



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

Σύγκριση και ανάπτυξη ασαφών μέτρων
ομοιότητας και συσχέτισης δεδομένων
αισθητήρων σε εφαρμογές υγείας και
περιβάλλοντα υποβοηθούμενης
διαβίωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΤΕΡΛΕΜΕ

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουτσουρής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2025



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Εργαστήριο Βιοϊατρικής Τεχνολογίας

Σύγκριση και ανάπτυξη ασαφών μέτρων ομοιότητας και συσχέτισης δεδομένων αισθητήρων σε εφαρμογές υγείας και περιβάλλοντα υποβοηθούμενης διαβίωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΤΕΡΛΕΜΕ

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουτσουνής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29 Σεπτεμβρίου 2025.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Δημήτριος Κουτσουνής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ανδριάννα Πρέντζα
Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πειραιώς

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2025

(Υπογραφή)

.....

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΤΕΡΛΕΜΕΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © **Νικόλαος Τερλεμές, 2025.**

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Αυτή η εργασία διήρκησε 10 χρόνια. Όταν ξεκίνησε, ήμουν 23 χρονών και τώρα είμαι 33. Έχοντας μεγαλώσει αρκετά, καταλαβαίνω πως η εργασία αυτή δηλώνει την κατάσταση στην οποία ήμουν, μια κατάσταση που αποτυπώνει πως ζούμε οι περισσότεροι σήμερα. Μέρα με την μέρα, χωρίς να μπορούμε να φανταστούμε καν μια άλλη ζωή, χωρίς να έχουμε ένα πλάνο για τα χρόνια και τα ονείρα μας. Η ψευδαίσθηση ότι τα πράγματα θα μείνουν εφικτά και διαθέσιμα είναι ένα κοινό ανασταλτικό.

Παρόλα αυτά, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που είχα γύρω μου, και με βοήθησαν με αυτό το ταξίδι. Θα ξεκινήσω από την κυρία Ελευθερία Βελλίδου, η οποία πέρα από την υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια, πάντα ήταν διαθέσιμη και ανεκτική, με αποτέλεσμα να μπορώ τώρα να τελειώσω την εργασία αυτή. Στη συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου. Έχουν υπάρξει τεράστια ανακούφιση και έχουν δώσει κατεύθυνση στην ζωή μου, η οποία είναι σπάνια και πολύτιμη. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τα αδέρφια μου, που η φροντίδα τους και, συνολικά, η σχέση μας με έχουν βγάλει πολλές φορές από τα δύσκολα. Ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου, ώστε να έχω την δυνατότητα να κάνω αυτές τις σπουδές και αυτήν την εργασία. Η στήριξη και η αγάπη τους μου έδωσαν την σταθερότητα και την ασφάλεια ώστε να μπορέσω να ξαναδιαπραγματευτώ την κατάσταση μου. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και συντρόφο μου, Μαριλένα, που χωρίς αυτήν δεν θα υπήρχε αυτή η εργασία, ούτε και τα περισσότερα ωραία πράγματα στην ζωή μου.

Περίληψη

Η πρόοδος στην επιστήμη υλικών και την ηλεκτρονική επέτρεψε τη μαζική παραγωγή αισθητήρων, δημιουργώντας την ανάγκη διαχείρισης των δεδομένων τους. Αυτή την πρόκληση αντιμετωπίζει ο κλάδος του Internet of Things (IoT). Ένας από τους κλάδους που επηρεάστηκαν από την δυνατότητα δημιουργίας και διαχείρισης περιβάλλοντων διάχυτης τηλεπισκόπησης, είναι η Βιοϊατρική, καθώς πλέον είναι εφικτή η ανάλυση δεδομένων από αισθητήρες κάθε είδους. Η ανάλυση δεδομένων από πολλούς αισθητήρες σε Περιβάλλοντα Υποβοηθούμενης Διαβίωσης (ΠΥΔ) παραμένει δύσκολη, καθώς περιέχουν θόρυβο και αβεβαιότητα. Οι εξελίξεις στη Μηχανική Μάθηση έχουν δώσει λύσεις σε παρόμοια προβλήματα, για αυτό και χρησιμοποιούνται συχνά στην ανάλυση δεδομένων από ΠΥΔ.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπεύει στη μελέτη, σχεδίαση και ανάπτυξη αλγορίθμων αναζήτησης, σύγκρισης και συσχέτισης δεδομένων αισθητήρων, ανεξάρτητα από το πλαίσιο τους, προκειμένου να επιτρέψει την καλύτερη διαχείριση δεδομένων από ΠΥΔ. Συγκεκριμένα, συγκρίνει και αναπτύσσει μετρικές ομοιότητας δεδομένων αισθητήρων, δίνοντας ιδιαίτερο βάρος σε μετρικές οι οποίες προκύπτουν από την θεωρία ασαφών συνόλων. Η προτεινόμενη Normalized Difference Gaussian-Streaming (NDG-S) μέθοδος επιτυγχάνει έως εικοσαπλάσια ταχύτερη εκτίμηση membership functions από το Kernel Density Estimation (KDE). Οι ασαφείς μετρικές ομοιότητας επιτυγχάνουν F1-score έως 0.927 στο σύνολο δεδομένων PAMAP2 και 0.891 στο Opportunity. Η αξιολόγηση cross-dataset robustness αποκάλυψε μέτρια συσχέτιση ($\rho=0.47$) μεταξύ των συνόλων δεδομένων, υποδεικνύοντας την ανάγκη dataset-specific βελτιστοποίησης. Παρά τους περιορισμούς στη γενίκευση μεταξύ συνόλων δεδομένων, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι ασαφείς μετρικές αποτελούν ισχυρή εναλλακτική για HAR εφαρμογές.

Λέξεις Κλειδιά

IoT, Βιοϊατρική, Περιβάλλοντα Υποβοηθούμενης Διαβίωσης, Ασαφής Λογική, Αναζήτηση Αισθητήρων, Μετρικές Ομοιότητας, Opportunity, PAMAP2

Abstract

Advances in materials science and electronics have enabled the mass production of sensors, creating the need to manage their data. This challenge is addressed by the field of the Internet of Things (IoT). One of the domains most affected by the ability to create and manage pervasive sensing environments is Biomedicine, as it is now possible to analyze data from all kinds of sensors. However, analyzing data from multiple sensors in Ambient Assisted Living (AAL) environments remains difficult, as such data often contain noise and uncertainty. Developments in Machine Learning have provided solutions to similar problems, which is why these techniques are frequently applied in AAL data analysis.

Based on the above, the present thesis aims to study, design, and develop algorithms for searching, comparing, and correlating sensor data, regardless of context, in order to improve data management in AAL environments. Specifically, it compares and develops sensor data similarity metrics, with particular emphasis on metrics derived from fuzzy set theory. The proposed Normalized Difference Gaussian-Streaming (NDG-S) method achieves up to twenty times faster estimation of membership functions compared to Kernel Density Estimation (KDE). Fuzzy similarity metrics achieve F1-scores of up to 0.927 on the PAMAP2 dataset and 0.891 on the Opportunity dataset. The evaluation of cross-dataset robustness revealed moderate correlation ($\rho = 0.47$) between datasets, indicating the need for dataset-specific optimization. Despite the limitations in generalization across datasets, the results suggest that fuzzy metrics constitute a strong alternative for HAR applications.

Keywords

IoT, Biomedicine, Pervasive Health, Fuzzy Logic, Sensor Search, Similarity Metrics, Opportunity, PAMAP2

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Σχημάτων	14
Κατάλογος Πινάκων	15
1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων και εφαρμογές στη Βιοϊατρική	17
1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων	17
1.1.1 Σκοπός	17
1.1.2 Εισαγωγή	18
1.1.3 Αρχιτεκτονική	20
1.1.4 Τεχνολογίες	21
1.1.5 Προκλήσεις	25
1.1.6 Εφαρμογές	27
1.2 Internet of Things και Βιοϊατρική	30
1.2.1 Εισαγωγή	30
1.2.2 Λόγοι σύγκλισης	32
1.2.3 Εφαρμογές	34
2 Περιβάλλοντα Υποβοηθούμενης Διαβίωσης	37
2.1 Εισαγωγή	37
2.2 Χαρακτηριστικά	37
2.2.1 Νοήμων περιβάλλον	38
2.2.2 Σύγχρονες υπολογιστικές και επικοινωνιακές τεχνολογίες . . .	39

2.2.3	Η ανεξαρτησία και η βελτίωση της ποιότητας ζωής των ηλικιωμένων ως σκοπός	39
2.3	Τομείς εφαρμογής	40
2.3.1	Ευγηρία στο σπίτι	40
2.3.2	Ευγηρία στη κοινότητα	41
2.3.3	Ευγηρία στην εργασία	42
2.4	Εργαλεία και Τεχνικές	42
2.4.1	Τεχνολογία 'εξυπνων' σπιτιών	42
2.4.2	Κινητή και ένδυτη τεχνολογία	44
2.4.3	Υποβοηθητική ρομποτική	47
2.4.4	Αλγόριθμοι και υπολογιστικές τεχνικές	49
2.5	Προκλήσεις	50
2.5.1	Τεχνική υλοποίηση	50
2.5.2	Αποδοχή από τους χρήστες	52
2.5.3	Εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και θεωρητικός διάλογος	53
3	Θεωρία Ασαφών Συνόλων και Λογική	55
3.1	Εισαγωγή	55
3.2	Θεωρία Ασαφών Συνόλων	56
3.3	Τελεστές Ασαφούς Συνολοθεωρίας	58
3.3.1	Βασικές Σχέσεις: Κενό, Υποσύνολο, Ισότητα	58
3.3.2	Ασαφές Συμπλήρωμα	60
3.3.3	Ασαφής Τομή (t-norm)	61
3.3.4	Ασαφής Ένωση (t-conorm)	61
3.3.5	Ασαφής Συνεπαγωγή	62
3.3.6	Συνδυασμοί Ασαφών Πράξεων	63
4	Ασαφείς μετρικές ομοιότητας για δεδομένα αισθητήρων	65
4.1	Προκλήσεις	65
4.2	Σχεδιαστικές απαιτήσεις	66
4.3	Συναφείς εργασίες	66
4.3.1	Βασικές αρχές ασαφούς αναζήτησης	66
4.3.2	Μετρικές ομοιότητας ασαφών συνόλων	68
4.4	Μεθοδολογία	68
4.4.1	Δημιουργία Ασαφούς Συνόλου	68
4.4.2	Μετρικές Ομοιότητας	69
4.5	Σύνοψη και Συμπεράσματα	72

5	Μεθοδολογία	75
5.1	Εισαγωγή στη Μεθοδολογία	75
5.1.1	Χάρτης Μεθοδολογίας	75
5.2	Ερευνητικός Σχεδιασμός και Προσέγγιση	76
5.2.1	Κεντρική Μεθοδολογική Επιλογή: Ανάκτηση (Retrieval) βάσει Ομοιότητας	77
5.3	Σύνολα Δεδομένων	78
5.3.1	Το Σύνολο Δεδομένων Opportunity	78
5.3.2	Το Σύνολο Δεδομένων PAMAP2	79
5.3.3	Διαδικασίες Συλλογής και Πρωτόκολλα	79
5.3.4	Ζητήματα Ηθικής και Ανωνυμοποίησης	80
5.4	Προεπεξεργασία Δεδομένων	81
5.4.1	Παραθυροποίηση Χρονοσειρών	81
5.4.2	Κανονικοποίηση Δεδομένων ανά Παράθυρο	82
5.5	Παραγωγή Ασαφών Συναρτήσεων Συμμετοχής	84
5.5.1	Kernel Density Estimation (KDE)	84
5.5.2	Normal Distribution Generator (NDG)	84
5.5.3	Streaming NDG (NDG-S)	85
5.5.4	Συγκριτική Ανάλυση Μεθόδων	87
5.5.5	Προσέγγιση Ανά Αισθητήρα	87
5.6	Πλαίσιο Μετρικών Ομοιότητας	88
5.6.1	Συνολοθεωρητικές Μετρικές	89
5.6.2	Μετρικές Βασισμένες σε Απόσταση	89
5.6.3	Μετρικές Συσχέτισης	89
5.6.4	Πληροφοριοθεωρητικές Μετρικές	89
5.6.5	Προηγμένες και Παραλλαγές Μετρικών	90
5.6.6	Εφαρμογή στα Πειράματα	90
5.6.7	Μεθοδολογία Συνδυασμού Ανά Αισθητήρα	91
5.7	Ερευνητικό Ερώτημα 1: Σύγκριση Μεθόδων Εκτίμησης Συναρτήσεων Συμμετοχής	92
5.7.1	Διατύπωση Υπόθεσης	92
5.7.2	Πειραματικό Πρωτόκολλο	92
5.7.3	Δείκτες Αξιολόγησης	92
5.7.4	Περιορισμοί EE1	93
5.8	Ερευνητικό Ερώτημα 2: Αξιολόγηση Ασαφών Μετρικών Ομοιότητας	93
5.8.1	Διατύπωση Υπόθεσης	93
5.8.2	Πειραματικό Πρωτόκολλο	93

5.8.3	Μετρικές Αξιολόγησης Ανάκτησης	95
5.8.4	Στρατηγική Δειγματοληψίας και Διαχωρισμός Δεδομένων	97
5.8.5	Περιορισμοί EE2	97
5.9	Ερευνητικό Ερώτημα 3: Γενικευσιμότητα και Σταθερότητα μεταξύ Συνόλων Δεδομένων	98
5.9.1	Διατύπωση Υπόθεσης	98
5.9.2	Πειραματικό Πρωτόκολλο	98
5.9.3	Δείκτες Αξιολόγησης	99
5.9.4	Περιορισμοί EE3	100
5.9.5	Περιορισμοί και Μεθοδολογικές Προκλήσεις	100
5.10	Λεπτομέρειες Υλοποίησης	101
5.10.1	Στρατηγικές Βελτιστοποίησης Μνήμης	101
5.11	Σύνοψη κεφαλαίου	102
6	Αποτελέσματα	105
6.1	Εισαγωγή	105
6.2	EE1: Σύγκριση Αλγορίθμων Εκτίμησης Συναρτήσεων Συμμετοχής	105
6.2.1	Διατύπωση Ερευνητικού Ερωτήματος	105
6.2.2	Υπολογιστική Απόδοση	106
6.2.3	Ακρίβεια Εκτίμησης	106
6.3	EE2: Αξιολόγηση Μετρικών Ομοιότητας για Ταξινόμηση Δραστηριοτήτων	109
6.3.1	Διατύπωση Ερευνητικού Ερωτήματος	109
6.3.2	Συνολική Απόδοση Μετρικών	110
6.3.3	Στατιστική Επικύρωση EE2	112
6.3.4	Συμπεράσματα EE2	114
6.4	EE3: Γενικευσιμότητα σε Διαφορετικά Σύνολα Δεδομένων	114
6.4.1	Διατύπωση Ερευνητικού Ερωτήματος	114
6.4.2	Σενάρια Cross-Dataset Μεταφοράς	115
6.4.3	Ανάλυση Συσχέτισης Spearman	115
6.4.4	Ανάλυση Κορυφαίων Μετρικών	118
6.4.5	Στατιστική Επικύρωση EE3	118
6.4.6	Συμπεράσματα EE3	119
6.5	Συνδυαστική Ανάλυση	119
6.5.1	Κορυφαίες Μετρικές Συνολικά	119
6.6	Επικύρωση Ερευνητικών Υποθέσεων	120
6.6.1	Σύνοψη Αποτελεσμάτων	120

