίπτωση ενός ψηφιακού διδύμου, οι απαιτήσεις δεν περιορίζονται στη διαχείριση χρηστών ή στην απλή αποθήκευση μετρήσεων. Περιλαμβάνουν τη δυνατότητα οργάνωσης τεχνικών συστημάτων, την παρακολούθηση λειτουργικών παραμέτρων, την παραγωγή γραφημάτων, τον έλεγχο ορίων και την παρουσίαση κατάστασης στον χρήστη.

Οι λειτουργικές απαιτήσεις αφορούν συγκεκριμένες ενέργειες της εφαρμογής. Για παράδειγμα, ο διαχειριστής πρέπει να μπορεί να καταχωρίζει ένα τεχνικό σύστημα, να ορίζει παραμέτρους παρακολούθησης και να καθορίζει όρια κανονικής λειτουργίας. Ο απλός χρήστης πρέπει να μπορεί να

βλέπει τις τελευταίες μετρήσεις, να παρακολουθεί την κατάσταση του συστήματος και να ενημερώνεται όταν μια τιμή ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια.

Οι μη λειτουργικές απαιτήσεις αφορούν την ποιότητα της εφαρμογής. Τέτοιες απαιτήσεις είναι η ευχρηστία, η αξιοπιστία, η ασφάλεια, η επεκτασιμότητα και η διατηρησιμότητα. Για ένα σύστημα παρακολούθησης, η αξιοπιστία είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή ο χρήστης πρέπει να εμπιστεύεται τις ενδείξεις που εμφανίζονται. Παράλληλα, η διεπαφή πρέπει να είναι απλή και κατανοητή, ώστε ο χρήστης να μπορεί να εντοπίζει γρήγορα την κατάσταση του συστήματος.

Πίνακας 5.1. Βασικές λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος

Απαίτηση	Περιγραφή	Σκοπός
Καταχώριση τεχνικού συστήματος	Δημιουργία εγγραφής για εγκατάσταση, μηχανήμα ή υποσύστημα που θα παρακολουθείται.	Οργάνωση του φυσικού αντικειμένου στο ψηφιακό περιβάλλον.
Ορισμός παραμέτρων	Καθορισμός μετρούμενων μεγεθών, μονάδων μέτρησης και επιτρεπτών ορίων.	Περιγραφή της λειτουργίας που θα αναλυθεί.
Εισαγωγή μετρήσεων	Αποθήκευση τιμών είτε από πραγματική πηγή είτε από δοκιμαστικά δεδομένα.	Δημιουργία ιστορικού λειτουργίας.
Οπτικοποίηση δεδομένων	Παρουσίαση καρτών, πινάκων και γραφημάτων.	Γρήγορη κατανόηση της κατάστασης.
Εντοπισμός αποκλίσεων	Έλεγχος αν οι τιμές βρίσκονται εκτός ορίων ή εμφανίζουν ασυνήθιστη συμπεριφορά.	Έγκαιρη ενημέρωση του χρήστη.
Ιστορικό και αναφορές	Προβολή παλαιότερων μετρήσεων και εξαγωγή συνοπτικών αποτελεσμάτων.	Υποστήριξη ανάλυσης και τεκμηρίωσης.

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις βασικές λειτουργικές απαιτήσεις.

Πίνακας 5.2. Μη λειτουργικές απαιτήσεις και σημασία τους για το ψηφιακό δίδυμο

Απαίτηση ποιότητας	Ερμηνεία στην εφαρμογή	Ενδεικτικός τρόπος υποστήριξης
Ευχρηστία	Ο χρήστης πρέπει να καταλαβαίνει άμεσα την κατάσταση του συστήματος.	Καθαρό dashboard, χρωματικές ενδείξεις, απλά φίλτρα.
Αξιοπιστία	Τα δεδομένα και οι ενδείξεις πρέπει να είναι συνεπή.	Έλεγχος τιμών, χρονική σήμανση, αποφυγή διπλών εγγραφών.
Ασφάλεια	Πρόσβαση μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες.	Σύνδεση χρήστη, ρόλοι, περιορισμός ενεργειών.

Επεκτασιμότητα	Δυνατότητα προσθήκης νέων συστημάτων και παραμέτρων.	Γενικό μοντέλο βάσης και παραμετροποιήσιμα όρια.
Διατηρησιμότητα	Ο κώδικας πρέπει να μπορεί να διορθώνεται και να επεκτείνεται.	Διαχωρισμός λειτουργιών και καθαρή οργάνωση αρχείων.

5.2 Ρόλοι χρηστών και λειτουργίες

Η ύπαρξη ρόλων χρηστών επιτρέπει την οργάνωση των δικαιωμάτων πρόσβασης. Δεν χρειάζεται κάθε χρήστης να μπορεί να εκτελεί όλες τις λειτουργίες. Σε ένα σύστημα ψηφιακού διδύμου, άλλες ανάγκες έχει ο διαχειριστής που ρυθμίζει την εφαρμογή και άλλες ο απλός χρήστης που παρακολουθεί την κατάσταση μιας εγκατάστασης.

Στην προτεινόμενη σχεδίαση προβλέπονται δύο βασικοί ρόλοι: ο διαχειριστής και ο χρήστης παρακολούθησης. Ο διαχειριστής έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί και να τροποποιεί τεχνικά συστήματα, να ορίζει παραμέτρους, να εισάγει ή να διαχειρίζεται δεδομένα και να καθορίζει τα όρια λειτουργίας. Ο χρήστης παρακολούθησης έχει κυρίως δικαίωμα προβολής, ανάλυσης και ενημέρωσης για ειδοποιήσεις.

Η διάκριση αυτή κάνει την εφαρμογή πιο ασφαλή και πιο απλή στη χρήση. Ο χρήστης που ενδιαφέρεται μόνο για την παρακολούθηση δεν βλέπει περιττές επιλογές διαχείρισης, ενώ ο διαχειριστής έχει συγκεντρωμένα τα εργαλεία παραμετροποίησης. Σε μελλοντική επέκταση μπορούν να προστεθούν και άλλοι ρόλοι, όπως τεχνικός συντήρησης ή επισκέπτης με περιορισμένη πρόσβαση.

Πίνακας 5.3. Ρόλοι χρηστών και βασικές λειτουργίες

Ρόλος	Βασικές δυνατότητες	Περιορισμοί
Διαχειριστής	Διαχείριση χρηστών, τεχνικών συστημάτων, παραμέτρων, ορίων, δεδομένων και ειδοποιήσεων.	Πρέπει να χρησιμοποιεί με προσοχή τις λειτουργίες διαγραφής και τροποποίησης.
Χρήστης παρακολούθησης	Προβολή dashboard, γραφημάτων, τελευταίων μετρήσεων, ειδοποιήσεων και ιστορικού.	Δεν τροποποιεί κρίσιμες ρυθμίσεις του συστήματος.
Μελλοντικός τεχνικός ρόλος	Προβολή συμβάντων, καταγραφή ενεργειών συντήρησης και σχολίων.	Περιορισμένη πρόσβαση σε διαχειριστικές ρυθμίσεις.
Μελλοντικός επισκέπτης	Προβολή μόνο βασικών δημόσιων ενδείξεων ή demo δεδομένων.	Καμία πρόσβαση σε ευαίσθητα ή πλήρη δεδομένα.

Ο Πίνακας 5.3 δείχνει ότι οι ρόλοι δεν είναι απλώς τυπική προσθήκη, αλλά επηρεάζουν ουσιαστικά τη σχεδίαση της διεπαφής και της λογικής του συστήματος. Με την κατάλληλη κατανομή δικαιωμάτων, η εφαρμογή γίνεται πιο ασφαλής και πιο κατανοητή.

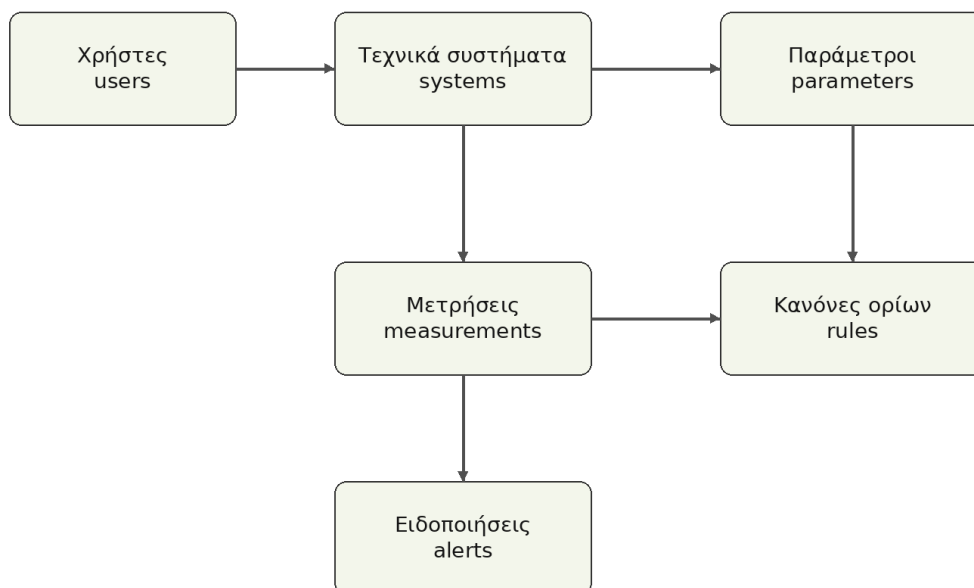
5.3 Σχεδίαση βάσης δεδομένων

Η βάση δεδομένων αποτελεί τον πυρήνα του λογισμικού συστήματος. Σε αυτή αποθηκεύονται τα τεχνικά συστήματα, οι παράμετροι παρακολούθησης, οι μετρήσεις, τα όρια και οι ειδοποιήσεις. Η σωστή σχεδίαση της βάσης είναι απαραίτητη επειδή επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα αναζήτησης, την αξιοπιστία των δεδομένων και τη δυνατότητα παραγωγής γραφημάτων και αναφορών.

Η σχεδίαση πρέπει να είναι γενική και όχι δεσμευμένη σε ένα μόνο είδος τεχνικού συστήματος. Για παράδειγμα, η ίδια εφαρμογή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση ενός εργαστηριακού συστήματος, μιας μικρής εγκατάστασης, ενός μηχανήματος ή ενός IoT κόμβου. Για τον λόγο αυτό, οι παράμετροι πρέπει να ορίζονται δυναμικά και να μην είναι σταθερά ενσωματωμένες στον κώδικα.

Μια βασική αρχή είναι ο διαχωρισμός ανάμεσα στο τεχνικό σύστημα, την παράμετρο και τη μέτρηση. Το τεχνικό σύστημα περιγράφει τι παρακολουθείται. Η παράμετρος περιγράφει ποιο μέγεθος μετράται και η μέτρηση αποθηκεύει την τιμή της παραμέτρου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με αυτόν τον τρόπο, η εφαρμογή μπορεί να υποστηρίξει πολλά συστήματα και πολλές παραμέτρους χωρίς αλλαγή στη βασική δομή.

Ενδεικτικό μοντέλο οντοτήτων της εφαρμογής



Οι οντότητες συνδέουν το φυσικό σύστημα, τις παραμέτρους, τις μετρήσεις και τις ειδοποιήσεις σε ένα ενιαίο ιστορικό.

Εικόνα 5.2. Ενδεικτικό μοντέλο οντοτήτων της εφαρμογής

Η Εικόνα 5.2 παρουσιάζει ένα ενδεικτικό μοντέλο οντοτήτων. Το σχήμα δείχνει ότι οι μετρήσεις δεν αποθηκεύονται απομονωμένα, αλλά συνδέονται με συγκεκριμένο τεχνικό σύστημα και συγκεκριμένη παράμετρο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει φιλτράρισμα ανά σύστημα, ανά παράμετρο και ανά χρονική περίοδο.

Πίνακας 5.4. Ενδεικτικοί πίνακες βάσης δεδομένων και βασικά πεδία

Πίνακας	Ενδεικτικά πεδία	Ρόλος στο σύστημα
users	id, name, email, password, role	Αποθήκευση στοιχείων χρηστών και ρόλων πρόσβασης.
systems	id, name, description, location, status	Περιγραφή των τεχνικών συστημάτων που παρακολουθούνται.
parameters	id, system_id, name, unit, min_limit, max_limit	Ορισμός των μεγεθών που παρακολουθούνται για κάθε σύστημα.
measurements	id, parameter_id, value, measured_at	Αποθήκευση ιστορικών τιμών και χρονικής σήμανσης.
alerts	id, measurement_id, type, message, created_at, resolved	Καταγραφή ειδοποιήσεων και αποκλίσεων.
system_logs	id, user_id, action, details, created_at	Καταγραφή βασικών ενεργειών για ιχνηλασιμότητα.

Ο Πίνακας 5.4 αποτελεί ενδεικτική πρόταση και μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με την τελική τεχνολογία υλοποίησης.

5.5 Τεχνολογίες υλοποίησης

Η επιλογή τεχνολογιών πρέπει να εξυπηρετεί τον σκοπό της εργασίας: την ανάπτυξη ενός λειτουργικού λογισμικού συστήματος παρακολούθησης και ανάλυσης δεδομένων. Για την υλοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια τυπική web αρχιτεκτονική, όπου ο χρήστης αλληλεπιδρά με την εφαρμογή μέσω φυλλομετρητή, ενώ τα δεδομένα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων στον εξυπηρετητή.

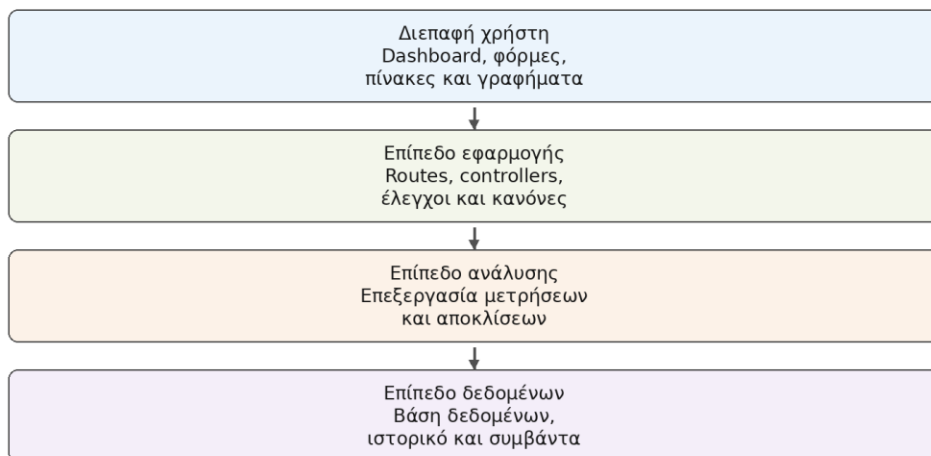
Στο επίπεδο του server μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πλαίσιο ανάπτυξης web εφαρμογών, όπως Flask, Django ή Laravel, ανάλογα με την τελική επιλογή υλοποίησης. Η βάση δεδομένων μπορεί να είναι MySQL ή άλλη σχεσιακή βάση, επειδή η οργάνωση των τεχνικών συστημάτων, παραμέτρων και μετρήσεων ταιριάζει σε σχεσιακή λογική. Για την εμφάνιση γραφημάτων μπορούν να αξιοποιηθούν βιβλιοθήκες JavaScript, όπως Chart.js ή αντίστοιχες λύσεις.

Κεφάλαιο 6ο: Υλοποίηση του ψηφιακού διδύμου

Στο πλαίσιο της πτυχιακής το ψηφιακό δίδυμο αντιμετωπίζεται ως ένα λογισμικό σύστημα που μπορεί να αναπαριστά ψηφιακά τη λειτουργία ενός τεχνικού συστήματος ή μιας εγκατάστασης. Το φυσικό σύστημα μπορεί να είναι πραγματικό ή προσομοιωμένο. Στην περίπτωση πραγματικού συστήματος, τα δεδομένα προέρχονται από αισθητήρες ή άλλες συσκευές συλλογής μετρήσεων. Στην περίπτωση προσομοίωσης, τα δεδομένα δημιουργούνται δοκιμαστικά ώστε να ελεγχθεί η λειτουργία της εφαρμογής χωρίς να απαιτείται υποχρεωτικά πλήρης εργαστηριακή εγκατάσταση.

Η υλοποίηση οργανώνεται σε επιμέρους λειτουργικές ενότητες. Κάθε ενότητα έχει συγκεκριμένο ρόλο, όπως η διαχείριση τεχνικών συστημάτων, η καταχώρηση παραμέτρων, η αποθήκευση μετρήσεων, η δημιουργία γραφημάτων και η παραγωγή ειδοποιήσεων. Με αυτόν τον τρόπο, η εφαρμογή δεν αποτελεί απλώς μια στατική προβολή δεδομένων αλλά ένα ολοκληρωμένο εργαλείο παρακολούθησης και ανάλυσης.

Υλοποίηση λογισμικού ψηφιακού διδύμου



Η υλοποίηση οργανώνεται σε διακριτά επίπεδα, ώστε η εφαρμογή να είναι πιο καθαρή, συντηρήσιμη και επεκτάσιμη.

Εικόνα 6.1. Επίπεδα υλοποίησης λογισμικού ψηφιακού διδύμου

Η Εικόνα 6.1 παρουσιάζει τη λογική οργάνωση της υλοποίησης σε επίπεδα. Η διάκριση αυτή βοηθά ώστε κάθε τμήμα της εφαρμογής να έχει σαφή ρόλο. Η διεπαφή χρήστη επικοινωνεί με το επίπεδο εφαρμογής, το επίπεδο εφαρμογής χειρίζεται τους κανόνες και τις λειτουργίες ενώ το επίπεδο δεδομένων αποθηκεύει μόνιμα τις πληροφορίες που παράγονται από το σύστημα.

6.1 Περιβάλλον και τεχνολογίες υλοποίησης

Η υλοποίηση ενός συστήματος ψηφιακού διδύμου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές τεχνολογίες. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση σε μια web εφαρμογή, επειδή η πρόσβαση μέσω φυλλομετρητή είναι εύκολη και δεν απαιτεί εγκατάσταση ειδικού λογισμικού στον υπολογιστή του χρήστη και επιτρέπει την κεντρική αποθήκευση των δεδομένων.

Το backend της εφαρμογής αναλαμβάνει τη διαχείριση των αιτημάτων, την επικοινωνία με τη βάση δεδομένων, τον έλεγχο των τιμών και την παραγωγή των αποτελεσμάτων που εμφανίζονται στον χρήστη.

Το frontend αναλαμβάνει την παρουσίαση των δεδομένων σε φιλική μορφή. Η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται για την αποθήκευση τεχνικών συστημάτων, παραμέτρων, μετρήσεων, κανόνων ορίων και των ειδοποιήσεων.

Για εκπαιδευτικούς και πρακτικούς λόγους, η υλοποίηση πρέπει να είναι απλή, κατανοητή και επεκτάσιμη. Δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ιδιαίτερα σύνθετες τεχνολογίες, εφόσον ο στόχος της εργασίας είναι να παρουσιαστεί ολοκληρωμένα η λογική ενός ψηφιακού διδύμου και όχι να αναπτυχθεί βιομηχανικό προϊόν μεγάλης κλίμακας.

Πίνακας 6.1. Τεχνολογίες που αξιοποιούνται στην υλοποίηση του συστήματος

Επίπεδο	Ενδεικτική τεχνολογία	Ρόλος στην εφαρμογή
Backend	Python Flask ή αντίστοιχο web framework	Διαχείριση αιτημάτων, επιχειρησιακή λογική, έλεγχος δεδομένων
Database	MySQL / MariaDB	Αποθήκευση συστημάτων, παραμέτρων, μετρήσεων και ειδοποιήσεων
Frontend	HTML, CSS, Bootstrap	Δημιουργία φιλικής και responsive διεπαφής χρήστη
Γραφήματα	Chart.js ή παρόμοια βιβλιοθήκη	Οπτικοποίηση χρονικών σειρών και λειτουργικών δεικτών
Ανάλυση δεδομένων	Python / απλοί κανόνες ελέγχου	Υπολογισμός μέσων τιμών, αποκλίσεων και ειδοποιήσεων

Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τις βασικές τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

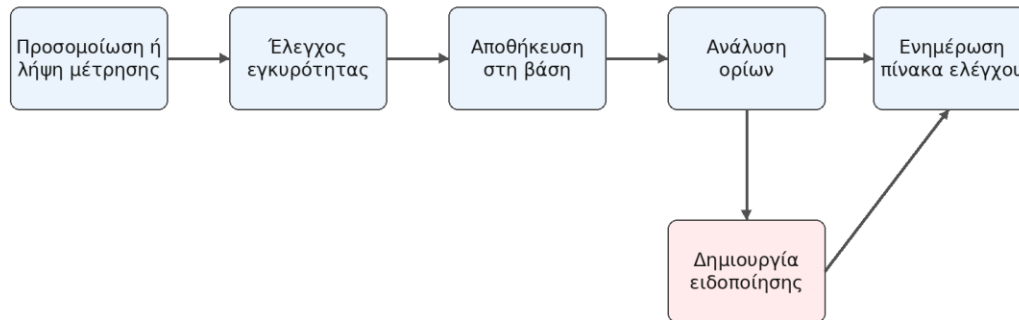
6.3 Εισαγωγή, αποθήκευση και ενημέρωση δεδομένων

Κάθε μέτρηση πρέπει να συσχετίζεται με συγκεκριμένο τεχνικό σύστημα, συγκεκριμένη παράμετρο και συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Χωρίς αυτή τη σύνδεση, τα δεδομένα χάνουν την αξία τους επειδή δεν μπορούν να ερμηνευθούν σωστά.

Η εφαρμογή μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικούς τρόπους εισαγωγής δεδομένων και ο πιο απλός τρόπος είναι η χειροκίνητη εισαγωγή από φόρμα και αυτό είναι χρήσιμο για δοκιμές και για μικρές εφαρμογές. Ένας πιο προχωρημένος τρόπος είναι η λήψη δεδομένων μέσω API, όπου μια εξωτερική συσκευή ή ένας κόμβος IoT στέλνει μετρήσεις στο σύστημα.

Κατά την αποθήκευση μιας μέτρησης πρέπει να γίνεται βασικός έλεγχος εγκυρότητας και για παράδειγμα πρέπει να ελέγχεται αν η παράμετρος υπάρχει, αν η τιμή είναι αριθμητική, αν η ημερομηνία είναι σωστή και αν η μέτρηση ανήκει σε ενεργό τεχνικό σύστημα. Μετά την αποθήκευση η μέτρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενημέρωση γραφημάτων και για έλεγχο αποκλίσεων.

Ροή υλοποίησης από τη μέτρηση έως την ειδοποίηση



Η ίδια ροή μπορεί να λειτουργεί είτε με πραγματικά δεδομένα αισθητήρων είτε με δοκιμαστικά δεδομένα κατά την ανάπτυξη.

Εικόνα 6.2. Ροή υλοποίησης από τη μέτρηση έως την ειδοποίηση

Η Εικόνα 6.2 δείχνει την ακολουθία ενεργειών από τη στιγμή που δημιουργείται ή λαμβάνεται μια μέτρηση μέχρι την ενημέρωση του πίνακα ελέγχου. Η ίδια ροή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε πραγματικές μετρήσεις όσο και σε προσομοιωμένες τιμές κάτι που βοηθά σημαντικά κατά τη φάση ανάπτυξης και δοκιμών.

Πίνακας 6.2. Ενδεικτική δομή εγγραφής μέτρησης

Πεδίο μέτρησης	Περιγραφή	Παράδειγμα
measurement_id	Μοναδικός κωδικός μέτρησης	1254
system_id	Σύνδεση με το τεχνικό σύστημα	3
parameter_id	Σύνδεση με την παράμετρο	θερμοκρασία
value	Αριθμητική τιμή μέτρησης	31.7
unit	Μονάδα μέτρησης	°C
measured_at	Χρονική στιγμή μέτρησης	28-05-2026 10:15
status	Κατάσταση μετά τον έλεγχο	normal / warning / critical

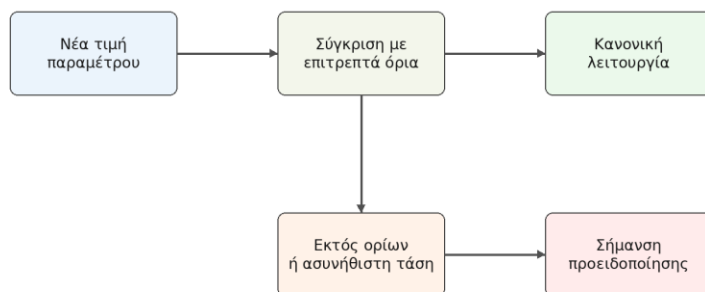
6.5 Υλοποίηση μηχανισμού εντοπισμού αποκλίσεων

Ο εντοπισμός αποκλίσεων είναι ένα από τα βασικά στοιχεία που διαφοροποιούν το ψηφιακό δίδυμο από μια απλή εφαρμογή καταγραφής μετρήσεων. Η εφαρμογή δεν περιορίζεται στην αποθήκευση των τιμών, αλλά τις αξιολογεί σε σχέση με προκαθορισμένα όρια ή απλούς κανόνες λειτουργίας.