6.7	Σύνοψη Κεφαλαίου	120
6.7.1	Συστάσεις Υλοποίησης	121
7	Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις	123
7.1	Ανακεφαλαίωση Ερευνητικής Συμβολής	123
7.2	Πρακτικές Επιπτώσεις και Συστάσεις	124
7.3	Περιορισμοί της Μελέτης	124
7.4	Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις	125
7.5	Μελλοντικές Πρακτικές Κατευθύνσεις	126
7.6	Επίλογος	126
	Βιβλιογραφία	128

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Γραφική απεικόνιση της έννοιας του Hype cycle και απεικόνιση των διάφορων τεχνολογιών το 2018 από την Gartner [1]	18
1.2	Γραφική απεικόνιση της εξέλιξης του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών στο Διαδίκτυο [2]	19
1.3	Γραφική απεικόνιση της πρότυπης αρχιτεκτονικής IoT εφαρμογών [3] . .	20
1.4	Σχηματική απεικόνιση μιας ‘παθητικής’ ετικέτας RFID[4].	22
1.5	Σχηματική απεικόνιση των εφαρμογών του IoT [5]	27
1.6	Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης του ανθρώπινου πληθυσμού και της ηλικιακής σύνθεσης του. [6]	30
1.7	Έλλειψη ιατρικού προσωπικού ανάλογα με την ήπειρο και το σχετικό μέσο εισόδημα κάθε χώρας. [7]	31
1.8	Σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής ενός IoT συστήματος αποκατάστασης [8]	32
2.1	Σχηματική απεικόνιση των πλεονεκτημάτων των ΠΥΔ	38
2.2	Σχηματική απεικόνιση των διάφορων εργαλείων της ένδυτης τεχνολογίας	45
2.3	Σχηματική απεικόνιση των κατηγοριών της υποβοηθητικής ρομποτικής .	47
2.4	Σχηματική απεικόνιση των σκοπών της υποβοηθητικής ρομποτικής . . .	49
3.1	(a) Παράδειγμα αυστηρού (crisp) συνόλου, (b) Παράδειγμα ασαφούς συνόλου.	56
5.1	Διαδικασία προεπεξεργασίας χρονοσειρών αισθητήρων. Απεικονίζεται η πλήρης αλυσίδα από τα ακατέργαστα σήματα του συνόλου OPPORTUNITY μέσω επικαλυπτόμενης παραθυροποίησης με απόδοση ετικετών βάσει πλειοψηφικού κανόνα και δυναμικής κανονικοποίησης min-max ανά παράθυρο.	83

5.2	Διαστάσεις δεδομένων στην προσέγγιση ανά αισθητήρα, από τα αρχικά σήματα ($M \times T$) έως τις τελικές membership functions ($N \times M \times \mu(x)$). Όπου M : αριθμός αισθητήρων, T : χρονικά δείγματα, s : μέγεθος παραθύρου, N : αριθμός παραθύρων, $\mu(x)$: membership function values . . .	88
5.3	Διάγραμμα της προσέγγισης ανάκτησης για την αξιολόγηση μετρικών ομοιότητας. Ένα παράθυρο ερώτημα συγκρίνεται με όλα τα παράθυρα της βιβλιοθήκης χρησιμοποιώντας όλες τις μετρικές ομοιότητας, και τα αποτελέσματα ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά ομοιότητας για την αξιολόγηση της απόδοσης.	94
6.1	Σύγκριση χρόνων εκτέλεσης των τριών αλγορίθμων εκτίμησης συναρτήσεων συμμετοχής	107
6.2	Box plots κατανομής επιδόσεων F1-Score μεταξύ NDG-S, NDG, και KDE	108
6.3	Απόδοση μετρικών ομοιότητας ανά οικογένεια (κορυφαίες μετρικές από κάθε οικογένεια με συγκριτικό μέσο όρο). Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τον συνολικό μέσο όρο απόδοσης (0.678). . . .	112
6.4	Transfer heatmap γενικευσιμότητας: Opportunity $\leftrightarrow$ PAMAP2 για όλες τις μετρικές	116
6.5	Σταθερότητα κατάταξης μετρικών στα σενάρια cross-dataset	117

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Δημοφιλή πρωτόκολλα επικοινωνίας	24
2.1	Αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συχνά στα οικιακά ΠΥΔ [9][10]	43
3.1	Παραδείγματα κοινών συναρτήσεων συμμετοχής (βάσει [11, 12]).	59
3.2	Συναρτήσεις ασαφούς συμπληρώματος [13, 14].	60
3.3	Παραδείγματα t-norm (ασαφούς τομής)	61
3.4	Βασικοί τελεστές ασαφούς ένωσης (t-conorm)	62
3.5	Ενδεικτικοί τελεστές ασαφούς συνεπαγωγής [11, 12]	63
3.6	Συνδυασμοί ασαφών πράξεων που διατηρούν τη δεικνότητα	64
5.1	Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων με μεθοδολογικές ενότητες και μετρικές αξιολόγησης	76
6.1	Συνολική κατάταξη μετρικών ομοιότητας στην ανάκτηση και ταξινόμηση δραστηριοτήτων	110
6.2	Κατηγοριοποίηση μετρικών ομοιότητας ανά οικογένεια	111
6.3	Απόδοση κορυφαίων μετρικών στο σενάριο Opportunity → PAMAP2 .	115
6.4	Απόδοση κορυφαίων μετρικών στο σενάριο PAMAP2 → Opportunity .	115
6.5	Κορυφαίες μετρικές ανά σενάριο cross-dataset (κατά MRR)	118
6.6	Κορυφαίες μετρικές ομοιότητας ανά κατηγορία επίδοσης	120
6.7	Επαλήθευση ερευνητικών υποθέσεων	120

Κεφάλαιο 1

Διαδίκτυο των Πραγμάτων και εφαρμογές στη Βιοϊατρική

1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων

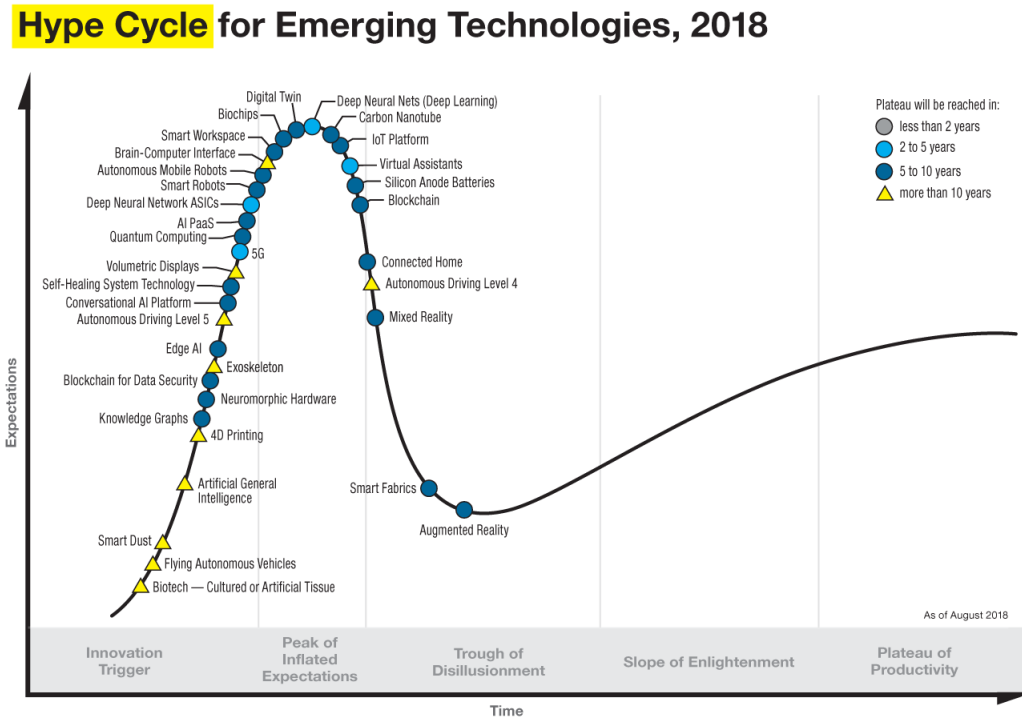
1.1.1 Σκοπός

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 2010-2020, ο όρος Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things ή εν συντομία IoT) αποτέλεσε έναν ακόμη αναδυόμενο τεχνολογικό κλάδο, ο οποίος πέρασε από τα διάφορα στάδια αποδοχής και ωρίμανσης του (Hype Cycle), όπως αποδίδονται γραφικά στο Σχήμα 1.1. Λόγω του χάσματος μεταξύ των υψηλών προσδοκιών και των πραγματικών αποτελεσμάτων που έχει επιφέρει ο κλάδος, αλλά και λόγω της ασάφειας που χαρακτηρίζει πολλές σχετικές εφαρμογές, η ουσία και η πραγματική αξία του Διαδικτύου των Πραγμάτων δεν έχει αναδειχθεί επαρκώς στο ευρύ κοινό.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων είναι ένας τεχνολογικός κλάδος με αντικείμενο τη σχεδίαση και την υλοποίηση της μελλοντικής διεπαφής του φυσικού και του ψηφιακού χώρου. Ο στόχος είναι η δημιουργία ενός περιβάλλοντος διάχυτης παρουσίας και παρακολούθησης, αποτελούμενο από διασυνδεδεμένα αντικείμενα, τα οποία αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους και συνεργάζονται για την επίτευξη κοινών στόχων. [15]

Η επίτευξη αυτού του στόχου θα διαμορφώσει την καθημερινή ζωή και συμπεριφορά των ανθρώπων της εποχής, όπως ακριβώς το Διαδίκτυο συνεχίζει να μετασχηματίζει τις ζωές μας. Ένα τέτοιο περιβάλλον θα επηρεάσει τομείς όπως η μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, ο αυτοματισμός, η βιομηχανική παραγωγή και τέλος ο τομέας της υγείας.

Φυσικά, οι δυνατότητες αυτές δεν έχουν περάσει απαρατήρητες από τον επιχειρηματικό τομέα. Συγκεκριμένα, οι εκτιμήσεις της Cisco προέβλεπαν ότι το 2022 θα υπάρχουν πάνω από 28.5 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές στο Διαδίκτυο [16],



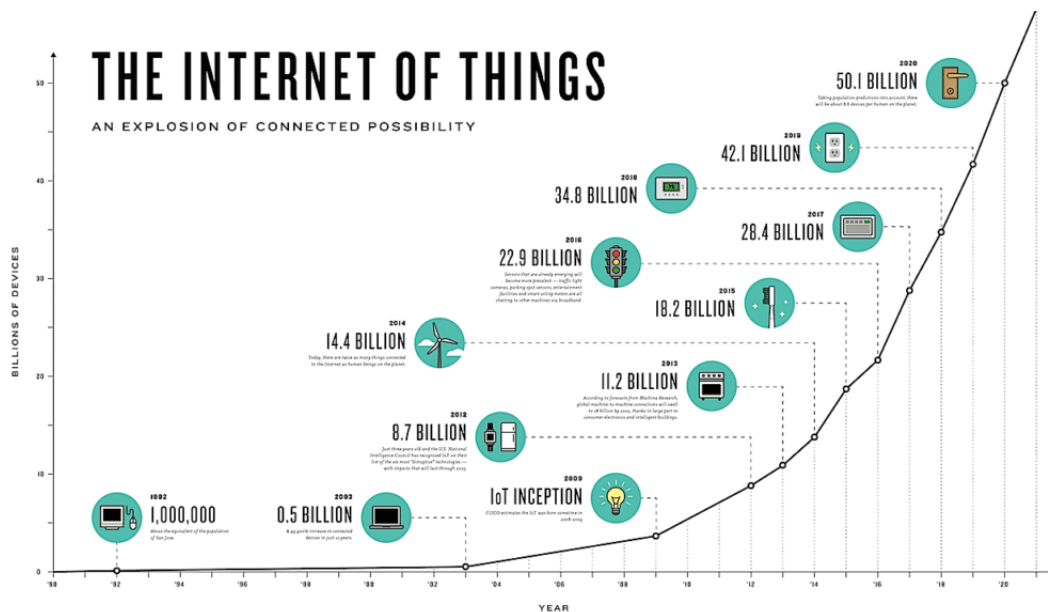
Σχήμα 1.1: Γραφική απεικόνιση της έννοιας του Hype cycle και απεικόνιση των διάφορων τεχνολογιών το 2018 από την Gartner [1]

όπως αποδίδεται στο Σχήμα 1.2. Σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα, η ανάπτυξη παρουσίασε ταχύτερους ρυθμούς από τις προβλέψεις. Παράλληλα, η Gartner, Inc. εκτιμά ότι το 2020 περισσότερες από τις μισές νέες επιχειρησιακές διαδικασίες και συστήματα θα ενσωματώνουν κάποιο στοιχείο του IoT [17]. Τέλος, η McKinsey εκτιμούσε ότι το 2025 η οικονομική επίπτωση του κλάδου στην παγκόσμια οικονομία θα φτάσει τα τρισεκατομμύρια δολάρια [18], προβλέψεις που έχουν επιβεβαιωθεί σε μεγάλο βαθμό.

1.1.2 Εισαγωγή

Το IoT ορίζεται ως ‘ένα παγκόσμιας εμβέλειας δίκτυο από άμεσα προσπελάσιμα, μοναδικά διευθυνσιοδοτημένα, διασυνδεδεμένα αντικείμενα, βασισμένο σε σαφώς ορισμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας’ [19]. Ουσιαστικά, αποτελεί μια επέκταση του Διαδικτύου, η οποία καθιστά εφικτή τη συνδεσιμότητα φυσικών αντικειμένων. Η επαύξηση των δυνατοτήτων των αντικειμένων ή ‘πραγμάτων’, επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ηλεκτρονικών συστημάτων και αισθητήρων, τα οποία επιτρέπουν την επικοινωνία και αλληλεπίδραση με άλλα αντικείμενα μέσω του Διαδικτύου, καθώς και τον απομακρυσμένο έλεγχο και την παρακολούθησή τους.