Στην πιο απλή μορφή του, ο μηχανισμός ελέγχει αν μια τιμή βρίσκεται κάτω από το ελάχιστο ή πάνω από το μέγιστο επιτρεπτό όριο και αν η τιμή βρίσκεται εντός ορίων την λέμε κανονική. Αν βρίσκεται κοντά στο όριο, μπορεί να χαρακτηριστεί ως προειδοποίηση. Αν υπερβαίνει σημαντικά το όριο μπορεί να χαρακτηριστεί ως κρίσιμη κατάσταση.

Εκτός από τον απλό έλεγχο ορίων, μπορεί να γίνει και βασικός έλεγχος τάσης όπως αν η θερμοκρασία αυξάνεται συνεχώς για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμη και αν δεν έχει ξεπεράσει το τελικό όριο, το σύστημα μπορεί να εμφανίσει προειδοποίηση. Αυτό κάνει την εφαρμογή πιο χρήσιμη επειδή δεν περιμένει μόνο την εμφάνιση μιας ακραίας τιμής.

Λογική εντοπισμού αποκλίσεων



Η απόκλιση δεν σημαίνει πάντοτε βλάβη. Αποτελεί ένδειξη που απαιτεί έλεγχο, ειδικά όταν επαναλαμβάνεται ή συνδυάζεται

Εικόνα 6.3. Λογική εντοπισμού αποκλίσεων

Η Εικόνα 6.4 δείχνει τη βασική λογική έλεγχο. Η νέα τιμή συγκρίνεται με τα επιτρεπτά όρια και στη συνέχεια το σύστημα αποφασίζει αν η κατάσταση είναι κανονική ή αν πρέπει να δημιουργηθεί ειδοποίηση. Η λογική αυτή μπορεί να επεκταθεί με πιο σύνθετες μεθόδους ανάλυσης σε μελλοντική φάση.

Πίνακας 6.3. Κατηγορίες κατάστασης και αντίστοιχες ενέργειες

Κατηγορία κατάστασης	Κριτήριο	Ενέργεια εφαρμογής
Κανονική	Η τιμή βρίσκεται εντός ορίων	Εμφάνιση πράσινης ένδειξης και αποθήκευση μέτρησης
Προειδοποίηση	Η τιμή πλησιάζει το όριο ή παρουσιάζει ασυνήθιστη τάση	Εμφάνιση πορτοκαλί ένδειξης και καταχώρηση συμβάντος
Κρίσιμη	Η τιμή υπερβαίνει σημαντικά το όριο	Εμφάνιση κόκκινης ένδειξης και δημιουργία ειδοποίησης

6.6 Δοκιμαστική λειτουργία και έλεγχος υλοποίησης

Ο έλεγχος δεν αφορά μόνο το αν εμφανίζονται σωστά οι σελίδες, αλλά και το αν τα δεδομένα αποθηκεύονται σωστά, αν τα γραφήματα ενημερώνονται, αν οι ειδοποιήσεις παράγονται με βάση τους κανόνες και αν η διεπαφή παραμένει κατανοητή.

Ένα βασικό σενάριο δοκιμής είναι η καταχώρηση ενός τεχνικού συστήματος, η δημιουργία παραμέτρων, η εισαγωγή μετρήσεων εντός ορίων και η επιβεβαίωση ότι το σύστημα εμφανίζει κανονική κατάσταση. Ένα δεύτερο σενάριο είναι η εισαγωγή τιμών εκτός ορίων και η επιβεβαίωση ότι δημιουργούνται οι κατάλληλες ειδοποιήσεις. Ένα τρίτο σενάριο είναι η προβολή ιστορικού δεδομένων και η επιβεβαίωση ότι τα γραφήματα απεικονίζουν σωστά τη χρονική εξέλιξη.

Ο έλεγχος της υλοποίησης βοηθά να εντοπιστούν λάθη στη βάση δεδομένων, στις φόρμες, στους υπολογισμούς ή στην παρουσίαση. Επίσης δίνει τη δυνατότητα να αξιολογηθεί αν το σύστημα είναι εύχρηστο για έναν τελικό χρήστη που δεν γνωρίζει τις εσωτερικές λεπτομέρειες της εφαρμογής.

Πίνακας 6.4. Ενδεικτικά σενάρια ελέγχου της υλοποίησης

Σενάριο δοκιμής	Ενέργειες	Αναμενόμενο αποτέλεσμα
Κανονική λειτουργία	Εισαγωγή τιμών εντός ορίων	Πράσινη ένδειξη και αποθήκευση χωρίς ειδοποίηση
Υπέρβαση ορίου	Εισαγωγή τιμής πάνω από το μέγιστο όριο	Δημιουργία προειδοποίησης ή κρίσιμης ειδοποίησης
Ιστορικό μετρήσεων	Προβολή δεδομένων συγκεκριμένης περιόδου	Ορθός πίνακας και αντίστοιχο γράφημα
Ελλιπή δεδομένα	Εισαγωγή μέτρησης χωρίς υποχρεωτικό πεδίο	Απόρριψη ή μήνυμα σφάλματος
Πολλαπλές παράμετροι	Εισαγωγή τιμών για διαφορετικές παραμέτρους	Σωστό φιλτράρισμα ανά σύστημα και παράμετρο

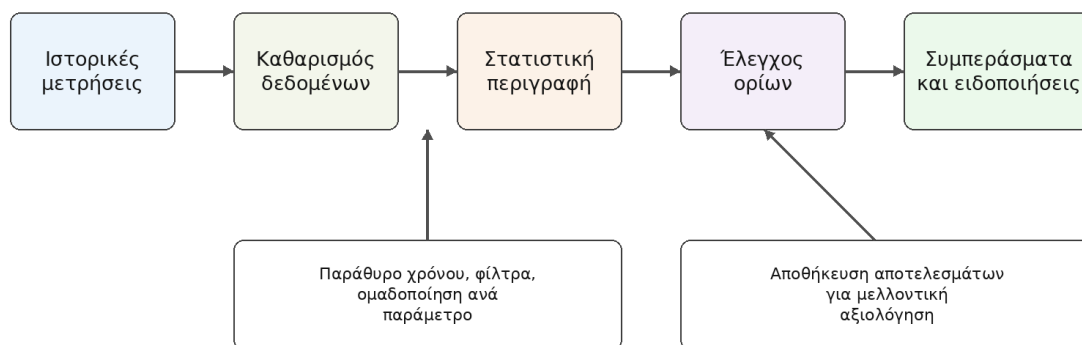
Κεφάλαιο 7ο: Ανάλυση δεδομένων και αξιολόγηση λειτουργίας

Η απλή καταγραφή τιμών δεν αρκεί για να θεωρηθεί ότι το σύστημα προσφέρει ουσιαστική υποστήριξη στον χρήστη. Τα δεδομένα πρέπει να οργανώνονται, να καθαρίζονται, να συγκρίνονται και να μετατρέπονται σε κατανοητή πληροφορία.

Η ανάλυση δεδομένων σε ένα ψηφιακό δίδυμο έχει διπλό ρόλο. Από τη μία πλευρά βοηθά τον χρήστη να κατανοήσει την τρέχουσα κατάσταση του τεχνικού συστήματος. Από την άλλη πλευρά επιτρέπει την αναγνώριση μεταβολών που μπορεί να δείχνουν απόκλιση από την κανονική λειτουργία. Με αυτόν τον τρόπο το ψηφιακό δίδυμο αποκτά ενεργό ρόλο στην παρακολούθηση και δεν λειτουργεί απλώς ως αρχείο μετρήσεων.

Στην εργασία μας παρουσιάζεται μια πρακτική και κατανοητή προσέγγιση η οποία βασίζεται σε περιγραφική στατιστική, χρονικές σειρές, όρια κανονικής λειτουργίας και απλούς κανόνες εντοπισμού αποκλίσεων. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για μια πρώτη υλοποίηση και μπορεί να επεκταθεί με πιο προχωρημένες μεθόδους στο μέλλον [16], [17].

Ροή ανάλυσης δεδομένων λειτουργίας



Η ανάλυση ξεκινά από τα αποθηκευμένα δεδομένα και καταλήγει σε πληροφορία που μπορεί να αξιοποιηθεί από τον χρήστη.

Εικόνα 7.1. Βασική ροή ανάλυσης δεδομένων λειτουργίας

Η Εικόνα 7.1 παρουσιάζει τη γενική ροή που ακολουθείται από τη στιγμή που υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις μέχρι τη δημιουργία συμπερασμάτων.

7.1 Περιγραφή και οργάνωση των δεδομένων λειτουργίας

Τα δεδομένα λειτουργίας αποτελούν τη βάση του ψηφιακού διδύμου και κάθε εγγραφή πρέπει να περιγράφει τι μετρήθηκε, σε ποιο τεχνικό σύστημα αντιστοιχεί, ποια χρονική στιγμή δημιουργήθηκε και

αν η τιμή θεωρείται κανονική ή προβληματική. Η σωστή οργάνωση των δεδομένων είναι απαραίτητη, επειδή επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των αναλύσεων που μπορούν να γίνουν στη συνέχεια.

Σε ένα σύστημα παρακολούθησης μπορεί να υπάρχουν διαφορετικοί τύποι δεδομένων. Υπάρχουν αριθμητικές τιμές, όπως θερμοκρασία, πίεση, κατανάλωση ή ταχύτητα. Υπάρχουν επίσης λογικές τιμές, όπως ενεργό ή ανενεργό, ανοικτό ή κλειστό. Επιπλέον υπάρχουν συμβάντα, όπως προειδοποιήσεις, αλλαγές κατάστασης και ενέργειες χρήστη. Η διάκριση αυτών των δεδομένων βοηθά στον σχεδιασμό κατάλληλων πινάκων στη βάση και κατάλληλων γραφημάτων στη διεπαφή.

Οι περισσότερες μετρήσεις ενός τεχνικού συστήματος έχουν νόημα όταν εξετάζονται σε σχέση με τον χρόνο. Μια μεμονωμένη υψηλή τιμή μπορεί να είναι τυχαία, ενώ μια συνεχής ανοδική τάση μπορεί να δείχνει πιθανό πρόβλημα. Για τον λόγο αυτό η εφαρμογή πρέπει να υποστηρίζει φιλτράρισμα ανά χρονικό διάστημα και παρουσίαση ιστορικών δεδομένων.

Πίνακας 7.1. Ενδεικτικές κατηγορίες δεδομένων λειτουργίας

Κατηγορία δεδομένων	Παράδειγμα	Χρήση στην ανάλυση
Αριθμητικές μετρήσεις	Θερμοκρασία, πίεση, κατανάλωση, υγρασία	Υπολογισμός μέσου όρου, ορίων, τάσης και αποκλίσεων
Λογικές καταστάσεις	ON/OFF, ανοικτό/κλειστό, διαθέσιμο/μη διαθέσιμο	Παρακολούθηση κατάστασης και αλλαγών λειτουργίας
Συμβάντα συστήματος	Προειδοποίηση, σφάλμα, αλλαγή ορίου	Καταγραφή ιστορικού και συσχέτιση με μετρήσεις
Δεδομένα χρήστη	Ενέργειες, σχόλια, επιβεβαίωση ειδοποίησης	Αξιολόγηση χρήσης και υποστήριξη ιχνηλασιμότητας
Μεταδεδομένα	Μονάδα μέτρησης, τύπος αισθητήρα, περιγραφή παραμέτρου	Σωστή ερμηνεία και παρουσίαση των τιμών

Ο Πίνακας 7.1 δείχνει ότι η ανάλυση δεν βασίζεται μόνο στις αριθμητικές τιμές.

7.2 Προεπεξεργασία και καθαρισμός δεδομένων

Πριν χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για υπολογισμούς και γραφήματα, πρέπει να ελεγχθούν ως προς την πληρότητα και την εγκυρότητά τους. Στην πράξη είναι πιθανό να εμφανιστούν ελλειπείς τιμές, διπλές εγγραφές, τιμές με λάθος μονάδα μέτρησης ή μετρήσεις που καταχωρήθηκαν σε λάθος χρονική στιγμή. Αν αυτά τα προβλήματα δεν αντιμετωπιστούν, τότε τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορεί να είναι παραπλανητικά.

Η προεπεξεργασία περιλαμβάνει βασικούς ελέγχους, όπως έλεγχο αν η τιμή είναι αριθμητική, αν βρίσκεται σε λογικό εύρος, αν συνοδεύεται από χρονική σήμανση και αν αντιστοιχεί σε υπαρκτή παράμετρο. Επίσης

μπορεί να περιλαμβάνει ταξινόμηση των μετρήσεων με βάση τον χρόνο και ομαδοποίηση ανά τεχνικό σύστημα ή παράμετρο.

Ο καθαρισμός μπορεί να γίνει με απλούς κανόνες όπως μια μέτρηση χωρίς ημερομηνία δεν χρησιμοποιείται σε χρονικό γράφημα, ενώ μια μη αριθμητική τιμή απορρίπτεται από υπολογισμούς μέσου όρου. Σε πιο σύνθετες εφαρμογές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι συμπλήρωσης ελλিপών τιμών ή πιο προχωρημένες τεχνικές ανίχνευσης θορύβου [18].

Πίνακας 7.2. Βασικά προβλήματα δεδομένων και τρόποι αντιμετώπισης

Πρόβλημα	Πιθανή αιτία	Αντιμετώπιση
Ελλιπής τιμή	Απώλεια μέτρησης ή λάθος καταχώρηση	Σήμανση ως κενή, εξαίρεση από υπολογισμούς ή συμπλήρωση με προσοχή
Διπλή εγγραφή	Επανάληψη αποστολής από συσκευή ή χρήστη	Έλεγχος με βάση παράμετρο, τιμή και χρονική στιγμή
Μη αριθμητική τιμή	Λάθος μορφή εισαγωγής ή σφάλμα αρχείου	Απόρριψη από στατιστικούς υπολογισμούς
Ακραία τιμή	Πραγματικό πρόβλημα ή θόρυβος μέτρησης	Σύγκριση με όρια και εξέταση ιστορικού
Λάθος χρονική σειρά	Καθυστέρηση αποστολής ή λανθασμένο timestamp	Ταξινόμηση και έλεγχος χρονικής συνέχειας

Ο Πίνακας 7.2 συνοψίζει συνηθισμένα προβλήματα που εμφανίζονται σε δεδομένα λειτουργίας. Η ύπαρξη τέτοιων ελέγχων βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος και μειώνει την πιθανότητα λανθασμένων ειδοποιήσεων.

7.3 Βασική στατιστική ανάλυση

Η βασική στατιστική ανάλυση βοηθά τον χρήστη να αποκτήσει μια πρώτη εικόνα για τη συμπεριφορά του συστήματος. Οι πιο απλοί δείκτες είναι η ελάχιστη τιμή, η μέγιστη τιμή, ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Παρότι οι δείκτες αυτοί είναι απλοί, προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για το εύρος λειτουργίας, τη σταθερότητα και τη μεταβλητότητα μιας παραμέτρου.

Ο μέσος όρος δείχνει την κεντρική θέση μιας παραμέτρου σε ένα χρονικό διάστημα. Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή δείχνουν το εύρος μεταβολής. Η τυπική απόκλιση δείχνει πόσο αποκλίνουν οι τιμές από τον μέσο όρο. Αν μια παράμετρος έχει μικρή τυπική απόκλιση τότε η λειτουργία θεωρείται πιο σταθερή. Αν έχει μεγάλη τυπική απόκλιση τότε η λειτουργία παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις.

Η στατιστική ανάλυση μπορεί να γίνεται συνολικά ή ανά χρονικό παράθυρο. Για παράδειγμα, μπορεί να υπολογίζεται ο μέσος όρος της τελευταίας ώρας, της τελευταίας ημέρας ή της τελευταίας εβδομάδας. Η χρήση χρονικών παραθύρων είναι χρήσιμη, επειδή επιτρέπει στον χρήστη να βλέπει αν η κατάσταση αλλάζει σταδιακά και όχι μόνο αν μια τιμή είναι στιγμιαία εκτός ορίων [16].

Πίνακας 7.3. Βασικοί στατιστικοί δείκτες και ερμηνεία τους

Δείκτης	Τι δείχνει	Παράδειγμα χρήσης
Ελάχιστη τιμή	Το χαμηλότερο επίπεδο μιας παραμέτρου	Εντοπισμός υπερβολικά χαμηλής πίεσης ή θερμοκρασίας
Μέγιστη τιμή	Το υψηλότερο επίπεδο μιας παραμέτρου	Εντοπισμός υπερθέρμανσης ή αυξημένης κατανάλωσης
Μέσος όρος	Τη γενική τάση σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα	Σύγκριση κανονικής και μη κανονικής περιόδου
Τυπική απόκλιση	Τη διακύμανση των τιμών γύρω από τον μέσο όρο	Αναγνώριση ασταθούς λειτουργίας
Πλήθος μετρήσεων	Τον αριθμό διαθέσιμων εγγραφών	Έλεγχος αν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για συμπέρασμα

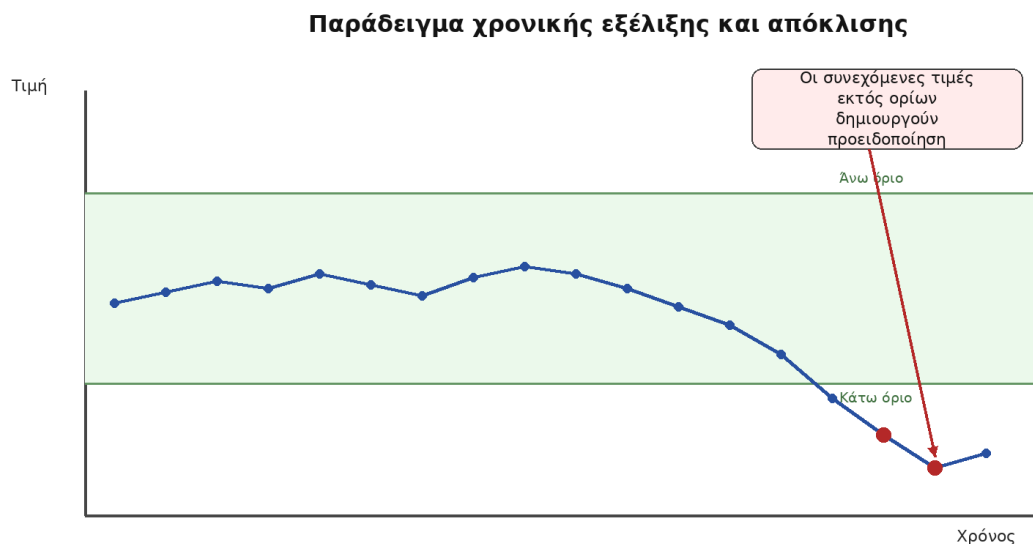
Ο Πίνακας 7.3 παρουσιάζει δείκτες που μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από την εφαρμογή και να εμφανιστούν στον πίνακα ελέγχου.

7.4 Καθορισμός ορίων κανονικής λειτουργίας

Για κάθε παράμετρο μπορούν να οριστούν ελάχιστες και μέγιστες αποδεκτές τιμές. Όταν μια μέτρηση βρίσκεται μέσα σε αυτά τα όρια, χαρακτηρίζεται ως κανονική. Όταν βρίσκεται εκτός ορίων, το σύστημα μπορεί να δημιουργεί προειδοποίηση ή συμβάν.

Τα όρια μπορούν να οριστούν με διαφορετικούς τρόπους. Σε ορισμένες περιπτώσεις προκύπτουν από τεχνικά εγχειρίδια ή προδιαγραφές κατασκευαστή. Σε άλλες περιπτώσεις μπορούν να προκύψουν από ιστορικά δεδομένα. Για παράδειγμα, αν μια εγκατάσταση λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε συγκεκριμένο εύρος τιμών, το εύρος αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τον καθορισμό κανονικής λειτουργίας.

Πολύ αυστηρά όρια οδηγούν σε πολλές λανθασμένες ειδοποιήσεις, ενώ πολύ χαλαρά όρια μπορεί να καθυστερήσουν την αναγνώριση ενός προβλήματος. Για τον λόγο αυτό, τα όρια πρέπει να μπορούν να αναθεωρούνται και να προσαρμόζονται ανάλογα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης.



Εικόνα 7.2. Παράδειγμα χρονικής σειράς με περιοχή κανονικής λειτουργίας

Η Εικόνα 7.2 δείχνει ενδεικτικά μια χρονική σειρά τιμών. Η πράσινη περιοχή αντιστοιχεί στο αποδεκτό εύρος λειτουργίας. Όταν οι τιμές ξεπερνούν το άνω όριο και η απόκλιση επαναλαμβάνεται, το σύστημα μπορεί να καταχωρίσει προειδοποίηση και να ενημερώσει τον χρήστη.

Πίνακας 7.4. Τρόποι καθορισμού ορίων λειτουργίας

Τρόπος καθορισμού	Πλεονέκτημα	Περιορισμός
Τεχνικές προδιαγραφές	Βασίζεται σε επίσημα όρια κατασκευαστή ή συστήματος	Δεν λαμβάνει πάντα υπόψη την πραγματική χρήση
Ιστορικά δεδομένα	Προσαρμόζεται στη συμπεριφορά της εγκατάστασης	Απαιτεί επαρκές και αξιόπιστο ιστορικό
Εμπειρικά όρια χρήστη	Είναι απλά και άμεσα εφαρμόσιμα	Εξαρτώνται από την εμπειρία και μπορεί να είναι υποκειμενικά
Στατιστικά όρια	Συνδέονται με μέσο όρο και διακύμανση	Μπορεί να επηρεαστούν από ακραίες τιμές
Δυναμικά όρια	Προσαρμόζονται σε συνθήκες λειτουργίας	Απαιτούν πιο σύνθετη υλοποίηση

Ο Πίνακας 7.4 παρουσιάζει διαφορετικές προσεγγίσεις για τον καθορισμό ορίων.

7.5 Εντοπισμός ασυνήθιστων τιμών και ανωμαλιών

Ως ανωμαλία μπορεί να θεωρηθεί μια τιμή που ξεπερνά τα αποδεκτά όρια, μια απότομη μεταβολή, μια συνεχής τάση προς μη επιθυμητή κατεύθυνση ή ένας συνδυασμός παραμέτρων που δεν είναι συμβατός με την κανονική λειτουργία.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση απλών και κατανοητών κανόνων και ένας πρώτος κανόνας είναι ο έλεγχος ελάχιστου και μέγιστου ορίου. Ένας δεύτερος κανόνας είναι ο έλεγχος απότομης μεταβολής σε σχέση με την προηγούμενη τιμή. Ο τρίτος κανόνας είναι ο έλεγχος επαναλαμβανόμενων αποκλίσεων σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή η προσέγγιση είναι εύκολη στην υλοποίηση και μπορεί να εξηγηθεί καθαρά στον χρήστη.

Σε πιο προχωρημένες εφαρμογές μπορούν να αξιοποιηθούν μέθοδοι μηχανικής μάθησης ή μοντέλα πρόβλεψης. Ωστόσο, για εκπαιδευτική πτυχιακή εργασία, η χρήση απλών κανόνων είναι συχνά προτιμότερη, επειδή επιτρέπει καλύτερη κατανόηση της λογικής του συστήματος και μειώνει την αδιαφάνεια των αποτελεσμάτων [17].