Οι δυνατότητες αυτές είναι αποτέλεσμα της σύγκλισης πολλαπλών ετερογενών τεχνολογικών τομέων. Αρχικά, η συνεχιζόμενη επιβεβαίωση του νόμου του Moore και



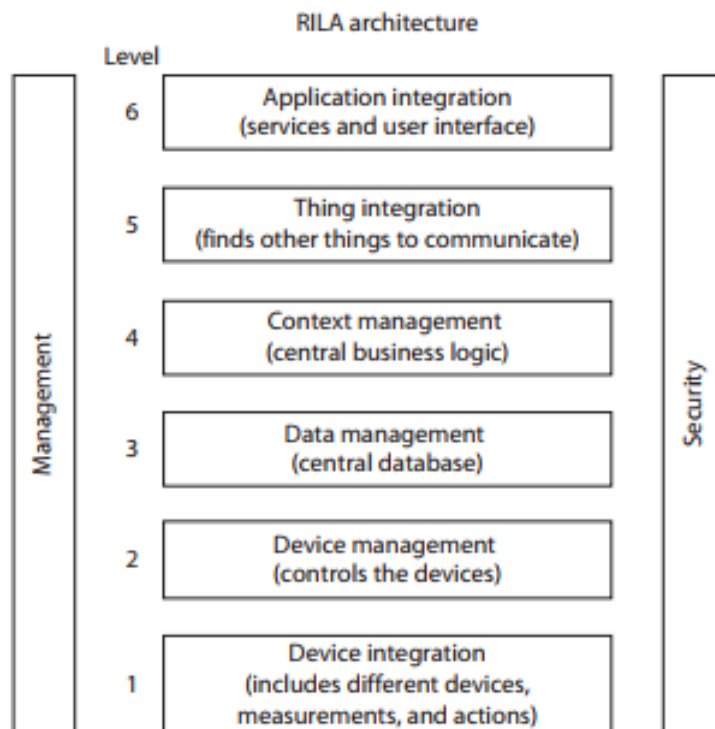
Σχήμα 1.2: Γραφική απεικόνιση της εξέλιξης του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών στο Διαδίκτυο [2]

οι εξελίξεις στη μικροηλεκτρονική, επιτρέπουν την μαζική παραγωγή μικρών, φθηνών, φορητών ηλεκτρονικών συσκευών και αισθητήρων κάθε είδους. Παράλληλα, την τελευταία δεκαετία παρατηρήθηκε δραστική αλλαγή στον τρόπο πρόσβασης στο διαδίκτυο. Πλέον, οι φορητές συσκευές είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο μερίδιο διακίνησης δεδομένων μέσω του διαδικτύου, σε αντίθεση με την παραδοσιακή δίοδο των προσωπικών υπολογιστών [16].

Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη του Cloud Computing επιτρέπει την εύκολη και αποδοτική διαχείριση πολύπλοκων υπολογιστικών συστημάτων και ετερογενών ροών δεδομένων. Αυτό καθιστά την κατανομημένη επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων εφικτή και προτιμότερη, σε σχέση με τη συγκεντρωτική παραδοσιακή εκδοχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο τεχνολογικός κλάδος του Edge Computing, ο οποίος στοχεύει στην ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων στη συσκευή ή στο περιβάλλον, στα οποία αυτά συλλέχθηκαν. Επίσης, οι εξελίξεις στον τομέα της Μηχανικής Μάθησης επιτρέπουν την αποδοτική και άμεση εξαγωγή πληροφορίας και αξίας από αυτόν τον μεγάλο όγκο δεδομένων.

Τέλος, η προτεραιότητα που δίνεται στον κλάδο του IoT από τους ακαδημαϊκούς και επιχειρηματικούς κύκλους, οφείλεται στην ανάδειξη του Διαδικτύου ως του νέου πεδίου καινοτομίας. Κατά την τελευταία δεκαετία, αναδείχθηκαν νέες επιχειρήσεις ενώ παλιότερες επαναπονοητεύθηκαν στρατηγικά, αξιοποιώντας τις νέες τεχνολογικές δυνατότητες για να επιλύσουν παραδοσιακά προβλήματα (π.χ. Uber, Airbnb, Amazon, κ.τ.λ.).

1.1.3 Αρχιτεκτονική



Σχήμα 1.3: Γραφική απεικόνιση της πρότυπης αρχιτεκτονικής IoT εφαρμογών [3]

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να δημιουργηθούν πρότυπα μοντέλα και αρχιτεκτονικές για την ανάπτυξη εφαρμογών IoT. Μια από τις κυρίαρχες αρχιτεκτονικές, η RILA (Reference IoT Layered Architecture), αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα 1.3. Η RILA αποτελείται από 6 οριζόντια και 2 κάθετα επίπεδα. Τα κάθετα επίπεδα αντιστοιχούν στη διαχείριση και την ασφάλεια, οι οποίες διατρέχουν όλα τα οριζόντια στρώματα της εφαρμογής.

Για την καλύτερη κατανόηση της αρχιτεκτονικής, παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή κάθε επιπέδου. Να σημειωθεί πως αντικείμενο θεωρείται ένα οποιοδήποτε φυσικό αντικείμενο της καθημερινότητας μας, είτε πρόκειται για ένα ψυγείο, σπίτι ή ολόκληρη πόλη, ενώ συσκευή θεωρείται οποιοσδήποτε αισθητήρας ή ενεργοποιητής.

1. **Ενσωμάτωση συσκευών** — Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει την επικοινωνία με κάθε είδους συσκευή, αισθητήρα ή ενεργοποιητή, επικοινωνώντας με καθένα με το αντίστοιχο πρωτόκολλο, τον εντοπισμό ή διαγραφή νέων συσκευών, καθώς και την αδιάλειπτη επικοινωνία τους με τα ανώτερα στρώματα.
2. **Διαχείριση συσκευών** — Αυτό το επίπεδο ελέγχει τις συσκευές, καθώς έχει μια συνολική εικόνα του δικτύου. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει την εισαγωγή ή

διαγραφή νέων συσκευών, την επικοινωνία των εντολών στους ενεργοποιητές, τον εμπλουτισμό των δεδομένων με metadata αναφορικά με το είδος του αισθητήρα από τον οποίο συλλέχθηκαν, και τέλος την προώθηση αυτών στα ανώτερα στρώματα.

3. **Διαχείριση δεδομένων** — Αυτό το επίπεδο μπορεί να θεωρηθεί η βάση δεδομένων της εφαρμογής, όπου τα δεδομένα που σχετίζονται με το αντικείμενο αποθηκεύονται.
4. **Διαχείριση πλαισίου** — Αυτό το επίπεδο ορίζει την λογική πίσω από την εφαρμογή και είναι υπεύθυνο για τα εξής:
 - Ορίζει τους στόχους του αντικειμένου.
 - Λαμβάνει και καταναλώνει το πλαίσιο άλλων αντικειμένων.
 - Παράγει το πλαίσιο του αντικειμένου
 - Αξιολογεί το πλαίσιο του σε σχέση με τους στόχους του.
 - Προκαλεί ενέργειες προκειμένου να πετύχει τους στόχους του.
 - Δημοσιεύει το πλαίσιο του για τα άλλα αντικείμενα
5. **Ενσωμάτωση αντικειμένων** — Αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για τον εντοπισμό άλλων αντικειμένων και την επικοινωνία μαζί τους. Αφού 2 αντικείμενα έχουν βρεθεί, πρέπει να περάσουν μια διαδικασία εγγραφής, κατά την οποία συγκρίνονται τα σχήματα επικοινωνίας πλαισίου και ενεργειών. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει είτε κατανεμημένα είτε κεντρικά, σε ένα διαχειριστικό συστατικό.
6. **Ενσωμάτωση εφαρμογής** — Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει την επικοινωνία του αντικειμένου με τον χρήστη, και η μορφή της καθώς και η υλοποίησή της εξαρτάται έντονα από την εφαρμογή.

Όσον αφορά τα κάθετα επίπεδα, το πρώτο αναφέρεται στη διαχείριση του συστήματος, ενώ το δεύτερο στην ασφάλεια. Και τα δύο διασχίζουν όλα τα οριζόντια επίπεδα, καθώς ζητήματα διαχείρισης και ασφάλειας δεδομένων προκύπτουν σε κάθε στρώμα, από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας των συσκευών μέχρι την λήψη αποφάσεων.

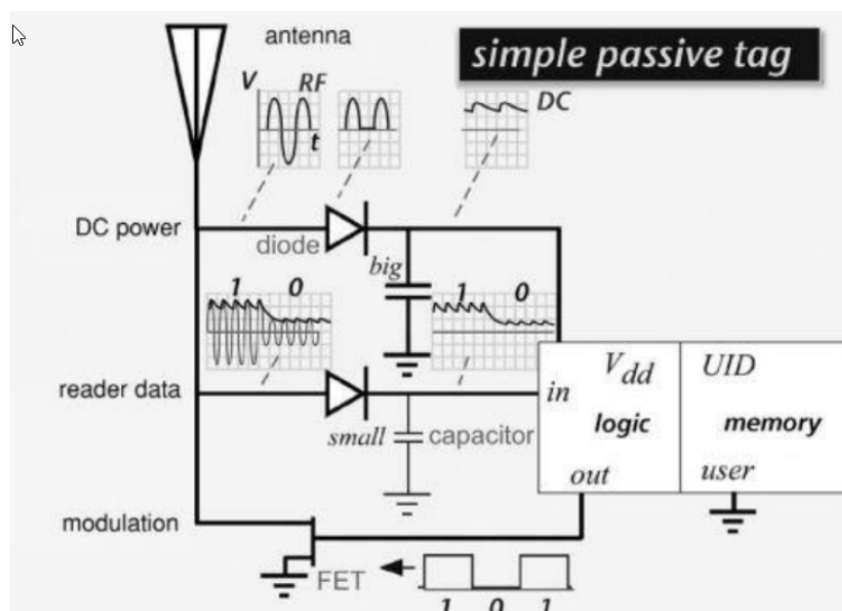
1.1.4 Τεχνολογίες

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, το IoT περιλαμβάνει τεχνολογίες και έννοιες από πολλούς άλλους τομείς. Σε αυτό το σημείο, παρουσιάζονται οι ευρέως χρησιμοποιούμενες και σημαντικές τεχνολογίες, οι οποίες αποτελούν την βάση πολλών IoT εφαρμογών.

Radio frequency identification (RFID)

Η ταυτοποίηση ανθρώπων και αντικειμένων μέσα σε ένα κατακεντρωμένο δίκτυο αποτελεί βασική προϋπόθεση για οποιαδήποτε εφαρμογή IoT. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται ετικέτες RFID (RFID tags), οι οποίες επιτρέπουν την απόδοση ενός μοναδικού προσδιοριστικού σε όποιο αντικείμενο είναι ενσωματωμένα. Μια ετικέτα RFID είναι ένας μικρός επεξεργαστής, ο οποίος εκτελεί τη στοιχειώδη λειτουργία του να μεταδίδει δεδομένα σε τυχόν ερωτήσεις από μια συσκευή ανάγνωσης (RFID reader).

Υπάρχουν 3 ειδών ετικέτες RFID, ανάλογα με την πηγή ενέργειά τους. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ‘παθητικές’ ετικέτες RFID, οι οποίες δεν περιέχουν κάποια πηγή ενέργειας, αλλά εκμεταλλεύονται την ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος για να αποστείλουν τα απαραίτητα δεδομένα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4. Για αυτόν τον λόγο, συνήθως έχουν μικρό μέγεθος και χαμηλό κόστος. Στη δεύτερη κατηγορία



Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση μιας ‘παθητικής’ ετικέτας RFID[4].

ανήκουν οι ‘ήμι-παθητικές’ ετικέτες, οι οποίες έχουν μπαταρία, αλλά την χρησιμοποιούν μόνο για την λειτουργία τους σε περίπτωση ερώτησης από συσκευή ανάγνωσης. Τέλος, στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι ‘ενεργητικές’ ετικέτες, οι οποίες έχουν μπαταρία και περιοδικά μεταδίδουν την πληροφορία τους και έτσι μπορούν να υποκινήσουν την επικοινωνία με μια συσκευή ανάγνωσης. Προφανώς, οι ετικέτες που περιέχουν πηγή ενέργειας είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος και έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις ‘παθητικές’.

Οι ιδιότητες των συστημάτων RFID, που τα καθιστούν θεμέλιο λίθο του IoT είναι οι εξής:

- **Μικρό μέγεθος** — Οι μικρότερες ετικέτες RFID έχουν μέγεθος της τάξεως του 1mm^2 [20], οπότε υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης σε κάθε είδους φυσικό αντικείμενο. Προφανώς, υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του μεγέθους και της εμβέλειας της ετικέτας, οπότε η επιλογή της ετικέτας εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής.
- **Χαμηλό κόστος** — Οι φθηνότερες ετικέτες RFID κοστίζουν λιγότερο από 0.10€.
- **Μοναδικός τρόπος ανίχνευσης** — Οι ετικέτες RFID εκπέμπουν έναν μοναδικό σειριακό αριθμό, οπότε επιτρέπουν την ταυτοποίηση ενός αντικείμενου από άλλα παρόμοια αντικείμενα.
- **Αυτοματοποίηση** — Η διαδικασία ταυτοποίησης γίνεται αυτόματα από την συσκευή ανάγνωσης. Ενδεικτικά, μια συσκευή ανάγνωσης μπορεί να διαβάσει μέχρι και 300 ετικέτες το δευτερόλεπτο [21].

Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Όπως είναι σαφές από την αρχιτεκτονική της, μια εφαρμογή IoT στηρίζεται στην επικοινωνία μεταξύ πολλών, ετερογενών οντοτήτων. Το λογισμικό, το οποίο φροντίζει για την τήρηση αυτών των πρωτοκόλλων, ονομάζεται middleware. Η αφαίρεση αυτής της πολύπλοκης διαδικασίας επιτρέπει την γρήγορη ανάπτυξη νέων εφαρμογών και την αντίστοιχα γρήγορη ενσωμάτωση παλαιότερων. Το RFC 7452 [22] συνοψίζει 4 πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε IoT εφαρμογές.

- **Device-to-device** — Πρόκειται για την περίπτωση άμεσης επικοινωνίας 2 συσκευών, συνήθως ασύρματα. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις συσκευές, χρησιμοποιούνται άλλα πρωτόκολλα. Αυτά περιλαμβάνουν το Bluetooth ή 6LoWPAN, IPv6, UDP και CoAP.
- **Device-to-cloud** — Πρόκειται για την περίπτωση μεταφοράς δεδομένων από την συσκευή σε ένα σύστημα επεξεργασίας και αποθήκευσης, συνήθως στο Cloud. Η επικοινωνία βασίζεται στο IP.
- **Device-to-gateway** — Πρόκειται για την περίπτωση στις οποίες το σύστημα περιλαμβάνει συσκευές που δεν μπορούν να συνδεθούν άμεσα στο Διαδίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένας εξυπηρετητής, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ των συσκευών και του Διαδικτύου. Ο εξυπηρετητής αυτός θα πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνεί με τις συγκεκριμένες συσκευές.

- **Backend data sharing** — Πρόκειται για την περίπτωση μεταφοράς δεδομένων για να γίνει κεντρική ανάλυση. Αυτή η περίπτωση περιλαμβάνει την μεταφορά δεδομένων μεταξύ εφαρμογών IoT.

Στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται μερικές από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες επικοινωνίας και τα χαρακτηριστικά τους.

Όνομα	Συχνότητα	Εμβέλεια	Εφαρμογές
BLE	2.4 GHz	1-100 μ.	Ακουστικά, wearables, εφαρμογές υγείας, εφαρμογές αυτοβιομηχανίας, αισθητήρες εγγύτητας, κ.τ.λ.
EnOcean	315, 868, 902 MHz	> 100 μ.	Παρακολούθηση και έλεγχος συστημάτων και αυτοματισμών, μεταφορές και logistics
GSM	900 MHz και 1.8 GHz	30 - 300 μ.	Κινητά τηλέφωνα, παρακολούθηση στόχων, M2M
LoRa	< 1 GHz ISM μπάντα	2-45 χλμ. (ανάλογα με το περιβάλλον)	Εφαρμογές μακρινής εμβέλειας, μητροπολιτικές, M2M
NB-IoT	700-900 MHz	10-15 χμ.	Βιομηχανική παρακολούθηση, 'έξυπνα' σπίτια, 'έξυπνες' πόλεις, ανίχνευση γεγονότων
NFC	13.56 MHz	< 0.2 μ.	Διαχείριση πρόσβασης, 'έξυπνες' κάρτες, 'έξυπνα' πορτοφόλια
NWave	< 1 GHz ISM μπάντα	< 10 χλμ.	Γεωργικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, εφοδιαστική αλυσίδα, 'έξυπνες' πόλεις
RFID	120-150 kHz (LF), 13.56 MHz (HF), 865-868 MHz (UHF), 2.4-10 GHz (μικροκύματα)	10 εκ. - 200 μ.	Διόδια, εφοδιαστική αλυσίδα, παρακολούθηση και καταγραφή αγαθών, διαχείριση πρόσβασης
SigFox	900 MHz	3-50 χλμ. (ανάλογα με το περιβάλλον)	Εφαρμογές ασφαλείας και απομακρυσμένης παρακολούθησης
Weightless	470-790 MHz	< 10 χλμ.	Βιομηχανική παρακολούθηση, αισθητήρες κίνησης
Wi-Fi	2.4 GHz, 3.6 GHz, 4.9/5 GHz	< 100 μ.	Διακομιστές, κινητά τηλέφωνα, προσωπικοί υπολογιστές
Z-Wave	865-926 MHz	100 μ.	Παρακολούθηση και έλεγχος 'έξυπνων' σπιτιών και εμπορικών καταστημάτων
ZigBee	868 MHz, 2.4 GHz	10-20 μ.	βιομηχανικός έλεγχος, αυτοματισμοί σπιτιών και κατασκευών, WSN

Πίνακας 1.1: Δημοφιλή πρωτόκολλα επικοινωνίας

Cloud Computing

Οι IoT εφαρμογές απαιτούν επεξεργασία και αποθήκευση ετερογενών και μη σταθερών ροών δεδομένων. Αυτήν, ακριβώς, την ανάγκη καλύπτει ο κλάδος του Cloud

computing, ο οποίος παρέχει πρόσβαση σε υπολογιστικές υποδομές ή λογισμικό, τα οποία προσαρμόζονται ανάλογα με τις ανάγκες και την ζήτηση.

Σύμφωνα με αρκετές οπτικές [23][24], τα 2 πεδία είναι συμπληρωματικά, καθώς οι IoT εφαρμογές προσφέρουν την κατανεμημένη παρουσία και τα δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον, ενώ οι Cloud εφαρμογές προσφέρουν τους πόρους και τις υπηρεσίες που υπολείπονται οι IoT συσκευές. Συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες που προσφέρει το Cloud ομαδοποιούνται σε 3 κατηγορίες.

- **Επικοινωνία** — Το Cloud καθιστά δυνατή και φθηνή, την σύνδεση, παρακολούθηση και διαχείριση αντικειμένων εξ αποστάσεως, καθώς και την αυτοματοποίηση αυτών των διαδικασιών.
- **Αποθήκευση** — Το Cloud καθιστά δυνατή και φθηνή, την συλλογή, αποθήκευση, συσσωμάτωση, ενσωμάτωση και, τέλος, την ομογενοποίηση των ετερογενών ροών δεδομένων, τα οποία παράγουν τα διάφορα αντικείμενα.
- **Επεξεργασία** — Το Cloud καθιστά δυνατή την κεντρική, σύγχρονη και επεκτάσιμη επεξεργασία, η οποία είναι αδύνατη με τους περιορισμούς πόρους των IoT συσκευών.

1.1.5 Προκλήσεις

Το IoT, ωστόσο, είναι ένας απότομα αναδυόμενος τομέας. Οι υποδομές και, κυρίως, οι διαδικασίες που το συνθέτουν είναι ακόμα υπό διαμόρφωση. Η πρώτη δεκαετία ανάπτυξης και εδραίωσης του IoT ανέδειξε κρίσιμα ερωτήματα και προβληματισμούς για το μέλλον του, μερικοί από τους οποίους αναφέρονται παρακάτω.

Ασφάλεια

Σαν δομικό στοιχείο κάθε δικτύου, η ασφάλεια αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια για την πλήρη ανάπτυξη του IoT [25]. Η αλματώδης αύξηση του αριθμού και της ποικιλίας των, συνδεδεμένων στο διαδίκτυο, συσκευών αυξάνει τις πιθανές απειλές στην ασφάλεια των χρηστών.

Λόγω της έμφυτης ετερογένειας του IoT, δεν υπάρχει μια τυποποιημένη λύση για την ασφάλεια των εφαρμογών του, αλλά ορισμένοι κοινοί στόχοι.

- **Εμπιστευτικότητα** — Η πρόσβαση σε δεδομένα θα γίνεται μόνο από εξουσιοδοτημένα άτομα. Η εμπιστευτικότητα των δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική στις εφαρμογές που διαχειρίζονται ευαίσθητα προσωπικά δεδομένα.

- **Ακεραιότητα** — Μια IoT εφαρμογή ή συσκευή πρέπει να διατηρεί την ακρίβεια, την συνέπεια και την αξιοπιστία των δεδομένων που αποθηκεύουν ή διαχειρίζονται. Πολύ συχνά, οι IoT συσκευές περιέχουν ευαίσθητα δεδομένα, και οποιαδήποτε μη εξουσιοδοτημένη αλλαγή σε αυτά μπορεί να έχει τεράστιες επιπτώσεις στους χρήστες.
- **Διαθεσιμότητα** — Ένα IoT σύστημα ή υπηρεσία οφείλει να είναι διαθέσιμη στους εξουσιοδοτημένους χρήστες. Επιπλέον, οι χρήστες αυτοί πρέπει να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα που τους αντιστοιχούν. Οι IoT εφαρμογές, οφείλουν να προστατεύουν τα δεδομένα και τα συστήματά τους είτε από κακόβουλες ενέργειες είτε από αστοχίες υλικού ή λογισμικού.

Δια-λειτουργικότητα

Ήδη, έχουμε μιλήσει αρκετά για τα διάφορα προβλήματα που προκαλεί ο υψηλός βαθμός ετερογένειας που εμφανίζει το IoT. Η ανάπτυξη μιας εφαρμογής IoT απαιτεί την διαχείριση ενός έντονα δυναμικού κατανεμημένου συστήματος, το οποίο αποτελείται από πολλές και ποικίλες συσκευές. Η χρήση και εδραίωση μιας πρότυπης IoT αρχιτεκτονικής θα επιτρέψει την κανονικοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης εφαρμογών, ενώ ο περαιτέρω έλεγχος και ανάπτυξη των απαραίτητων πρωτοκόλλων επικοινωνίας θα απλοποιήσει τα ζητήματα συνδεσιμότητας των συσκευών.

Επεκτασιμότητα και αξιοποίηση δεδομένων

Καθώς το δίκτυο των διασυνδεδεμένων συσκευών θα μεγαλώνει, οι απαιτήσεις από τις υποδομές θα αυξάνονται επίσης. Ενώ τα ζητήματα επεκτασιμότητας του δικτύου θεωρούνται διαχειρίσιμα [26], δεν ισχύει το ίδιο για τις υποδομές που διαχειρίζονται δεδομένα. Το μέγεθος των παραγόμενων δεδομένων δεν επιτρέπει την αποθήκευσή τους σε μια κεντρική βάση δεδομένων, ενώ η μεταφορά τους απαιτεί απαγορευτικές ποσότητες υπολογιστικών πόρων. Η λύση σε αυτά τα προβλήματα απαιτεί την χρήση και την ανάπτυξη νέων Cloud εφαρμογών, που θα επιτρέπουν την κατανεμημένη αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων. Πέρα από την διαχείριση των δεδομένων, προκύπτει και το ζήτημα της αξιοποίησής τους. Η χρήση και η ανάπτυξη νέων τεχνικών εξόρυξης δεδομένων γίνεται απαραίτητη, λόγω του μεγέθους και της έλλειψης δομής των δεδομένων.

Αξιοποίηση των δυνατοτήτων του IoT

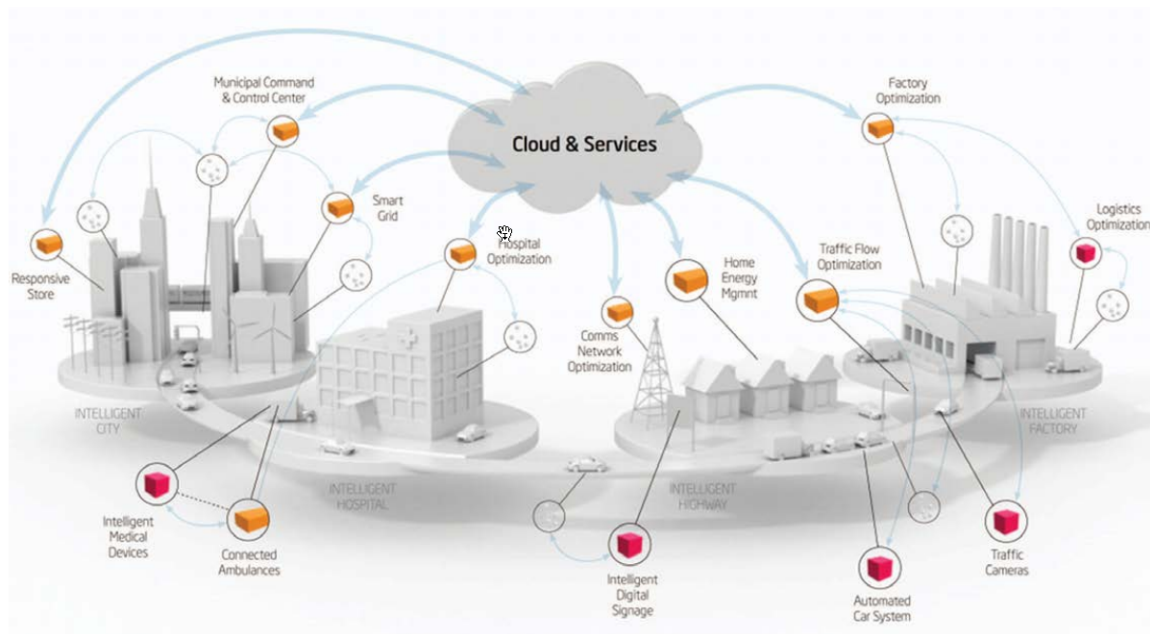
Η εξέλιξη και η ανάπτυξη των προϊόντων και των τεχνολογιών, που απαρτίζουν το IoT, κινούνται με πολύ γρήγορο ρυθμό, συγκριτικά με άλλους κλάδους. Αυτό

συμβαίνει καθώς το IoT αποτελεί ένα προσοδοφόρο έδαφος για την ανάπτυξη νέων προϊόντων μαζικής παραγωγής αλλά και νέων επιχειρηματικών τομέων, με μεγάλο περιθώριο κέρδους. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη μεγάλου πλήθους προϊόντων, τα οποία δεν είναι επαρκώς ελεγμένα, και είναι διάτρητα από την οπτική της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας. Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται ανταγωνιστικά μοντέλα και πρότυπα επικοινωνίας και ανάπτυξης εφαρμογών, τα οποία καθιστούν το IoT ιδιαίτερα κλειστό, με τις εφαρμογές του να είναι ελάχιστα επεκτάσιμες ή επαναχρησιμοποιήσιμες.

1.1.6 Εφαρμογές

Όπως είναι σαφές από τα παραπάνω, το IoT μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλούς υπάρχοντες κλάδους, με σκοπό την επέκταση των δυνατοτήτων τους και τη σύνδεσή τους με τον ψηφιακό κόσμο. Επίσης, επιτρέπει τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των παρεχομένων υπηρεσιών. Ωστόσο, η ανάπτυξη του IoT, κυρίως, θα παράξει νέους τομείς και υπηρεσίες.

Παρακάτω, παρατίθενται οι τομείς και οι εφαρμογές, οι οποίοι θα επηρεαστούν περισσότερο από την ανάπτυξη του IoT, καθώς και μια σχηματική απεικόνιση της διείσδυσης του IoT στην καθημερινότητα (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Σχηματική απεικόνιση των εφαρμογών του IoT [5]

Βιοϊατρική

Οι εφαρμογές του IoT στον τομέα της Υγείας είναι πολλές και ποικίλες και αποτελούν το κύριο θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα αναφερθούμε εκτενέστερα στην ενότητα 1.2 για τις εφαρμογές του IoT στον συγκεκριμένο τομέα.