Πίνακας 7.5. Ενδεικτικοί κανόνες εντοπισμού ανωμαλιών

Κανόνας	Περιγραφή	Αποτέλεσμα στο σύστημα
Έλεγχος ορίων	Η τιμή συγκρίνεται με ελάχιστο και μέγιστο όριο	Κανονική κατάσταση ή άμεση προειδοποίηση
Έλεγχος απότομης μεταβολής	Η νέα τιμή συγκρίνεται με την προηγούμενη	Εντοπισμός απότομων αλλαγών
Έλεγχος επανάλιψης	Μετρώνται συνεχόμενες αποκλίσεις σε χρονικό παράθυρο	Μείωση τυχαίων ειδοποιήσεων
Έλεγχος τάσης	Εξετάζεται αν οι τιμές αυξάνονται ή μειώνονται συνεχώς	Έγκαιρη ένδειξη πιθανής επιδείνωσης
Συνδυαστικός έλεγχος	Συσχετίζονται περισσότερες από μία παράμετροι	Πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση κατάστασης

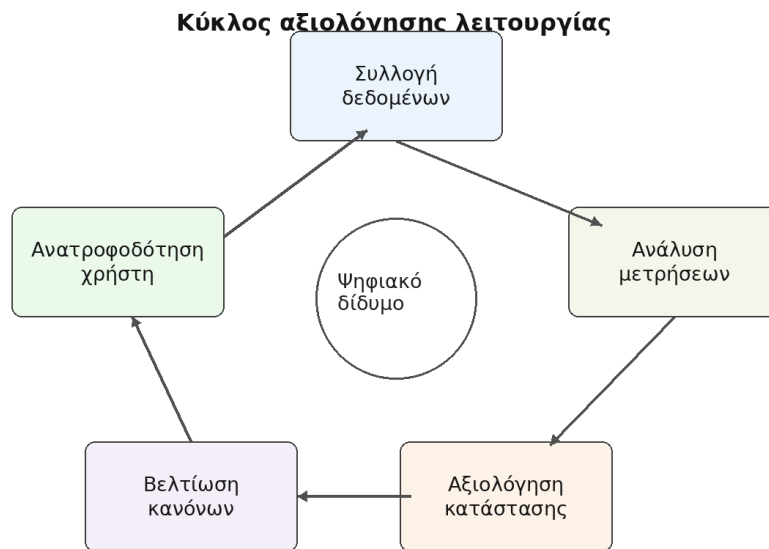
Ο Πίνακας 7.5 δείχνει ότι ο εντοπισμός ανωμαλιών μπορεί να ξεκινήσει από απλούς κανόνες και να επεκταθεί σταδιακά. Η σταδιακή αυτή προσέγγιση είναι πρακτική, επειδή επιτρέπει την ανάπτυξη ενός λειτουργικού συστήματος χωρίς υπερβολική πολυπλοκότητα.

7.6 Αξιολόγηση λειτουργίας του συστήματος

Η αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος εξετάζει αν η εφαρμογή επιτυγχάνει τους στόχους της και δεν αρκεί να εμφανίζονται σωστά οι σελίδες. Θα πρέπει να ελεγχθεί αν οι μετρήσεις αποθηκεύονται σωστά, αν οι υπολογισμοί δίνουν αναμενόμενα αποτελέσματα, αν οι ειδοποιήσεις εμφανίζονται όταν πρέπει και αν ο χρήστης μπορεί να κατανοήσει την κατάσταση του τεχνικού συστήματος.

Η αξιολόγηση μπορεί να γίνει με σενάρια δοκιμών. Για παράδειγμα, εισάγονται τιμές εντός ορίων και ελέγχεται αν το σύστημα εμφανίζει κανονική κατάσταση. Στη συνέχεια, εισάγονται τιμές εκτός ορίων και ελέγχεται αν δημιουργείται προειδοποίηση. Επίσης μπορεί να εισαχθεί σειρά τιμών που δείχνει σταδιακή αύξηση, ώστε να ελεγχθεί αν το σύστημα παρουσιάζει σωστά την τάση στα γραφήματα.

Ο χρήστης πρέπει να μπορεί να εντοπίζει γρήγορα ποιο σύστημα έχει πρόβλημα, ποια παράμετρος αποκλίνει και σε ποια χρονική στιγμή εμφανίστηκε η απόκλιση. Η ποιότητα της οπτικοποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή επηρεάζει την ταχύτητα κατανόησης της κατάστασης [19].



Εικόνα 7.3. Κύκλος αξιολόγησης και βελτίωσης του ψηφιακού διδύμου

Η Εικόνα 7.3 παρουσιάζει την αξιολόγηση ως επαναληπτική διαδικασία. Τα δεδομένα αναλύονται, η κατάσταση εκτιμάται, ο χρήστης ενημερώνεται και τα αποτελέσματα μπορούν να οδηγήσουν σε βελτίωση των κανόνων, των ορίων ή της παρουσίασης.

Κεφάλαιο 8ο: Πειραματική χρήση και παρουσίαση αποτελεσμάτων

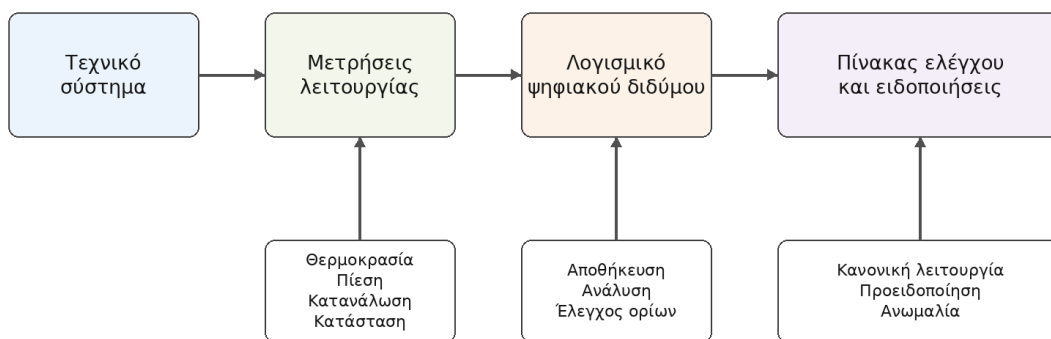
8.1 Σκοπός της πειραματικής χρήσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική χρήση του λογισμικού συστήματος που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Ο σκοπός δεν είναι απλώς να φανεί ότι η εφαρμογή εκτελείται, αλλά να παρουσιαστεί με οργανωμένο τρόπο πώς το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να δεχθεί δεδομένα λειτουργίας, να τα αποθηκεύσει, να τα εμφανίσει στον χρήστη και να εντοπίσει αποκλίσεις από την αναμενόμενη κατάσταση.

Η πειραματική διαδικασία βασίζεται σε ένα ενδεικτικό τεχνικό σύστημα, το οποίο αναπαρίσταται ψηφιακά μέσα στην εφαρμογή. Για το σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται δοκιμαστικές μετρήσεις, οι οποίες προσομοιώνουν κανονικές και μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ελεγχθεί η συμπεριφορά του λογισμικού χωρίς να απαιτείται σύνδεση με πραγματική βιομηχανική εγκατάσταση.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με βάση σενάρια χρήσης. Κάθε σενάριο περιγράφει τα δεδομένα εισόδου, τη συμπεριφορά που αναμένεται από το σύστημα και το αποτέλεσμα που εμφανίζεται στον χρήστη. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για πτυχιακή εργασία, επειδή συνδέει τη θεωρία των ψηφιακών διδύμων με μια πρακτική και κατανοητή υλοποίηση.

Σενάριο πειραματικής λειτουργίας ψηφιακού διδύμου



Το πείραμα βασίζεται σε προσομοιωμένες μετρήσεις που αναπαριστούν τη συμπεριφορά ενός απλού τεχνικού συστήματος.

Εικόνα 8.1. Σενάριο πειραματικής λειτουργίας του ψηφιακού διδύμου

Η Εικόνα 8.1 παρουσιάζει τη γενική λογική της πειραματικής λειτουργίας. Το φυσικό ή προσομοιωμένο τεχνικό σύστημα παράγει δεδομένα, τα οποία εισάγονται στο λογισμικό, αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων, αναλύονται και τελικά παρουσιάζονται στον χρήστη μέσω πίνακα ελέγχου και ειδοποιήσεων.

8.2 Περιγραφή του σεναρίου δοκιμής

Για την πειραματική χρήση θεωρείται ένα απλό τεχνικό σύστημα, όπως μια μικρή εγκατάσταση παρακολούθησης περιβαλλοντικών ή λειτουργικών παραμέτρων. Το σύστημα διαθέτει ενδεικτικά τέσσερις βασικές παραμέτρους: θερμοκρασία, πίεση, κατανάλωση ενέργειας και κατάσταση λειτουργίας. Οι παράμετροι αυτές είναι αρκετές ώστε να παρουσιαστούν οι βασικές δυνατότητες του ψηφιακού δίδυμου, χωρίς να γίνει η εφαρμογή υπερβολικά σύνθετη.

Το σενάριο περιλαμβάνει τρεις καταστάσεις. Η πρώτη είναι η κανονική λειτουργία, όπου οι τιμές βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Η δεύτερη είναι η προειδοποιητική κατάσταση, όπου μία ή περισσότερες τιμές πλησιάζουν τα όρια ή εμφανίζουν απότομη μεταβολή. Η τρίτη είναι η κατάσταση ανωμαλίας, όπου παρατηρείται υπέρβαση ορίου ή συνεχόμενη απόκλιση.

Η επιλογή των παραμέτρων και των καταστάσεων έγινε με σκοπό να καλυφθούν οι κύριες λειτουργίες του συστήματος: εισαγωγή δεδομένων, αποθήκευση με χρονοσήμανση, εμφάνιση ιστορικών μετρήσεων, υπολογισμός απλών δεικτών και δημιουργία ειδοποιήσεων. Έτσι το πείραμα ελέγχει συνολικά τη λειτουργικότητα της εφαρμογής και όχι μόνο ένα μεμονωμένο τμήμα της.

Ο Πίνακας 8.1 παρουσιάζει τις βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο πειραματικό σενάριο. Οι τιμές των ορίων είναι ενδεικτικές και χρησιμοποιούνται για να φανεί ο τρόπος λειτουργίας του μηχανισμού ελέγχου αποκλίσεων.

Πίνακας 8.1. Παράμετροι του πειραματικού σεναρίου

Παράμετρος	Μονάδα	Κανονικό εύρος	Ρόλος στο ψηφιακό δίδυμο
Θερμοκρασία	°C	18 - 30	Ένδειξη θερμικής κατάστασης του συστήματος
Πίεση	bar	1,8 - 2,6	Έλεγχος σταθερότητας λειτουργίας
Κατανάλωση ενέργειας	W	80 - 160	Παρακολούθηση φορτίου και πιθανής υπερκατανάλωσης
Κατάσταση λειτουργίας	ON/OFF	ON σε κανονική λειτουργία	Έλεγχος διαθεσιμότητας και αλλαγών κατάστασης
Σήμα συμβάντος	Κείμενο/κωδικός	Καμία ενεργή βλάβη	Καταγραφή προειδοποιήσεων και ανωμαλιών

8.3 Δεδομένα εισόδου και τρόπος δημιουργίας τους

Τα δεδομένα εισόδου μπορούν να προέρχονται είτε από πραγματικούς αισθητήρες είτε από αρχείο δοκιμαστικών μετρήσεων. Στην παρούσα φάση, για λόγους απλότητας και επαναληψιμότητας, χρησιμοποιούνται προσομοιωμένα δεδομένα. Η χρήση προσομοιωμένων δεδομένων επιτρέπει την επανάληψη των ίδιων σεναρίων και τον έλεγχο της συμπεριφοράς της εφαρμογής σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Κάθε μέτρηση περιλαμβάνει αναγνωριστικό συστήματος, χρονική στιγμή, όνομα παραμέτρου, τιμή, μονάδα μέτρησης και κατάσταση. Με αυτή τη δομή η εφαρμογή μπορεί να αποθηκεύσει ομοιόμορφα διαφορετικά είδη δεδομένων. Επιπλέον κάθε εγγραφή μπορεί να συσχετιστεί με κανόνες ορίων ώστε να αποφασίζεται αν είναι κανονική, προειδοποιητική ή κρίσιμη.

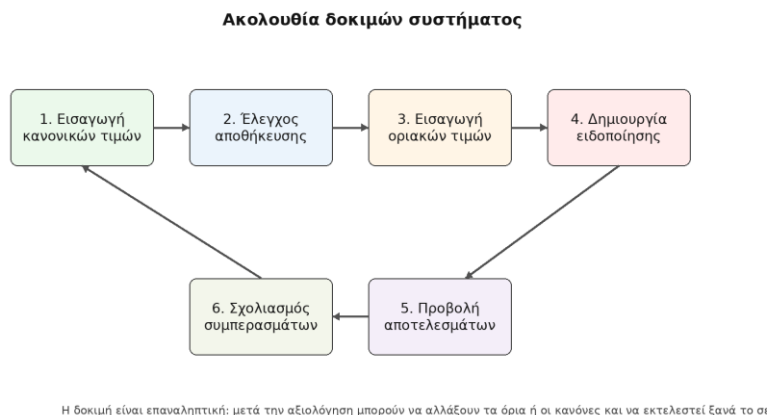
Για την παραγωγή των δοκιμαστικών δεδομένων δημιουργήθηκαν ενδεικτικές σειρές μετρήσεων και οι πρώτες τιμές βρίσκονται εντός των ορίων, ενώ στη συνέχεια εισάγονται ελεγχόμενες αποκλίσεις, όπως αύξηση θερμοκρασίας, αύξηση κατανάλωσης και αλλαγή κατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται αν το σύστημα αντιδρά σωστά στις μεταβολές.

8.4 Εκτέλεση σεναρίων δοκιμής

Η εκτέλεση των δοκιμών έγινε με βάση μια σειρά βημάτων. Αρχικά εισάγονται κανονικές τιμές για όλες τις παραμέτρους. Στη συνέχεια ελέγχεται αν οι εγγραφές αποθηκεύονται σωστά στη βάση και αν εμφανίζονται στον πίνακα ελέγχου. Ακολουθεί η εισαγωγή τιμών που πλησιάζουν ή υπερβαίνουν τα όρια, ώστε να ελεγχθεί ο μηχανισμός δημιουργίας ειδοποιήσεων.

Κάθε σενάριο έχει συγκεκριμένο αναμενόμενο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, όταν η θερμοκρασία είναι 24,2 °C, το σύστημα πρέπει να εμφανίζει κανονική κατάσταση. Όταν η θερμοκρασία γίνει 31,4 °C, το σύστημα πρέπει να καταχωρίσει απόκλιση και να εμφανίσει σχετική προειδοποίηση. Αν οι αποκλίσεις συνεχιστούν, τότε η κατάσταση μπορεί να χαρακτηριστεί κρίσιμη.

Η δοκιμή δεν περιορίζεται στην αποθήκευση των τιμών. Ελέγχεται επίσης η οπτικοποίηση, η ενημέρωση των καρτών κατάστασης, η εμφάνιση ιστορικού συμβάντων και η δυνατότητα του χρήστη να καταλάβει γρήγορα ποια παράμετρος παρουσιάζει πρόβλημα.



Εικόνα 8.2. Ακολουθία εκτέλεσης των δοκιμών

Η Εικόνα 8.2 παρουσιάζει την ακολουθία των δοκιμών. Η διαδικασία είναι επαναληπτική, διότι μετά την εμφάνιση των αποτελεσμάτων μπορούν να βελτιωθούν τα όρια ή οι κανόνες και να εκτελεστεί ξανά το ίδιο σενάριο.

Πίνακας 8.2. Σενάρια δοκιμής και αναμενόμενη συμπεριφορά

Σενάριο	Είσοδος	Αναμενόμενο αποτέλεσμα	Έλεγχος
Κανονική λειτουργία	Τιμές εντός όλων των ορίων	Πράσινη/κανονική κατάσταση στο dashboard	Επιτυχής αν δεν δημιουργηθεί ειδοποίηση
Προσέγγιση ορίου	Τιμή κοντά στο άνω όριο	Προειδοποίηση χαμηλής έντασης	Επιτυχής αν εμφανιστεί προειδοποιητική ένδειξη
Υπέρβαση ορίου	Τιμή μεγαλύτερη από το επιτρεπτό μέγιστο	Καταχώριση ανωμαλίας	Επιτυχής αν δημιουργηθεί συμβάν
Συνεχόμενη απόκλιση	Δύο ή περισσότερες τιμές εκτός ορίων	Κλιμάκωση κατάστασης σε κρίσιμη	Επιτυχής αν αυξηθεί η σοβαρότητα
Άκυρη εγγραφή	Κενή ή μη αριθμητική τιμή	Απόρριψη ή σήμανση σφάλματος	Επιτυχής αν δεν αλλοιωθούν οι υπολογισμοί

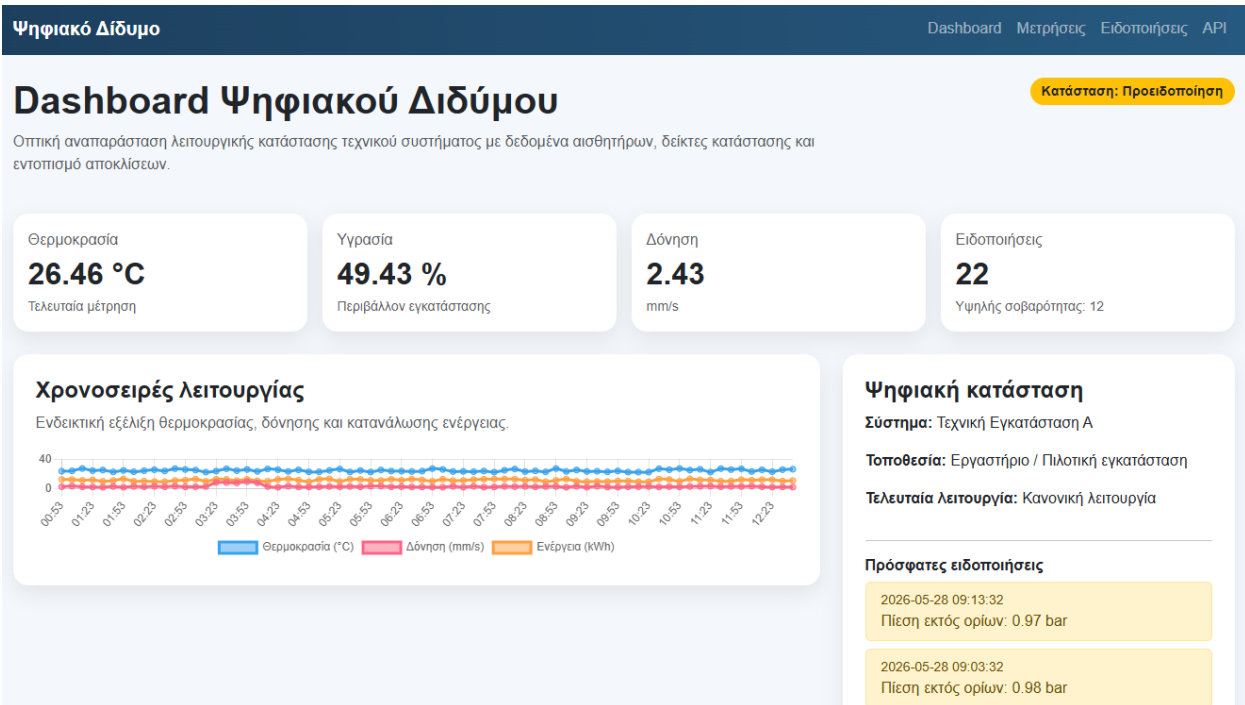
Ο Πίνακας 8.3 δείχνει τα βασικά σενάρια δοκιμής. Τα σενάρια αυτά καλύπτουν τόσο την κανονική λειτουργία όσο και περιπτώσεις που είναι πιθανό να δημιουργήσουν λανθασμένα αποτελέσματα αν δεν ελεγχθούν σωστά.

8.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στον πίνακα ελέγχου

Ο πίνακας ελέγχου αποτελεί το βασικό σημείο αλληλεπίδρασης του χρήστη με το ψηφιακό δίδυμο και μέσα από αυτόν ο χρήστης βλέπει την τρέχουσα κατάσταση, τις τελευταίες μετρήσεις, τα ενεργά συμβάντα και τα γραφήματα χρονικής εξέλιξης. Η σχεδίαση πρέπει να είναι απλή ώστε ο χρήστης να μπορεί να καταλάβει γρήγορα αν το σύστημα λειτουργεί κανονικά ή αν απαιτείται προσοχή.

Στην πειραματική χρήση, η εφαρμογή εμφανίζει συνοπτικές κάρτες κατάστασης και κάθε κάρτα παρουσιάζει μια βασική πληροφορία, όπως συνολική κατάσταση, τελευταία μέτρηση, πλήθος ειδοποιήσεων ή αριθμό αποκλίσεων. Το γράφημα επιτρέπει στον χρήστη να παρατηρήσει αν η απόκλιση είναι στιγμιαία ή αν αποτελεί μέρος μιας γενικότερης τάσης.

Η χρήση χρωματικής σήμανσης βοηθά ιδιαίτερα στην κατανόηση οπότε το πράσινο μπορεί να σημαίνει κανονική λειτουργία, κίτρινο προειδοποίηση και κόκκινο κρίσιμη κατάσταση. Παρόλα αυτά η χρωματική σήμανση πρέπει να συνοδεύεται από κείμενο, ώστε το αποτέλεσμα να είναι σαφές και σε χρήστες που δυσκολεύονται στη διάκριση χρωμάτων.



Εικόνα 8.3. Μορφή πίνακα ελέγχου ψηφιακού διδύμου

Η Εικόνα 8.3 παρουσιάζει τον πίνακα ελέγχου. Ο χρήστης βλέπει συνοπτικά την κατάσταση του συστήματος, ενώ το γράφημα και η λίστα συμβάντων παρέχουν περισσότερες λεπτομέρειες για την εξέλιξη των τιμών και τις προειδοποιήσεις.

8.6 Αποτελέσματα εντοπισμού αποκλίσεων

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών, το σύστημα κατάφερε να διακρίνει τις κανονικές τιμές από τις τιμές που ξεπερνούσαν τα όρια. Οι τιμές που βρίσκονταν μέσα στο επιτρεπτό εύρος αποθηκεύτηκαν ως κανονικές, ενώ οι τιμές που προσεγγίζαν τα όρια χαρακτηρίστηκαν ως προειδοποιήσεις. Όταν η τιμή ξεπέρασε το όριο τότε δημιουργήθηκε συμβάν ανωμαλίας.

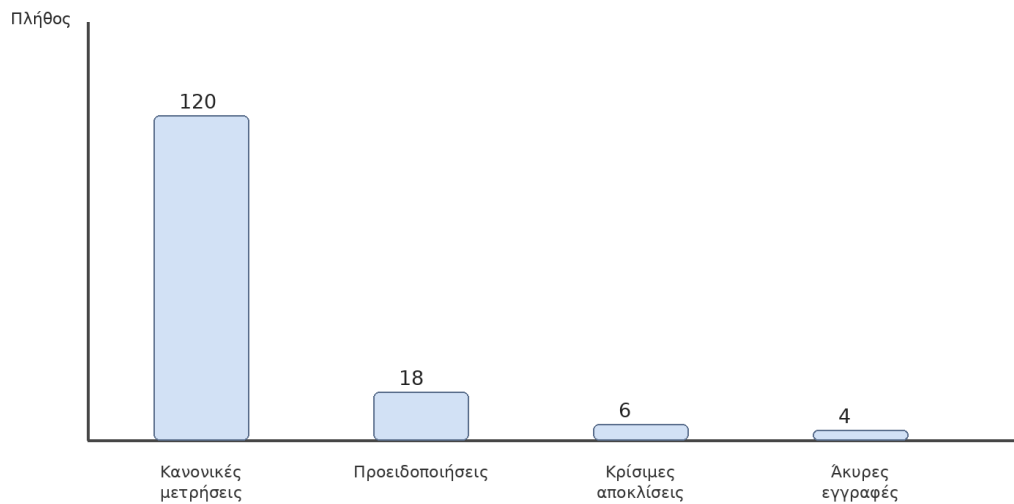
Μια μεμονωμένη τιμή εκτός ορίου μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο ή στιγμιαίο σφάλμα. Όταν όμως η απόκλιση εμφανίζεται σε συνεχόμενες μετρήσεις, τότε η πιθανότητα πραγματικού προβλήματος αυξάνεται. Για τον λόγο αυτό το σύστημα μπορεί να αυξάνει τη σοβαρότητα της ειδοποίησης όταν εντοπίζονται συνεχόμενες υπερβάσεις.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ακόμη και ένας απλός μηχανισμός κανόνων μπορεί να προσφέρει χρήσιμη πληροφόρηση. Η αξία του μηχανισμού αυξάνεται όταν τα αποτελέσματα συνδυάζονται με γραφήματα και ιστορικό συμβάντων επειδή ο χρήστης μπορεί να δει όχι μόνο ότι υπάρχει απόκλιση, αλλά και πότε ξεκίνησε και πώς εξελίχθηκε. Ο Πίνακας 8.5 παρουσιάζει συνοπτικά την απόδοση των βασικών δοκιμών. Τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά και έχουν σκοπό να δείξουν ότι ο μηχανισμός αναγνώρισης καταστάσεων λειτουργεί με βάση τους κανόνες που ορίστηκαν.