Μεταφορές και εφοδιαστική αλυσίδα

Η χρήση αισθητήρων, ενεργοποιητών και επεξεργαστών επιτρέπει τον πιο ακριβή έλεγχο και χειρισμό των μεταφορικών μέσων, των μεταφερόμενων αγαθών, αλλά και της αντίστοιχης υποδομής, όπως οι δρόμοι, οι σταθερές τροχιές και οι αποθήκες διαχείρισης αγαθών. Παρακάτω, αναφέρονται συγκεκριμένες εφαρμογές του IoT στον τομέα.

- **Εφοδιαστική αλυσίδα** — Η χρήση τεχνολογιών RFID και NFC επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο κάθε κρίκου της εφοδιαστικής αλυσίδας, από τον σχεδιασμό των εμπορευμάτων και την παραγωγή μέχρι την διανομή και πώληση των προϊόντων. Αυτό, οδηγεί, στην ευελιξία της εφοδιαστικής αλυσίδας και την δυνατότητα προσαρμογής της σε πολύπλοκες και δυναμικές αγορές.
- **Υποβοηθούμενη οδήγηση** — Εφαρμογές IoT μπορούν να παρέχουν πληροφορίες στους οδηγούς και επιβάτες των οχημάτων για καλύτερη πλοήγηση και ασφάλεια. Χαρακτηριστικές εφαρμογές είναι η διαχείριση της κυκλοφορίας των οχημάτων στους δρόμους, είτε αφορά σχεδιαστικούς σκοπούς είτε αφορά την πιο ασφαλή και γρήγορη πλοήγηση εμπορευμάτων.
- **Παρακολούθηση περιβαλλοντικών δεικτών** — Η ασφαλής μεταφορά τροφίμων απαιτεί την τήρηση αυστηρών κανονισμών για την διατήρηση της ποιότητας τους. Συνήθως, αυτοί απαιτούν τις συνθήκες συντήρησης των τροφίμων να είναι συγκεκριμένες, με αυστηρά όρια στην θερμοκρασία και στην υγρασία του χώρου μεταφοράς. Η χρήση αισθητήρων επιτρέπουν την απρόσκοπτη παρακολούθηση των συνθηκών μεταφοράς τροφίμων.

Έξυπνα περιβάλλοντα

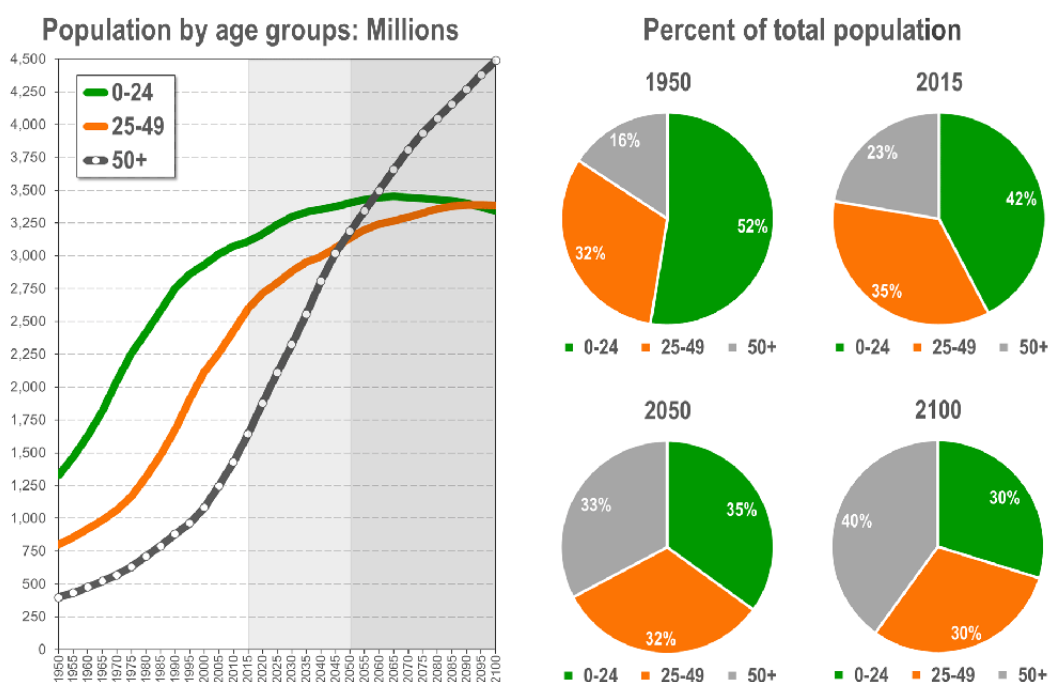
Ένα ‘έξυπνο περιβάλλον’ είναι σε θέση να λαμβάνει πληροφορίες και να ενεργεί ανάλογα με αυτές, μέσω των αντικειμένων που το αποτελούν, διευκολύνοντας τους χρήστες του να επιτύχουν τους σκοπούς τους. Αυτός ο ορισμός περιλαμβάνει πολλές και ποικίλες χρήσεις, κάποιες από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω.

- **Κατοικία και εργασιακοί χώροι** — Η χρήση των δυνατοτήτων του IoT είναι σε θέση να μειώσει το κόστος και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της οικιστικής και επαγγελματικής χρήσης των κτηρίων[27]. Ταυτόχρονα, η αυτοματοποίηση των διαδικασιών ελέγχου και παρακολούθησης, οδηγεί στη βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας καθώς και την πιο άνετη διαβίωση των κατοίκων/υπαλλήλων.
- **Βιομηχανική και αγροτική παραγωγή** — Οι εφαρμογές IoT, ήδη, δραματίζουν μεγάλο ρόλο στη βιομηχανία [28] και στην γεωργία [29], καθώς καθιστούν δυνατή την περαιτέρω αυτοματοποίηση της παραγωγής. Συγκεκριμένα, στη βιομηχανική παραγωγή, οι δυνατότητες του IoT επιτρέπουν την βελτιστοποίηση της παραγωγής, τον άμεσο εντοπισμό και διόρθωση σφαλμάτων καθώς και την διαχείριση του εργασιακού περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα, στην αγροτική παραγωγή, επιτρέπουν τον έλεγχο της άρδευσης, την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, των εντόμων και των άλλων ζώων που επηρεάζουν την παραγωγή.
- **Πόλεις** — Η χρήση των δυνατοτήτων του IoT επιτρέπει, πλέον, την παρακολούθηση των υπηρεσιών και των συνθηκών μιας πόλης σε πραγματικό χρόνο. Αυτές ποικίλουν από την διαχείριση της κυκλοφορίας των οχημάτων μέχρι την διαχείριση κοινωφελών αγαθών, όπως η συγκομιδή απορριμάτων και η ύδρευση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζουν οι εφαρμογές που σχετίζονται με το CIM (City Information Model) [30]. Πρόκειται για την ιδέα ενός αστικού ιστού, πλήρως διασυνδεδεμένου, που επιτρέπει την παρακολούθηση και έλεγχο κάθε συστατικού του στοιχείου, είτε αυτό πρόκειται για κτήρια είτε πρόκειται για υποδομές, όπως το ηλεκτρικό δίκτυο.

1.2 Internet of Things και Βιοϊατρική

1.2.1 Εισαγωγή

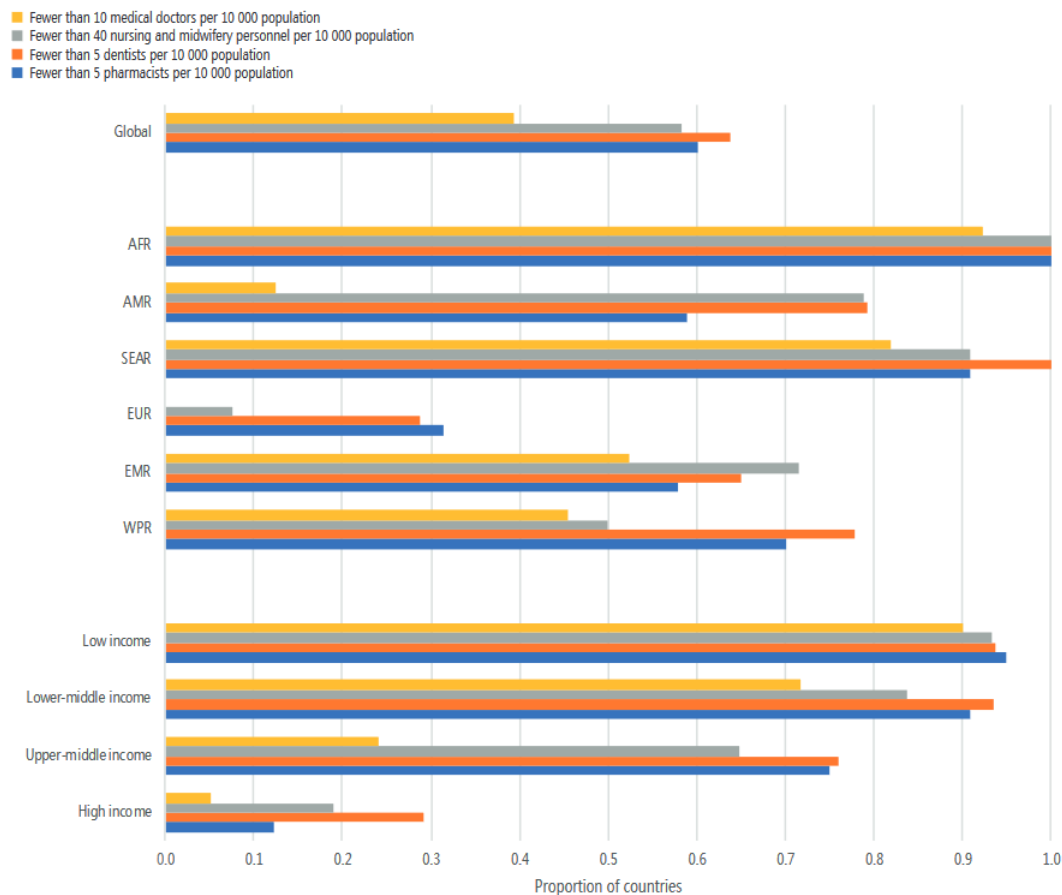
Η εξέλιξη της ιατρικής τεχνολογίας, καθώς και η αύξηση της αγροτικής παραγωγής έχει προκαλέσει την αύξηση του πληθυσμού, καθώς και την αύξηση του προσδόκιμου ζωής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6. Αντίθετα σε αυτήν την κατάκτηση της ανθρωπότητας, πολλά εκατομμύρια ανθρώπων ζουν σε δυσμενή περιβάλλοντα, τα οποία χαρακτηρίζονται από την έλλειψη πόσιμου νερού και άλλων απαραίτητων υποδομών. Ταυτόχρονα, συχνές είναι οι εξάρσεις επιδημιών, ενώ η κλιματική αλλαγή ήδη επηρεάζει το περιβάλλον και την υγεία των κατοίκων των παρόντων περιοχών. Τέλος, η αύξηση του προσδόκιμου ζωής έρχεται σε αντίθεση με τις συνθήκες κατά τις οποίες σχεδιάστηκαν τα προϋπάρχοντα συστήματα κοινωνικής ασφάλισης στον δυτικό κόσμο, οδηγώντας συχνά σε υποβαθμισμένη διαβίωση για τους ηλικιωμένους ή για άτομα με ειδικές ανάγκες. Είναι σαφές πως η ζήτηση για ποιοτικές υπηρεσίες υγείας έχει αυξηθεί



Σχήμα 1.6: Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης του ανθρώπινου πληθυσμού και της ηλικιακής σύνθεσης του. [6]

και θα συνεχίσει να αυξάνεται, κυρίως λόγω της αύξησης του πληθυσμού. [31] Εξίσου σαφές είναι το γεγονός ότι τα υπάρχοντα συστήματα και μοντέλα παροχής υπηρεσι-

ών υγείας συχνά κρίνονται ανεπαρκή για την κάλυψη αυτής της ζήτησης, εξαιτίας της ανισότητας πρόσβασης σε αυτά, όπως φαίνεται στο γράφημα 1.7.



Σχήμα 1.7: Έλλειψη ιατρικού προσωπικού ανάλογα με την ήπειρο και το σχετικό μέσο εισόδημα κάθε χώρας. [7]

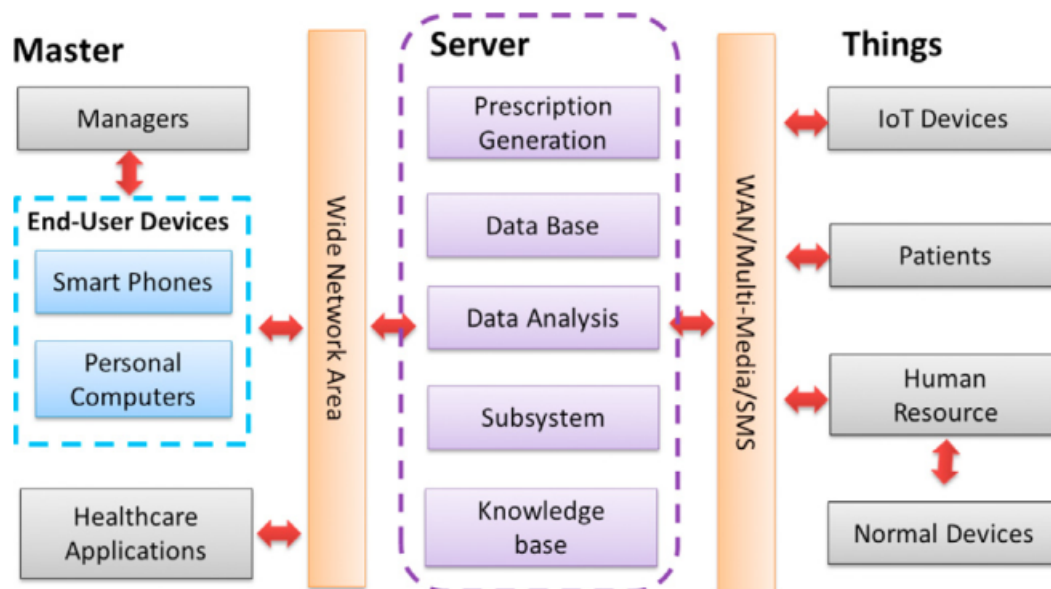
Παρακάτω, αναφέρονται σύντομα ορισμένες από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του υπάρχοντος συστήματος υγειονομικής περίθαλψης.