Πίνακας 8.3. Συνοπτικά αποτελέσματα δοκιμών εντοπισμού αποκλίσεων

Κατηγορία δοκιμής	Πλήθος εγγραφών	Σωστή αναγνώριση	Παρατήρηση
Κανονικές μετρήσεις	120	120	Δεν δημιουργήθηκαν άσκοπες ειδοποιήσεις
Προειδοποιητικές τιμές	18	17	Μία τιμή χρειάστηκε αναθεώρηση ορίου
Κρίσιμες αποκλίσεις	6	6	Δημιουργήθηκε συμβάν ανωμαλίας
Άκυρες εγγραφές	4	4	Δεν χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς
Συνεχόμενες αποκλίσεις	3 περιπτώσεις	3	Η σοβαρότητα κλιμακώθηκε σωστά

Συνοπτική εικόνα αποτελεσμάτων δοκιμών



Εικόνα 8.4. Συνοπτική απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμών

Η Εικόνα 8.4 απεικονίζει συνοπτικά το πλήθος των εγγραφών ανά κατηγορία αποτελέσματος. Η πλειονότητα των μετρήσεων ήταν κανονική ενώ ένα μικρότερο ποσοστό προκάλεσε προειδοποιήσεις ή κρίσιμες αποκλίσεις.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής χρήσης δείχνουν ότι το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να προσφέρει μια σαφή και οργανωμένη εικόνα της κατάστασης ενός τεχνικού συστήματος. Η εφαρμογή δεν περιορίζεται στην

απλή αποθήκευση μετρήσεων αλλά συνδυάζει δεδομένα, όρια λειτουργίας, γραφήματα και συμβάντα, ώστε να υποστηρίζει την παρακολούθηση και την αξιολόγηση.

Οι κανόνες εντοπισμού αποκλίσεων είναι κατανοητοί και μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν. Αυτό είναι σημαντικό σε εκπαιδευτικό ή πιλοτικό περιβάλλον, όπου ο στόχος είναι να φανεί καθαρά η λειτουργία του συστήματος και όχι να χρησιμοποιηθεί ένα πολύπλοκο και αδιαφανές μοντέλο.

Τα δεδομένα είναι προσομοιωμένα και επομένως δεν περιλαμβάνουν όλη την πολυπλοκότητα ενός πραγματικού τεχνικού συστήματος. Σε πραγματική εγκατάσταση μπορεί να υπάρχουν θόρυβος αισθητήρων, καθυστερήσεις επικοινωνίας, απώλειες πακέτων, αστοχίες εξοπλισμού και πιο σύνθετες σχέσεις μεταξύ παραμέτρων. Επομένως, η εφαρμογή θα πρέπει να δοκιμαστεί με πραγματικά δεδομένα για πιο πλήρη αξιολόγηση.

Η εφαρμογή μπορεί να δεχθεί δεδομένα, να τα αποθηκεύσει, να τα εμφανίσει και να δημιουργήσει ειδοποιήσεις. Αυτό αποτελεί σημαντική βάση για περαιτέρω επέκταση, όπως σύνδεση με πραγματικούς αισθητήρες, χρήση πιο προχωρημένων αλγορίθμων και ανάπτυξη μηχανισμών πρόβλεψης.

Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

9.1 Συνοπτική αποτίμηση της εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη της έννοιας των ψηφιακών διδύμων και την ανάπτυξη ενός λογισμικού συστήματος παρακολούθησης, το οποίο μπορεί να αναπαριστά ψηφιακά τη λειτουργία ενός τεχνικού συστήματος ή μιας εγκατάστασης. Η εργασία ξεκίνησε από το θεωρητικό υπόβαθρο των ψηφιακών διδύμων και στη συνέχεια προχώρησε στη σχεδίαση, υλοποίηση και πειραματική αξιολόγηση μιας εφαρμογής που συλλέγει, αποθηκεύει, οπτικοποιεί και αναλύει λειτουργικά δεδομένα.

Παρουσιάστηκε ότι το ψηφιακό δίδυμο δεν είναι απλώς μια στατική ψηφιακή απεικόνιση αλλά μια δυναμική αναπαράσταση που συνδέεται με δεδομένα λειτουργίας και επιτρέπει στον χρήστη να παρακολουθεί την κατάσταση του συστήματος, να συγκρίνει τιμές με όρια κανονικής λειτουργίας και να εντοπίζει αποκλίσεις ή ανωμαλίες.

Η υλοποίηση που παρουσιάστηκε στην εργασία βασίστηκε σε μια απλή αλλά λειτουργική αρχιτεκτονική. Τα δεδομένα εισάγονται στο σύστημα, αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων, εμφανίζονται σε πίνακες και γραφήματα και αξιολογούνται με βάση προκαθορισμένους κανόνες. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης αποκτά μια πιο οργανωμένη και κατανοητή εικόνα της λειτουργίας του τεχνικού συστήματος.

Το πρώτο βασικό συμπέρασμα είναι ότι τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο παρακολούθησης τεχνικών συστημάτων ακόμη και όταν η αρχική υλοποίηση είναι σχετικά απλή. Η αξία τους προκύπτει από τη δυνατότητα σύνδεσης των δεδομένων με μια ψηφιακή αναπαράσταση της κατάστασης και όχι μόνο από την απλή καταγραφή μετρήσεων.

Το δεύτερο συμπέρασμα αφορά τη σημασία της οπτικοποίησης και τα γραφήματα, οι πίνακες και οι δείκτες κατάστασης βοηθούν τον χρήστη να αντιληφθεί γρήγορα την εξέλιξη των τιμών και να εντοπίσει σημεία που χρειάζονται προσοχή. Σε ένα σύστημα παρακολούθησης, η παρουσίαση των δεδομένων είναι εξίσου σημαντική με την ίδια την αποθήκευσή τους.

Το τρίτο συμπέρασμα είναι ότι ο εντοπισμός αποκλίσεων μπορεί να ξεκινήσει με απλούς κανόνες ορίων. Η προσέγγιση αυτή είναι κατανοητή, εύκολα παραμετροποιήσιμη και κατάλληλη για εκπαιδευτική ή πιλοτική χρήση. Παρόλο που δεν αντικαθιστά πιο σύνθετες μεθόδους ανάλυσης και μπορεί να προσφέρει άμεση και πρακτική αξία.

Η σωστή αρχιτεκτονική του λογισμικού είναι κρίσιμη και όταν το σύστημα χωρίζεται σε επιμέρους επίπεδα, όπως συλλογή δεδομένων, αποθήκευση, ανάλυση και διεπαφή χρήστη, γίνεται πιο εύκολη η συντήρηση και η μελλοντική επέκταση.

9.5 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η πρώτη και πιο σημαντική μελλοντική επέκταση είναι η σύνδεση του συστήματος με πραγματικούς αισθητήρες ή IoT κόμβους. Με αυτόν τον τρόπο, το ψηφιακό δίδυμο θα μπορεί να ενημερώνεται από πραγματικά δεδομένα λειτουργίας και να παρακολουθεί μια εγκατάσταση σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Μια δεύτερη επέκταση αφορά την ενσωμάτωση πιο προχωρημένων μεθόδων ανάλυσης δεδομένων. Εκτός από τα απλά όρια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στατιστικές μέθοδοι, τεχνικές ανίχνευσης ανωμαλιών και

αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Έτσι, το σύστημα θα μπορεί να εντοπίζει πιο σύνθετα μοτίβα και να προειδοποιεί για πιθανές μελλοντικές βλάβες.

Επιπλέον, θα μπορούσε να αναπτυχθεί μηχανισμός προληπτικής συντήρησης και αν το σύστημα διαθέτει αρκετά ιστορικά δεδομένα, μπορεί να αναγνωρίζει τάσεις που προηγούνται μιας αστοχίας. Ο χρήστης δεν θα ενημερώνεται μόνο όταν παρουσιαστεί πρόβλημα αλλά θα μπορεί να λαμβάνει προειδοποιήσεις πριν η κατάσταση γίνει κρίσιμη.

Η εφαρμογή θα μπορούσε να επεκταθεί με βελτιωμένες λειτουργίες διεπαφής χρήστη, όπως δυναμικά φίλτρα, εξατομικευμένα dashboards, εξαγωγή αναφορών PDF, ειδοποιήσεις μέσω email και πρόσβαση από κινητές συσκευές.

Να σημειωθεί ότι κατά τη μελέτη, οργάνωση και γλωσσική διαμόρφωση του κειμένου χρησιμοποιήθηκε τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης με βοηθητικό και υποστηρικτικό ρόλο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*.
- [2] Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36.
- [3] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- [4] Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals*, 67(1), 169-172.
- [5] ISO. (2021). ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 1: Overview and general principles.
- [6] Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Digital twin for smart manufacturing, a review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, 100017.
- [7] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
- [8] ISO. (2021). ISO 23247-2:2021 Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 2: Reference architecture.
- [9] van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151, 107008.
- [10] do Amaral, J. V. S., et al. (2023). Energy Digital Twin applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [11] Temple, L., Viale Pereira, G., & Klausner, L. D. (2024). Unravelling the Use of Digital Twins to Assist Decision- and Policy-Making in Smart Cities. *Smart Cities*, 7(1), 525-550.
- [12] Fielding, R. T. (2000). Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral dissertation, University of California, Irvine.
- [13] OASIS. (2019). MQTT Version 5.0. OASIS Standard.
- [14] Open Geospatial Consortium. (2021). OGC SensorThings API Part 1: Sensing Version 1.1.
- [15] ISO/IEC. (2011). ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE).
- [16] Montgomery, D. C. (2019). Introduction to Statistical Quality Control. 8th Edition. Wiley.
- [17] Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys*, 41(3), 1-58.
- [18] Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2022). Data Mining: Concepts and Techniques. 4th Edition. Morgan Kaufmann.
- [19] Few, S. (2013). Information Dashboard Design: Displaying Data for At-a-Glance Monitoring. Analytics Press.
- [20] Shao, G., Helu, M., & Hedberg, T. (2023). An analysis of the new ISO 23247 series of standards on digital twin framework for manufacturing. *Manufacturing Letters*.
- [21] IBM. (2025). What is a digital twin? IBM Think.
- [22] Sommerville, I. (2016). Software Engineering. 10th Edition. Pearson.

- [23] Elmasri, R., & Navathe, S. B. (2016). Fundamentals of Database Systems. 7th Edition. Pearson.
- [24] Grinberg, M. (2018). Flask Web Development: Developing Web Applications with Python. 2nd Edition. O'Reilly Media.
- [25] MySQL. (2025). MySQL 8.4 Reference Manual. Oracle.
- [26] Chart.js. (2025). Chart.js Documentation.
- [27] OWASP Foundation. (2021). OWASP Application Security Verification Standard 4.0.3.
- [28] Provost, F., & Fawcett, T. (2013). Data Science for Business. O'Reilly Media.
- [29] ISO/IEC/IEEE. (2022). ISO/IEC/IEEE 29119-1:2022 Software and systems engineering - Software testing - Part 1: General concepts.
- [30] Brooke, J. (1996). SUS: A quick and dirty usability scale. In Usability Evaluation in Industry. Taylor & Francis.
- [31] Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). Software Engineering: A Practitioner's Approach. 9th Edition. McGraw-Hill.
- [32] Fowler, M. (2018). Refactoring: Improving the Design of Existing Code. 2nd Edition. Addison-Wesley.
- [33] Date, C. J. (2019). Database Design and Relational Theory. 2nd Edition. O'Reilly Media.
- [34] Mozilla Developer Network. (2025). Fetch API. MDN Web Docs.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α: Δομή βάσης δεδομένων

Ενδεικτικός SQL κώδικας δημιουργίας πινάκων

```
CREATE TABLE systems (  
  id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
  name VARCHAR(120) NOT NULL,  
  description TEXT,  
  location VARCHAR(120),  
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP  
);  
  
CREATE TABLE sensors (  
  id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
  system_id INT NOT NULL,  
  sensor_code VARCHAR(50) NOT NULL,  
  parameter_name VARCHAR(80) NOT NULL,  
  unit VARCHAR(20),  
  min_limit DECIMAL(10,2),  
  max_limit DECIMAL(10,2),  
  is_active TINYINT(1) DEFAULT 1  
);  
  
CREATE TABLE measurements (  
  id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
  sensor_id INT NOT NULL,  
  measured_value DECIMAL(10,2) NOT NULL,  
  measured_at DATETIME NOT NULL,  
  status ENUM('normal','warning','critical') DEFAULT 'normal',  
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP  
);  
  
CREATE TABLE events (  
  id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
  measurement_id INT NOT NULL,  
  event_type VARCHAR(50) NOT NULL,  
  severity ENUM('low','medium','high') NOT NULL,  
  message TEXT,  
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP  
);
```