- **Υπηρεσίες υγείας σαν εμπόρευμα** — Η αντιμετώπιση της παροχής υπηρεσιών υγείας ως εμπόρευμα οδηγεί στην περιθωριοποίηση δαπανηρών αλλά αναγκαίων θεραπειών ή ερευνών.
- **Μειούμενη αναλογία ιατρικού προσωπικού ανά ασθενή** — Ως συνέχεια του παραπάνω, η μείωση του εξειδικευμένου ιατρικού προσωπικού σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού, οδηγεί σε χαμηλής ποιότητας υπηρεσίες υγείας.
- **Αστικοποίηση** — Οι σημερινές μητροπόλεις με τα εκατομμύρια πολιτών απαιτούν συνεχείς και μεγάλες επενδύσεις στις υποδομές υγείας, κάτι το οποίο δεν

είναι εφικτό ή δεν προτιμάται.

- **Αύξηση του προσδόκιμου ζωής** — Τέλος, η αύξηση του προσδόκιμου ζωής αυξάνει τον αριθμό των ατόμων που επιζητούν υπηρεσίες υγείας και καθιστά αναγκαία την θεραπεία και διαχείριση χρόνιων παθήσεων.

Για την κάλυψη των συγχρόνων κοινωνικών αναγκών υγείας, απαιτείται η επιστράτευση της τεχνολογίας, καθώς και η αλλαγή του μοντέλου υγειονομικής περίθαλψης. Συγκεκριμένα, απαιτείται να αξιοποιηθούν επικουρικά οι δυνατότητες των νέων τεχνολογιών, όπως και του IoT, δίχως την περιθωριοποίηση των αναγκών σε ιατρικό προσωπικό και υλικό. Ταυτόχρονα, και με χρήση των παραπάνω τεχνολογιών, πρέπει να αναδειχθεί η πρόληψη σαν κύριος άξονας της δημόσιας υγείας, δίνοντας ενεργό ρόλο στον πολίτη για την διαχείριση της υγείας του.



Σχήμα 1.8: Σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής ενός IoT συστήματος αποκατάστασης [8]

1.2.2 Λόγοι σύγκλισης

Οι δυνατότητες των εφαρμογών IoT μπορούν να καλύψουν ορισμένα από τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η δομή των εφαρμογών IoT μοιάζει με την ιεραρχική δομή ενός συστήματος παροχής υπηρεσιών υγείας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8, όπου βλέπουμε σχηματικά την αρχιτεκτονική ενός συστήματος αποκατάστασης, βασισμένο σε τεχνολογίες IoT.

Παρακάτω, αναφέρονται ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση IoT εφαρμογών στον τομέα της υγείας.

- **Συνεχής και διακριτική καταγραφή των ζωτικών σημείων του ασθενή** — Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των βιοαισθητήρων, επιτρέπει την απρόσκοπτη καταγραφή και αποστολή βιοσημάτων από τους ασθενείς, χωρίς να χρειαστεί να αλλάξουν τις καθημερινές τους συνήθειες. Αυτό επιτρέπει την πιο ακριβή και γρήγορη διάγνωση ασθενειών, καθώς και την συλλογή μεγάλου όγκου ιατρικών δεδομένων.
- **Απρόσκοπτη χρήση διάφορων τεχνολογιών** — Η χρήση εφαρμογών IoT επιτρέπει την χρήση πολλών τεχνολογιών, οι οποίες δεν είχαν εφαρμοστεί πρότερα στον τομέα της υγείας, εξαιτίας της δυσκολίας ενσωμάτωσής τους στις ιατρικές διαδικασίες.
- **Απομακρυσμένη διεπαφή ασθενή και ιατρικού προσωπικού** — Οι εφαρμογές IoT επιτρέπουν την άμεση, απομακρυσμένη επικοινωνία του ασθενή με κατάλληλο ιατρικό προσωπικό, σε πραγματικό χρόνο. Το προσωπικό αυτό θα έχει άμεση πρόσβαση στα ιατρικά ιστορικά και τα δεδομένα πραγματικού χρόνου του ασθενή.
- **Εξατομικευμένες υπηρεσίες** — Πολλές ασθένειες και παθήσεις δεν εκφράζονται με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους ανθρώπους. Η μακρόχρονη συλλογή δεδομένων από έναν ασθενή επιτρέπει την δημιουργία ενός εκτενούς και ακριβούς ιατρικού ιστορικού. Με βάση αυτά τα δεδομένα και την χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, είναι δυνατή η πρόβλεψη της κατάστασης της υγείας του ασθενή.
- **Μείωση κόστους** — Η βελτίωση της δυνατότητας πρόβλεψης της υγείας του πολίτη βοηθά την αποτελεσματικότερη διαχείριση του χρόνου του ιατρικού προσωπικού, αλλά και του ιατρικού υλικού.
- **Εύκολη χρήση** — Οι εφαρμογές IoT στον τομέα της υγείας απευθύνονται και σε άτομα με ειδικές ανάγκες, καθώς και ηλικιωμένους. Οπότε, είναι σχεδιασμένες να χρησιμοποιούνται εύκολα και άμεσα από τους χρήστες τους.
- **Συσσώρευση ιατρικών δεδομένων** — Η συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση του τεράστιου πλήθους δεδομένων, που παράγουν οι IoT εφαρμογές, δίνει νέες δυνατότητες στην ιατρική έρευνα.

1.2.3 Εφαρμογές

Η Βιοϊατρική είναι ένας τεράστιος κλάδος, ώστε οι δυνατότητες εφαρμογής των τεχνολογιών του IoT να μοιάζουν ατέλειωτες, από την απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών μέχρι την αντιμετώπιση ασθενειών. Η χρήση του IoT περιορίζεται, προς το παρόν, στην τηλεϊατρική και στην καταγραφή και παρακολούθηση κεφαλαίων.

Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές εφαρμογές του IoT στον τομέα της Βιοϊατρικής.

Περιβάλλοντα Υποβοηθούμενης Διαβίωσης (ΠΥΔ)

Μια από τις βασικές εφαρμογές του IoT είναι η κατασκευή και διαχείριση έξυπνων περιβαλλόντων, τα οποία καθιστούν πιο εύκολη την ζωή των ατόμων που κινούνται μέσα σε αυτά. Στον τομέα της Βιοϊατρικής, τα άτομα αυτά είναι ασθενείς ή ηλικιωμένοι άνθρωποι, οι οποίοι δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες τους χωρίς βοήθεια. Τα ΠΥΔ αποτελούν βασικό αντικείμενο της διπλωματικής και για αυτό αναλύονται στο κεφάλαιο 2.

mHealth (mobile Health)

Η χρήση του Cloud Computing, μέσω mobile και web εφαρμογών, επιτρέπει την απομακρυσμένη πρόσβαση σε ιατρική πληροφορία. Ταυτόχρονα, οι ίδιες εφαρμογές επιτρέπουν στο ιατρικό προσωπικό την παροχή οδηγιών και βοήθειας, επικοινωνώντας μέσω video με τον ασθενή. Η συγκεντρωμένη ιατρική πληροφορία των ασθενών επιτρέπει στο ιατρικό προσωπικό να παρέχουν πιο άμεση και κατάλληλη θεραπεία για κάθε ασθενή.

Διαχείριση ιατρικού υλικού

Η χρήση ετικετών RFID επιτρέπει την πλήρη διαχείριση του ιατρικού υλικού. Αρχικά, καθιστά πολύ δυσκολότερη την χάλκευση των ιατρικών προϊόντων, μέσω της μοναδικής ταυτότητας που παρέχει η RFID ετικέτα. Στη συνέχεια, κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας του προϊόντος καταγράφεται και η πληροφορία αυτή γίνεται διαθέσιμη στον καταναλωτή.

Επίσης, η χρήση εφαρμογών IoT επιτρέπει την παρακολούθηση της σωστής λειτουργίας κρίσιμων ιατρικών συσκευών, όπως βηματοδότες ή άλλες έμφυτες συσκευές, και ενημερώνει σε πιθανή δυσλειτουργία. Τέλος, η χρήση ετικετών RFID επιτρέπει την δημιουργία ενός διαφανούς συστήματος καταγραφής και παρακολούθησης ιατρικών αποβλήτων, σε συνεργασία με τα νοσοκομεία και μεταφορικές εταιρείες.

Ψηφιακά νοσοκομεία

Οι τεχνολογίες που απαρτίζουν το IoT καθιστούν δυνατή την ψηφιοποίηση και αυτοματοποίηση των διοικητικών διαδικασιών ενός νοσοκομείου, καθώς και την παροχή επαυξημένων δυνατοτήτων στο ιατρικό προσωπικό. Η σταδιακή εγκαθίδρυση των ηλεκτρονικών μητρώων υγείας, σε συνδυασμό με την χρήση ετικετών RFID επιτρέπει την άμεση ταυτοποίηση των ασθενών, καθώς και την πρόσβαση στο ιατρικό τους ιστορικό. Για τον ίδιο λόγο, η διαχείριση ιατρικών επειγόντων περιστατικών γίνεται ευκολότερη, ενώ περαιτέρω βοηθά η διασύνδεση των οργάνων των ασθενοφόρων με το νοσοκομείο.

Η καταγραφή, παρακολούθηση και αξιοποίηση του νοσοκομειακού εξοπλισμού, καθώς και του ιατρικού υλικού, γίνεται ευκολότερη και πιο ακριβής. Για παράδειγμα, η διαχείριση της αποθήκης φαρμάκων, καθώς και η διανομή τους, μπορεί να γίνει ηλεκτρονικά, αλλά και να αυτοματοποιηθεί.

Επίσης, σημαντικές αλλαγές μπορούν να συμβούν στην διαχείριση των ασθενών και της εμπειρίας τους στο νοσοκομείο. Αρχικά, η χρήση ετικετών RFID επιτρέπει στο ιατρικό προσωπικό να έχει περισσότερο έλεγχο στην ροή των ανθρώπων. Η συνεχής παρακολούθηση των ζωτικών σημείων των ασθενών αποτελεί την βάση ενός έξυπνου συστήματος ειδοποίησης σε περίπτωση ανάγκης. Ταυτόχρονα, ο ασθενής είναι σε θέση να χειρίζεται το περιβάλλον νοσηλείας του, μέσω τεχνολογιών αναγνώρισης φωνής και mobile εφαρμογές.

Τέλος, είναι εφικτή η βελτίωση της απόδοσης του ιατρικού προσωπικού, ιδιαίτερα στους τομείς των επειγόντων, της χειρουργικής και της ραδιολογικής. Η παροχή των απαραίτητων πληροφοριών τους επιτρέπει να πάρουν κρίσιμες αποφάσεις γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών

Οι εξελίξεις στον τομέα των βιοαισθητήρων και η καθιέρωση του κλάδου των wearables καθιστούν δυνατή την απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών σε μη κλινικά περιβάλλοντα. Αυτή περιλαμβάνει την συλλογή σημάτων (βιολογικών και μη) από αισθητήρες, την πιθανή καταγραφή εικόνας και ήχου και την αποστολή τους στο κατάλληλο ιατρικό προσωπικό. Η πορεία της θεραπείας, οι προτάσεις του ιατρικού προσωπικού και το σύστημα ειδοποιήσεων παρέχονται στον ασθενή, μέσω mobile εφαρμογών.

Η ένταξη της απομακρυσμένης παρακολούθησης ασθενών στην διαχείριση χρόνιων παθήσεων οδηγεί στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών. Τους επιτρέπει να διατηρήσουν την ανεξαρτησία τους και να επιλύουν ευκολότερα επιπλοκές.

Κεφάλαιο 2

Περιβάλλοντα Υποβοηθούμενης Διαβίωσης

2.1 Εισαγωγή

Τα Περιβάλλοντα Υποβοηθούμενης Διαβίωσης (ΠΥΔ) αποτελούν έναν αναδυόμενο διεπιστημονικό κλάδο, ο οποίος στοχεύει στην ανάπτυξη εννοιών, προϊόντων και υπηρεσιών που συνδυάζουν τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών με κοινωνικές ανάγκες, προσφέροντας βελτιωμένη ποιότητα ζωής σε άτομα που χρήζουν υποστήριξης, ιδίως στους ηλικιωμένους.

Οι ΠΥΔ ενσωματώνουν γνώση από τους τομείς της Βιοϊατρικής, του Internet of Things, του Cloud Computing, της Μηχανικής Μάθησης και άλλων συναφών επιστημονικών περιοχών.

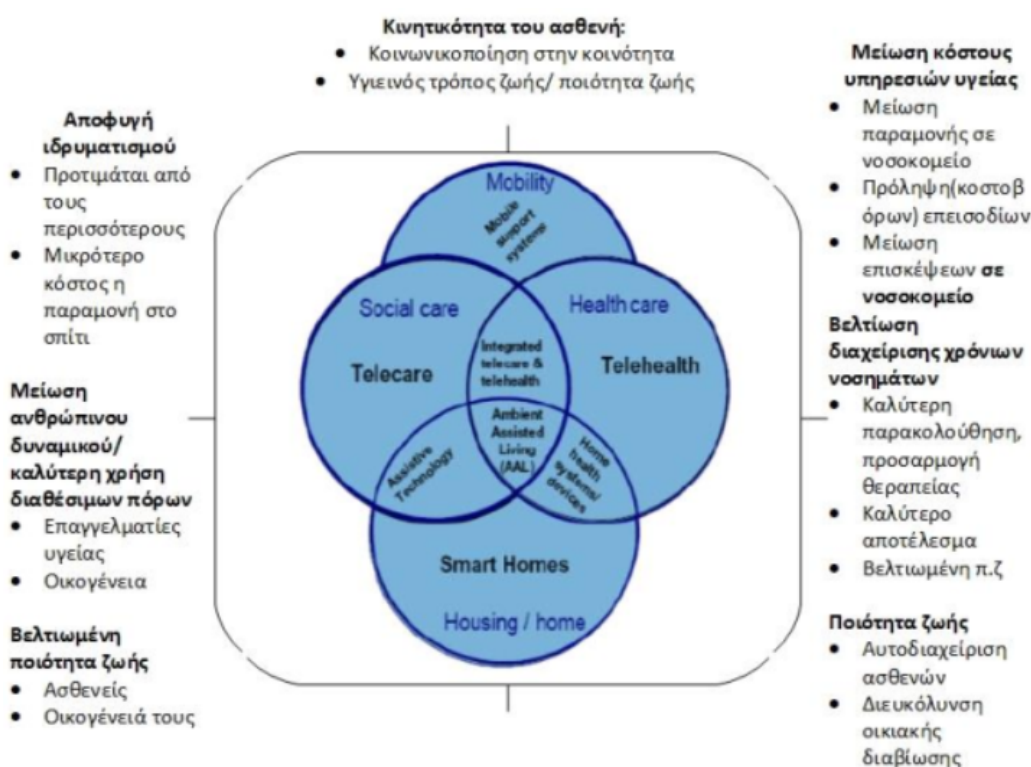
Η συνεχής αύξηση του προσδόκιμου ζωής στη Δύση αποτελεί έναν από τους κύριους κινητήριους μοχλούς ανάπτυξης του κλάδου. Πλέον, απαιτούνται καινοτόμες και αποδοτικές λύσεις, με ιδιαίτερη έμφαση στη πρόληψη, για την υποστήριξη αυτών των ευαίσθητων κοινωνικών ομάδων. Συγκεκριμένα, ο σκοπός των ΠΥΔ είναι να δημιουργήσουν οφέλη σε τρεις επιπέδους: για τα άτομα, μέσω αυξημένων δυνατοτήτων και ασφάλειας, για την οικονομία, μέσω του περιορισμού του κόστους των υπηρεσιών υγείας, και τέλος για την κοινωνία, μέσω της βελτίωσης της συνολικής ποιότητας ζωής. Μια σχηματική απεικόνιση των πλεονεκτημάτων αυτών φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

2.2 Χαρακτηριστικά

Παρότι δεν υπάρχει ακριβής και καθολικά αποδεκτός ορισμός για τα ΠΥΔ στη διεθνή βιβλιογραφία, μελετώντας τις διάφορες προσπάθειες εννοιολογικής οριοθέτησης,

μπορούμε να διατυπώσουμε τον ακόλουθο ορισμό:

Τα Περιβάλλοντα Υποβοηθούμενης Διαβίωσης αποτελούν σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις Πληροφορικής και Επικοινωνιών, βασισμένα στις αρχές του νοήμονος περιβάλλοντος, για την παροχή καθολικής, μη επεμβατικής και προληπτικής φροντίδας σε ηλικιωμένους και σε άλλα άτομα που χρήζουν φροντίδα, με τελικό σκοπό τη διατήρηση της ανεξαρτησίας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής τους, καθώς και την υποστήριξη των ατόμων που τους φροντίζουν.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των πλεονεκτημάτων των ΠΥΔ

Παρακάτω, θα επεξηγηθούν οι έννοιες που απαρτίζουν αυτόν τον ορισμό.

2.2.1 Νοήμων περιβάλλον

Το νοήμων περιβάλλον αποτελεί ένα ερευνητικό παράδειγμα που ενσωματώνει υπολογιστική ευφυΐα στα καθημερινά περιβάλλοντα μέσω τεχνολογιών IoT, διάχυτης υπολογιστικής και τεχνητής νοημοσύνης. Στόχος είναι η δημιουργία περιβαλλόντων ικανών να αντιλαμβάνονται, να προσαρμόζονται και να αντιδρούν στις ανθρώπινες ανάγκες [32].

Τα ΠΥΔ εφαρμόζουν αυτό το παράδειγμα ειδικά για την υποστήριξη ηλικιωμένων, δημιουργώντας υποβοηθητικές τεχνολογίες με τα εξής χαρακτηριστικά [33][34]:

- Μη επεμβατική και απρόσκοπτη ενσωμάτωση στο περιβάλλον του χρήστη.
- Δράση ανάλογα με το εκάστοτε πλαίσιο και την κατάσταση του χρήστη.
- Προσωποποιημένη φροντίδα για τις ανάγκες κάθε χρήστη.
- Προσαρμογή στον χρήστη μέσω συνεχούς μάθησης.
- Προνόηση και πρόβλεψη των αναγκών και επιθυμιών του χρήστη.

Συνολικά, τα ΠΥΔ μπορούν να ειπωθούν ως το αποτέλεσμα της προόδου από τις διάφορες μεμονωμένες συσκευές, οι οποίες εξυπηρετούσαν ένα συγκεκριμένο έργο, σε ένα νοήμων περιβάλλον το οποίο θα βοηθά και υποστηρίζει τον χρήστη και τον ζωτικό του χώρο [34].

2.2.2 Σύγχρονες υπολογιστικές και επικοινωνιακές τεχνολογίες

Τα ΠΥΔ περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα εξελιγμένων τεχνολογιών με ιδιαίτερη έμφαση στα 'έξυπνα' σπίτια, τα κινητά και ένδυτα συστήματα και την υποβοηθητική ρομποτική.[10] Οι τεχνολογίες αυτές συνδυάζονται με εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές, όπως η αναγνώριση ανθρώπινης δραστηριότητας, η ανακάλυψη συμπεριφορικών μοτίβων, η ανίχνευση μη ομαλών δεδομένων, η μοντελοποίηση πλαισίου, η αναγνώριση τοποθεσίας και ταυτότητας, κλπ. [10] [33].

Όλα τα συστατικά των ΠΥΔ είναι διασυνδεδεμένα και επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι ενσωματωμένοι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον και τον χρήστη. Οι υπολογιστικές τεχνικές συναθροίζουν την πληροφορία από τους επιμέρους αισθητήρες, την αναλύουν, την ερμηνεύουν και αποφασίζουν για την κατάλληλη δράση. Τέλος, οι διάφοροι ενεργοποιητές, έξυπνες διεπαφές και υποβοηθητικές συσκευές δρουν αναλόγως και επιτρέπουν τη διάδραση με τον χρήστη [35].

2.2.3 Η ανεξαρτησία και η βελτίωση της ποιότητας ζωής των ηλικιωμένων ως σκοπός

Το όραμα των ΠΥΔ είναι να παρέχει στους ηλικιωμένους ασφαλή και υποστηρικτικά περιβάλλοντα, να διατηρούν και να βελτιώνουν τη φυσική, πνευματική και ψυχική τους υγεία και να ενισχύουν την κοινωνική ενασχόληση και την ενεργή συμμετοχή στη

κοινωνία [36][34][35][37][9]. Ο απώτερος σκοπός των ΠΥΔ είναι η διασφάλιση της ανεξαρτησίας των ηλικιωμένων και η βελτίωση της ποιότητας ζωής τους.

Ταυτόχρονα, η τεχνολογία των ΠΥΔ απευθύνεται και στους παρόχους φροντίδας, είτε πρόκειται για ιατρικό προσωπικό είτε για τον κοινωνικό κύκλο των ηλικιωμένων ατόμων. Η τεχνολογία των ΠΥΔ σκοπεύει να μειώσει το βάρος των ευθυνών των παρόχων φροντίδας, να ενισχύσει το αίσθημα της σιγουριάς, να βοηθήσει στη διαχείριση και τον συντονισμό των καθηκόντων φροντίδας και, τέλος, να διευκολύνει την απομακρυσμένη επικοινωνία και την κοινωνική διασύνδεση μεταξύ των παρόχων φροντίδας και των ηλικιωμένων [10][38][39].

2.3 Τομείς εφαρμογής

Το όραμα της τεχνολογίας των ΠΥΔ στοχεύει στην παροχή ολιστικής υποστήριξης των χρηστών. Κατά συνέπεια, τα ΠΥΔ βρίσκουν εφαρμογή σε κάθε πτυχή της καθημερινής ζωής. Συγκεκριμένα, έχουν εντοπιστεί 3 βασικοί τομείς εφαρμογής, όπως παρουσιάζονται παρακάτω [35].

2.3.1 Ευγηρία στο σπίτι

Ο πρώτος τομέας περιγράφεται ως *‘η δυνατότητα ποιοτικότερης καθημερινότητας, για περισσότερο χρόνο, διατηρώντας υψηλό βαθμό ανεξαρτησίας, αυτονομίας και αξιοπρέπεια’* [35]. Η πλειοψηφία των ηλικιωμένων προτιμά την παραμονή στο γνωστό οικιακό τους περιβάλλον για το μεγαλύτερο δυνατό διάστημα [40]. Ωστόσο, η μείωση των πνευματικών και σωματικών ικανοτήτων τους, λόγω της γήρανσης του οργανισμού, καθιστά την αυτόνομη διαμονή τους περίπλοκη και απαιτητική. Ακόμα και ηλικιωμένοι, οι οποίοι είναι υγιείς και ενεργοί, είναι πιθανό να χρειαστούν κάποια μορφή φροντίδας στο άμεσο μέλλον. Η δημιουργία ενός ασφαλούς και υποβοηθητικού οικιακού περιβάλλοντος είναι, επομένως, ένας σημαντικός τομέας ενδιαφέροντος των ΠΥΔ. Παραδείγματα εφαρμογών σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν:

- Οικιακά συστήματα ασφαλείας
- Συστήματα ελέγχου περιβαλλοντικών συνθηκών
- Συστήματα οικιακού αυτοματισμού
- Συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης βιομετρικών στοιχείων
- Συστήματα διαχείρισης φαρμακευτικών αγωγών

- Συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης δραστηριότητας (μοτίβα ύπνου, δίαιτας, κίνησης)
- Συστήματα για την αναγνώριση πτώσεων και άλλων επειγόντων περιστατικών
- Συστήματα υπενθύμισης και υποβοήθησης σχεδιασμού
- Συστήματα υποβοήθησης ατόμων με αισθητήριες αδυναμίες
- Ηλεκτρονικά παιχνίδια μάθησης και επικοινωνίας για ενίσχυση των πνευματικών και φυσικών ικανοτήτων
- Συστήματα διαχείρισης φροντίδας για την υποστήριξη των παροχών φροντίδας

2.3.2 Ευγηρία στη κοινότητα

Ο δεύτερος τομέας περιγράφεται ως *‘η δυνατότητα κοινωνικής ενεργοποίησής και δημιουργικότητας καθημερινότητας, μέσω τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, προσανατολισμένες στην κοινωνική διασύνδεση και την εύκολη πρόσβαση σε δημόσιες και εμπορικές υπηρεσίες, με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας ζωής του ατόμου και τη μείωση της κοινωνικής απομόνωσης’* [35]. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που οδηγούν στην κοινωνική απομόνωση και την μοναξιά στην τρίτη ηλικία, όπως η επιδείνωση της σωματικής και ψυχικής υγείας, η αλλαγή του κοινωνικού περιβάλλοντος λόγω συνταξιοδότησης, μετακόμισης ή απώλειας συντρόφου, η ανάγκη παροχής φροντίδας σε έναν σύντροφο με προβλήματα υγείας, η έλλειψη μεταφορικού μέσου, κλπ. [41].

Η διατήρηση των κοινωνικών δεσμών και η ενεργή συμμετοχή στη κοινότητα αποτελούν κομβικά μέρη του σχεδιασμού για την *ενεργή γήρανση* του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας [42]. Όντως, έρευνες έχουν δείξει ότι οι κοινωνικές σχέσεις και η ενεργή κοινωνική συμμετοχή είναι σημαντικές στην ποιότητα ζωής των ηλικιωμένων ατόμων [43][44]. Η κοινωνική δικτύωση είναι συσχετισμένη με καλή φυσική, πνευματική και ψυχική υγεία [45][46][47]. Πολλές εφαρμογές των ΠΥΔ αποσκοπούν στη μείωση της κοινωνικής απομόνωσης και στην διευκόλυνση των κοινωνικών σχέσεων και της ενεργής συμμετοχής στη κοινότητα. Παραδείγματα εφαρμογών σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν:

- Συστήματα υποβοήθησης κινητικότητας και πλοήγησης
- Ρομποτικά συστήματα κοινωνικής συντροφιάς
- Πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, επικοινωνίας και παροχής υπηρεσιών

- Διαδραστικά παιχνίδια και αφηγηματικά μέσα
- Συστήματα που διευκολύνουν την κοινωνική διάδραση και τις δράσεις αναψυχής

2.3.3 Ευγηρία στην εργασία

Ο τρίτος τομέας περιγράφεται ως ‘η δυνατότητα διατήρησης της ενεργητικότητας και της παραγωγικότητας, για ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μέσω εύκολα προσβάσιμων και προσαρμόσιμων τεχνολογιών πληροφορικής, οι οποίες θα διευκολύνουν την δια βίου μάθηση, με σκοπό καλύτερη ποιότητα εργασίας και ισορροπία μεταξύ του χρόνου εργασίας και ιδιωτικής ζωής’ [35]. Πάγια στρατηγική θέση της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η προώθηση της παραμονής στην εργασία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, για την ελάττωση του κόστους ασφάλισης και συνταξιοδότησης του εργατικού προσωπικού [48][49]. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για ασφαλή και υποβοηθητικά περιβάλλοντα εργασίας, τα οποία θα προωθούν την ισότητα, την υγεία και την ευημερία των γηραιότερων εργαζόμενων. Παραδείγματα εφαρμογών σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν:

- Έξυπνοι και προσαρμόσιμοι σταθμοί εργασίας
- Πολυτροπικές διεπαφές
- Συστήματα παρακολούθησης της υγείας στην εργασία
- Ρομποτικά συστήματα υποβοήθησης

2.4 Εργαλεία και Τεχνικές

Τα ΠΥΔ εκμεταλλεύονται τις εξελίξεις σε διάφορες σύγχρονες τεχνολογίες, με ιδιαίτερη έμφαση στη τεχνολογία ‘έξυπνων’ σπιτιών, στη κινητή και ένδυτη τεχνολογία και στη υποβοηθητική ρομποτική. Άλλες συχνά χρησιμοποιήσιμες τεχνολογίες είναι τα συστήματα διαχείρισης φροντίδας, τα συστήματα σχεδιασμού, εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης και επικοινωνίας, συστήματα επίγνωσης περιβάλλοντος και πλαισίου καθώς και παιχνίδια εκμάθησης και επικοινωνίας [10]. Η αξιοποίησή και κατανόηση των δεδομένων, που λαμβάνονται από το περιβάλλον και τον χρήστη, απαιτεί τη χρήση διάφορων εξειδικευμένων αλγορίθμων, λόγω του μεγάλου όγκου τους.

2.4.1 Τεχνολογία ‘έξυπνων’ σπιτιών

‘Έξυπνο’ σπίτι ονομάζεται ένα σπίτι το οποίο είναι εξοπλισμένο με ένα δίκτυο από διάφορους αισθητήρες και ενεργοποιητές, το οποίο συλλέγει συνεχώς και συγκυριακή

πληροφορία σχετικά με το οικιακό περιβάλλον και τον κάτοικο. Στο πλαίσιο των ΠΥΔ, αυτή η πληροφορία συσσωρεύεται και χρησιμοποιείται για την παροχή ενός ασφαλούς και υποβοηθητικού οικιακού περιβάλλοντος [10][50][51]. Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται διάφορα είδη αισθητήρων, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά στα οικιακά ΠΥΔ.