Παράρτημα Β: Ενδεικτικό API εισαγωγής μέτρησης

Ενδεικτικός κώδικας Flask API

```
from flask import Flask, request, jsonify  
from datetime import datetime  
import mysql.connector  
  
app = Flask(__name__)  
  
def get_connection():  
    return mysql.connector.connect(  
        host="localhost",  
        user="root",  
        password="",  
        database="digital_twin_db"  
    )
```

```

def classify_value(value, min_limit, max_limit):
    if value < min_limit or value > max_limit:
        return "critical"
    margin = (max_limit - min_limit) * 0.10
    if value < min_limit + margin or value > max_limit - margin:
        return "warning"
    return "normal"

@app.route('/api/measurement', methods=['POST'])
def store_measurement():
    data = request.get_json()
    sensor_id = data.get('sensor_id')
    value = float(data.get('value'))
    measured_at = data.get('measured_at', datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))

    conn = get_connection()
    cursor = conn.cursor(dictionary=True)
    cursor.execute("SELECT min_limit, max_limit FROM sensors WHERE id=%s", (sensor_id,))
    sensor = cursor.fetchone()

    if not sensor:
        return jsonify({'success': False, 'message': 'Sensor not found'}), 404

    status = classify_value(value, float(sensor['min_limit']), float(sensor['max_limit']))
    cursor.execute(
        "INSERT INTO measurements(sensor_id, measured_value, measured_at, status) VALUES(%s,%s,%s,%s)",
        (sensor_id, value, measured_at, status)
    )
    conn.commit()
    measurement_id = cursor.lastrowid

    if status == 'critical':
        cursor.execute(
            "INSERT INTO events(measurement_id, event_type, severity, message) VALUES(%s,%s,%s,%s)",
            (measurement_id, 'limit_exceeded', 'high', 'Η τιμή ξεπέρασε τα επιτρεπτά όρια')
        )
        conn.commit()

    cursor.close()
    conn.close()
    return jsonify({'success': True, 'status': status, 'measurement_id': measurement_id})

if __name__ == '__main__':
    app.run(debug=True)

```

Παράρτημα Γ: Ενδεικτικός έλεγχος αποκλίσεων σε Python

Ενδεικτικός κώδικας ελέγχου αποκλίσεων

```

def detect_anomaly(values, min_limit, max_limit, max_consecutive=3):
    consecutive = 0
    results = []

    for item in values:
        value = item['value']
        timestamp = item['time']

        if value < min_limit or value > max_limit:
            consecutive += 1
            status = 'critical' if consecutive >= max_consecutive else 'warning'

```

```

else:
    consecutive = 0
    status = 'normal'

results.append({
    'time': timestamp,
    'value': value,
    'status': status,
    'consecutive_alerts': consecutive
})

return results

measurements = [
    {'time': '10:00', 'value': 24.1},
    {'time': '10:05', 'value': 24.8},
    {'time': '10:10', 'value': 29.6},
    {'time': '10:15', 'value': 30.2},
    {'time': '10:20', 'value': 31.0}
]

analysis = detect_anomaly(measurements, min_limit=18.0, max_limit=28.0)
for row in analysis:
    print(row)

```

Παράρτημα Δ: Ενδεικτική οπτικοποίηση με Chart.js

Ενδεικτικός κώδικας Chart.js

```

<canvas id="temperatureChart"></canvas>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js"></script>
<script>
fetch('/api/measurements?sensor_id=1')
.then(response => response.json())
.then(rows => {
    const labels = rows.map(row => row.measured_at);
    const values = rows.map(row => row.measured_value);

    new Chart(document.getElementById('temperatureChart'), {
        type: 'line',
        data: {
            labels: labels,
            datasets: [{
                label: 'Θερμοκρασία συστήματος',
                data: values,
                tension: 0.25
            }]
        }
    });
});
</script>

```

Παράρτημα Ε: Ενδεικτικές εικόνες από την Web Εφαρμογή μας

Ψηφιακό Δίδυμο

DashboardΜετρήσειςΕιδοποιήσειςAPI

Dashboard Ψηφιακού Διδύμου

Κατάσταση: Προειδοποίηση

Οπτική αναπαράσταση λειτουργικής κατάστασης τεχνικού συστήματος με δεδομένα αισθητήρων, δείκτες κατάστασης και εντοπισμό αποκλίσεων.

Θερμοκρασία

26.46 °C

Τελευταία μέτρηση

Υγρασία

49.43 %

Περιβάλλον εγκατάστασης

Δόνηση

2.43

mm/s

Ειδοποιήσεις

22

Υψηλής σοβαρότητας: 12

Χρονοσειρές λειτουργίας

Ενδεικτική εξέλιξη θερμοκρασίας, δόνησης και κατανάλωσης ενέργειας.

Χρόνος	Θερμοκρασία (°C)	Δόνηση (mm/s)	Ενέργεια (kWh)
00:53	26.46	2.43	11.23
01:23	25.87	2.66	10.58
01:53	23.2	2.44	12.36
02:23	25.74	2.9	12.3
02:53	23.39	3.71	11.77
03:23	26.98	3.24	12.37
03:53	25.97	3.37	10.41
04:23	27.29	2.96	10.38
04:53	22.62	3.71	11.92
05:23	26.36	3.48	12.02
05:53	25.29	3.3	13.47
06:23	27.41	2.71	10.14
06:53	25.78	3.05	12.66
07:23	27.12	2.68	13.17

Ψηφιακή κατάσταση

Σύστημα: Τεχνική Εγκατάσταση Α

Τοποθεσία: Εργαστήριο / Πιλοτική εγκατάσταση

Τελευταία λειτουργία: Κανονική λειτουργία

Πρόσφατες ειδοποιήσεις

2026-05-28 09:13:32

Πίεση εκτός ορίων: 0.97 bar

2026-05-28 09:03:32

Πίεση εκτός ορίων: 0.98 bar

2026-05-28 08:53:32

Πίεση εκτός ορίων: 1.05 bar

2026-05-28 08:43:32

Πίεση εκτός ορίων: 0.91 bar

Ψηφιακό Δίδυμο

DashboardΜετρήσειςΕιδοποιήσειςAPI

Πίνακας μετρήσεων

Οι μετρήσεις αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων και αποτελούν το ιστορικό λειτουργίας του ψηφιακού διδύμου.

Χρόνος	Θερμοκρασία	Υγρασία	Δόνηση	Ενέργεια	Πίεση	Κατάσταση
2026-05-28 12:43:32	26.46 °C	49.43 %	2.43 mm/s	11.23 kWh	1.85 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 12:33:32	25.87 °C	55.43 %	2.66 mm/s	10.58 kWh	1.83 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 12:23:32	23.2 °C	45.34 %	2.44 mm/s	12.36 kWh	1.75 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 12:13:32	25.74 °C	57.7 %	2.9 mm/s	12.3 kWh	2.11 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 12:03:32	23.39 °C	50.2 %	3.71 mm/s	11.77 kWh	2.18 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 11:53:32	26.98 °C	52.07 %	3.24 mm/s	12.37 kWh	1.78 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 11:43:32	25.97 °C	54.99 %	3.37 mm/s	10.41 kWh	2.22 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 11:33:32	27.29 °C	48.07 %	2.96 mm/s	10.38 kWh	2.07 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 11:23:32	22.62 °C	55.31 %	3.71 mm/s	11.92 kWh	1.83 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 11:13:32	26.36 °C	57.24 %	3.48 mm/s	12.02 kWh	2.17 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 11:03:32	25.29 °C	56.35 %	3.3 mm/s	13.47 kWh	2.21 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 10:53:32	27.41 °C	55.4 %	2.71 mm/s	10.14 kWh	2.01 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 10:43:32	25.78 °C	45.67 %	3.05 mm/s	12.66 kWh	2.19 bar	Κανονική λειτουργία
2026-05-28 10:33:32	27.12 °C	57.46 %	2.68 mm/s	13.17 kWh	2.14 bar	Κανονική λειτουργία

```
high_alerts: 12,
- latest_measurement: {
  energy: 11.23,
  humidity: 49.43,
  id: 290,
  measured_at: "2026-05-28 12:43:32",
  operating_state: "Κανονική λειτουργία",
  pressure: 1.85,
  system_id: 2,
  temperature: 26.46,
  vibration: 2.43
},
total_alerts: 22,
total_measurements: 145
```

Ειδοποιήσεις και ανωμαλίες

Η σελίδα παρουσιάζει τις αποκλίσεις που εντοπίστηκαν με βάση προκαθορισμένα όρια λειτουργίας.

Χρόνος	Τύπος	Σοβαρότητα	Μήνυμα	Σχετική μέτρηση
2026-05-28 09:13:32	pressure	Μεσαία	Πίεση εκτός ορίων: 0.97 bar	T=25.42°C, V=3.6mm/s, E=10.25kWh, P=0.97bar
2026-05-28 09:03:32	pressure	Μεσαία	Πίεση εκτός ορίων: 0.98 bar	T=23.47°C, V=2.21mm/s, E=13.19kWh, P=0.98bar
2026-05-28 08:53:32	pressure	Μεσαία	Πίεση εκτός ορίων: 1.05 bar	T=27.34°C, V=3.33mm/s, E=11.44kWh, P=1.05bar
2026-05-28 08:43:32	pressure	Μεσαία	Πίεση εκτός ορίων: 0.91 bar	T=22.93°C, V=3.22mm/s, E=9.68kWh, P=0.91bar
2026-05-28 08:33:32	pressure	Μεσαία	Πίεση εκτός ορίων: 1.08 bar	T=24.24°C, V=2.8mm/s, E=12.53kWh, P=1.08bar
2026-05-28 08:23:32	pressure	Μεσαία	Πίεση εκτός ορίων: 0.97 bar	T=23.32°C, V=3.41mm/s, E=11.63kWh, P=0.97bar
2026-05-28 04:03:32	vibration	Υψηλή	Αυξημένη δόνηση: 8.21 mm/s	T=23.54°C, V=8.21mm/s, E=10.86kWh, P=1.87bar
2026-05-28 03:53:32	vibration	Υψηλή	Αυξημένη δόνηση: 9.68 mm/s	T=26.12°C, V=9.68mm/s, E=12.81kWh, P=1.87bar
2026-05-28 03:43:32	vibration	Υψηλή	Αυξημένη δόνηση: 8.16 mm/s	T=24.56°C, V=8.16mm/s, E=11.08kWh, P=1.77bar
2026-05-28 03:33:32	vibration	Υψηλή	Αυξημένη δόνηση: 8.59 mm/s	T=27.02°C, V=8.59mm/s, E=12.8kWh, P=2.0bar
2026-05-28 03:23:32	vibration	Υψηλή	Αυξημένη δόνηση: 8.67 mm/s	T=23.89°C, V=8.67mm/s, E=13.02kWh, P=1.92bar
2026-05-27 22:03:32	temperature	Υψηλή	Υψηλή θερμοκρασία: 36.83 °C	T=36.83°C, V=3.34mm/s, E=17.49kWh, P=1.83bar
2026-05-27 21:53:32	temperature	Υψηλή	Υψηλή θερμοκρασία: 37.84 °C	T=37.84°C, V=2.82mm/s, E=18.92kWh, P=1.94bar
2026-05-27 21:53:32	energy	Μεσαία	Αυξημένη κατανάλωση ενέργειας: 18.92 kWh	T=37.84°C, V=2.82mm/s, E=18.92kWh, P=1.94bar
2026-05-27 21:43:32	temperature	Υψηλή	Υψηλή θερμοκρασία: 38.57 °C	T=38.57°C, V=3.78mm/s, E=19.97kWh, P=2.08bar
2026-05-27 21:43:32	energy	Μεσαία	Αυξημένη κατανάλωση ενέργειας: 19.97 kWh	T=38.57°C, V=3.78mm/s, E=19.97kWh, P=2.08bar
2026-05-27 21:33:32	temperature	Υψηλή	Υψηλή θερμοκρασία: 37.73 °C	T=37.73°C, V=2.42mm/s, E=19.21kWh, P=1.93bar