Είδος Αισθητήρα	Χρήση
Περιβαλλοντικοί αισθητήρες(φώς, θερμοκρασία, υγρασία, ποιότητα αέρα, κλπ)	Άνεση, Υγιεινό περιβάλλον, Παρακολούθηση δραστηριότητας
Αισθητήρες καπνού και φυσικού αερίου	Ασφάλεια
Αισθητήρες νερού	Παρακολούθηση υγείας και δραστηριότητας
Αισθητήρες σε οικιακές συσκευές	Άνεση, Ασφάλεια, Υποβοήθηση καθημερινών λειτουργιών, Παρακολούθηση δραστηριότητας
Αισθητήρες κίνησης(ενεργού και παθητικοί αισθητήρες υπερύθρων, κλπ)	Άνεση, Ασφάλεια, Παρακολούθηση δραστηριότητας, Αναγνώριση πτώσεων και επειγόντων περιστατικών
Μαγνητικοί αισθητήρες σε πόρτες και παράθυρα	Ασφάλεια, Παρακολούθηση δραστηριότητας
Αισθητήρες πίεσης (ενσωματωμένοι στο πάτωμα και στα έπιπλα	Αναγνώριση πτώσεων και επειγόντων περιστατικών, Παρακολούθηση δραστηριότητας
RFID	Ασφάλεια, Παρακολούθηση δραστηριότητας, Διαχείριση φαρμακευτικής αγωγής
Μικρόφωνο	Αναγνώριση πτώσεων και επειγόντων περιστατικών, Παρακολούθηση δραστηριότητας
Κάμερα	Ασφάλεια, Αναγνώριση πτώσεων και επειγόντων περιστατικών, Παρακολούθηση δραστηριότητας και υγείας

Πίνακας 2.1: Αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συχνά στα οικιακά ΠΥΔ [9][10]

Στη διάρκεια των τελευταίων 2 δεκαετιών, έχουν αναπτυχθεί διάφορα προγράμματα ‘έξυπνων’ σπιτιών. Ένα από αυτά είναι το πρόγραμμα ‘Aware Home’ στις ΗΠΑ. Πρόκειται για ένα τριώροφο σπίτι, το οποίο είναι εξοπλισμένο με μια ποικιλία από αισθητήρες (κάμερες, μικρόφωνα, RFID, αισθητήρες πίεσης, κλπ.) [52]. Οι αισθητήρες διακριτικά παρακολουθούν και υποστηρίζουν τους κατοίκους. Οι εφαρμογές τους περιλαμβάνουν ένα δίκτυο αισθητήρων πίεσης ενσωματωμένο στο πάτωμα, το οποίο είναι

σε θέση να εντοπίσει και να αναγνωρίσει τους κατοίκους, ένα μνημονικό βοήθημα βασισμένο σε αισθητήρες RFID, το οποίο βοηθάει τους κατοίκους να βρίσκουν χαμένα αντικείμενα και ένα σύστημα συνολικής παρακολούθησης και επικοινωνίας, το οποίο παρέχει πληροφορίες για τις καθημερινές δραστηριότητες των κατοίκων σε απομακρυσμένους συγγενείς.

Στην Ευρώπη, το ερευνητικό πρόγραμμα ENABLE ανέπτυξε και δοκίμασε αρκετές τεχνολογίες για την υποστήριξη ατόμων με ήπια έως μέτρια άνοια στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιρλανδία, την Νορβηγία, την Φινλανδία και την Λιθουανία [53][54]. Οι τεχνολογικές λύσεις που αναπτύχθηκαν περιλαμβάνουν ένα δίκτυο αισθητήρων στις οικιακές συσκευές της κουζίνας, το οποίο φρόντιζε για την ασφαλή χρήση τους (π.χ. κλείσιμο φούρνου ύστερα από ορισμένη ώρα), καθώς και ένα σύστημα εντοπισμού της νυχτερινής δραστηριότητας και την αυτόματη ενεργοποίηση του απαραίτητου φωτισμού.

Άλλα γνωστά παραδείγματα εφαρμογών ‘έξυπνων’ σπιτιών περιλαμβάνουν τα προγράμματα: Casas [55], MavHome [56], Ubiquitous Home [57], Gloucester Smart House [58] και το Future Care Lab [59].

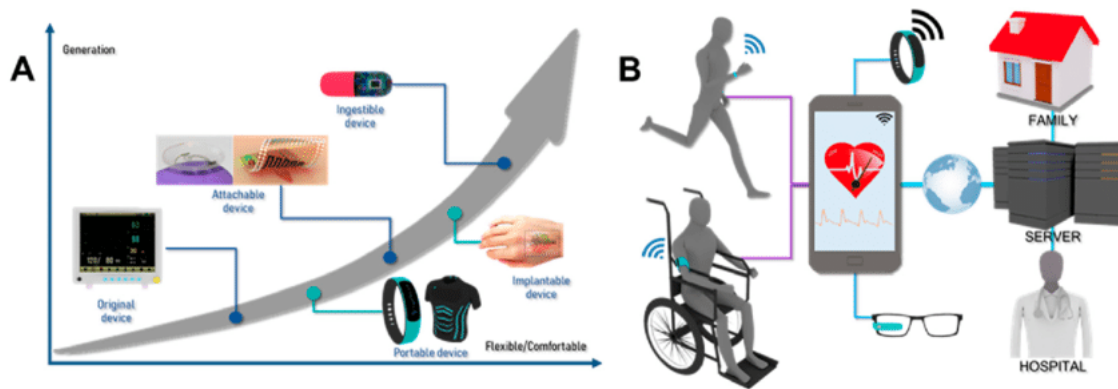
2.4.2 Κινητή και ένδυτη τεχνολογία

Η πρόοδος στην επιστήμη υλικών και την μικροηλεκτρονική έχει επιτρέψει την ανάπτυξη ολοένα και μικρότερων, πιο εύκαμπτων και φθηνότερων αισθητήρων. Αυτή η συνεχιζόμενη αλλαγή στους διαθέσιμους αισθητήρες, έχει εφοδιάσει με ισχυρά εργαλεία τους τομείς της απομακρυσμένης παρακολούθησης της υγείας και της δραστηριότητας των ηλικιωμένων ατόμων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2. Οι τομείς αυτοί, έχουν σκοπό την υποστήριξη της διαχείρισης της υγείας και της αποκατάστασης της στο οικιακό περιβάλλον των ασθενών, μέσω της συνεχής παρακολούθησης των φυσιολογικών δεικτών, της καταγραφής της τοποθεσίας και της κίνησης και της αναγνώρισης και ανάλυσης των μοτίβων δραστηριότητας.

‘Έξυπνα’ κινητά και ρολόγια

Τα ‘έξυπνα’ κινητά (smartphones) είναι εξοπλισμένα με διάφορους αισθητήρες, όπως επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο, αισθητήρες εγγύτητας, GPS, Bluetooth, φωτογραφική μηχανή, μικρόφωνο και αισθητήρες περιβαλλοντικών συνθηκών, οι οποίοι μπορούν να αξιοποιηθούν για παρακολούθηση δραστηριότητας σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους [60]. Τα ‘έξυπνα’ ρολόγια (smartwatches) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση δραστηριότητας, καθώς είναι εξοπλισμένα με παρόμοιους αισθητήρες [61][62].

Σε αντίθεση με τα smartphones, οι περιβραχιόνιες συσκευές είναι πιο αξιόπιστες



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση των διάφορων εργαλείων της ένδυτης τεχνολογίας

στην αναγνώριση δραστηριοτήτων που περιλαμβάνουν κινήσεις χεριών, όπως η κατανάλωση φαγητού, ποτού ή το κάπνισμα [63]. Επίσης, παρέχουν συνεχή δεδομένα για την παρακολούθηση σε εσωτερικούς χώρους, καθώς μπορούν να φορεθούν άνετα 24 ώρες την ημέρα [64][65]. Τα smartphones έχουν καλύτερες επιδόσεις στην αναγνώριση των υπόλοιπων δραστηριοτήτων, διότι το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα βρίσκονται κοντά στην λεκάνη, οπότε και είναι κατάλληλα για την αναγνώριση δραστηριοτήτων, όπως η ποδηλασία ή το τρέξιμο [63][64]. Πρόσφατες μελέτες προσπάθησαν να συνδυάσουν τα δεδομένα των αισθητήρων και από τις 2 συσκευές για προχωρημένη αναγνώριση δραστηριότητας [63][66].

Τα smartwatches και, συνολικά, οι περιβραχιόνιες συσκευές, λόγω της τοποθέτησής τους και της συνεχούς επαφής τους με το δέρμα, είναι κατάλληλες για την παρακολούθηση φυσιολογικών δεικτών, όπως ο καρδιακός ρυθμός (μέσω του ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ECG) ή του φωτοπληθυσμιογραφήματος (PPG), την θερμοκρασία του σώματος, την εφίδρωση (μέσω της ηλεκτροδερματικής δραστηριότητας GSR) και της μυϊκής δραστηριότητας (μέσω της ηλεκτρομυογραφίας (EMG) [65][67].

Αρκετές έρευνες έχουν χρησιμοποιήσει smartphones, smartwatches και άλλες περιβραχιόνιες συσκευές στον τομέα των ΠΥΔ. Συγκεκριμένα, έχουν χρησιμοποιηθεί διαθέσιμα στην αγορά smartphones και smartwatches για την αναγνώριση πτώσεων ηλικιωμένων ατόμων. Η χρήση αυτών των συσκευών μείωσε τον αριθμό των λανθασμένων συναγερμών, ενώ ταυτόχρονα βελτίωσε την ικανότητα ανίχνευσης πραγματικών πτώσεων [66]. Σε άλλες έρευνες, η αξιοποίηση των δεδομένων από τις συγκεκριμένες συσκευές απέτρεψε την αφυδάτωση ηλικιωμένων ατόμων μέσω της παρακολούθησης των κινήσεων των χεριών τους [68].

‘Έξυπνα’ ρούχα και υφάσματα

Τα ‘έξυπνα’ ρούχα και υφάσματα προσφέρουν άλλο ένα εργαλείο για μη επεμβατική παρακολούθηση της υγείας και της δραστηριότητας των ατόμων. Έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες που μπορούν να ενσωματωθούν στα ρούχα, στο ύφασμα και στις ίνες του υφάσματος [10]. Ένα παράδειγμα ενός ‘έξυπνου’ ρούχου είναι το γιλέκο MagIC. Το συγκεκριμένο γιλέκο διαθέτει πλεκτά ηλεκτρόδια για καταγραφή ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ECG), έναν υφασμάτινο αισθητήρα πληθυσμιογραφήματος για την παρακολούθηση του αναπνευστικού ρυθμού και ένα επιταχυνσιόμετρο. Χρησιμοποιήθηκε για την απομακρυσμένη παρακολούθηση καρδιοπαθών [69].

Ένα παρόμοιο ρούχο είναι το t-shirt Smart Vest.[70] Περιέχει αισθητήρες ενσωματωμένους στο ύφασμα, οι οποίοι συλλέγουν διάφορους φυσιολογικούς δείκτες, όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα (ECG), το φωτοπληθυσμιογράφημα για την μέτρηση της ροής και πίεσης του αίματος (PPG), την θερμοκρασία του σώματος, την εφίδρωση μέσω του GSR, αλλά και την τοποθεσία μέσω GPS. Ταυτόχρονα, γίνονται έρευνες [71] για να αναπτυχθούν υφασμάτινοι χωρητικοί αισθητήρες σε διάφορα σημεία του σώματος, με σκοπό την καταγραφή διάφορων φυσιολογικών δεικτών, όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα και ο ρυθμός αναπνοής, οι κινήσεις του καρπού και του χεριού, η κατανάλωση φαγητού και ποτού καθώς και πληροφορίες για το βάδισμα του ατόμου.

Υπάρχουν και άλλες δημοφιλείς ένδυτες συσκευές, οι οποίες, συνήθως, επισυνάπτονται στα παπούτσια, στη ζώνη ή στα κοσμήματα του χρήστη [72][73][74][75].

Επιδερμικά ηλεκτρονικά συστήματα

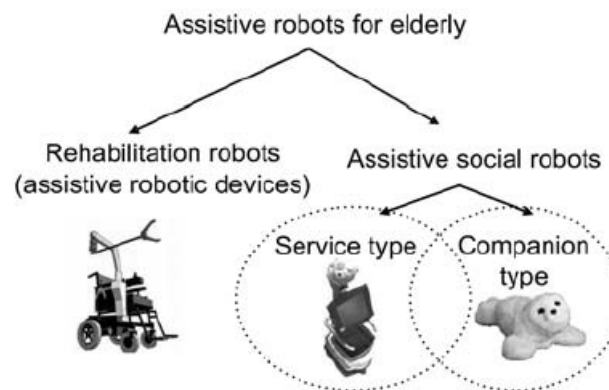
Ένα ακόμη αισθητηριακό εργαλείο για την καταγραφή της υγείας είναι αισθητήρες ενσωματωμένοι σε επιφάνειες, οι οποίες είναι συνημμένες στο δέρμα. Ωστόσο, η συγκεκριμένη λύση έχει περιορισμένη περιθώρια αξιοποίησης στην καθημερινή ζωή, καθώς δεν είναι εύχρηστη και οι αισθητήρες μπορούν εύκολα να αποσπαστούν από το δέρμα [76]. Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν εύκαμπτες και λεπτές μεμβράνες, οι οποίες ονομάζονται επιδερμικά ηλεκτρονικά συστήματα. Οι ιδιότητες τους επιτρέπουν μια πιο σταθερή και στενή διεπαφή της μεμβράνης με το δέρμα, επιτρέποντας την συνεχή και σταθερή καταγραφή φυσιολογικών μετρήσεων [77]. Αν και τα περισσότερα παρόμοια συστήματα συλλέγουν φυσικές ή ηλεκτροφυσιολογικές παραμέτρους, όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα ή η θερμοκρασία του δέρματος [78][79][76], υπάρχουν ορισμένα τα οποία συλλέγουν και βιοχημικές παραμέτρους, όπως η συγκέντρωση γαλακτικού οξέος στον ιδρώτα [77].

Ενδοσωματικά συστήματα

Μια πιο επεμβατική λύση για την παρακολούθηση της υγείας ενός χρήστη είναι τα συστήματα που εισέρχονται στο σώμα του. Παραδείγματα τέτοιων λύσεων είναι αισθητήρες γλυκόζης, οι οποίοι εισέρχονται υποδόρια για την ανίχνευση υπογλυκαιμίας στο αίμα [80]. και κάψουλες, οι οποίες χορηγούνται από το στόμα, και καταγράφουν την θερμοκρασία, την πίεση, εικόνες και το pH στο εσωτερικό του σώματος [81].

2.4.3 Υποβοηθητική ρομποτική

Η υποβοηθητική ρομποτική στα ΠΥΔ χωρίζεται στις εξής 3 ευρείς κατηγορίες, τα ρομπότ ανάρρωσης και παροχής φροντίδας, τα κοινωνικά ρομπότ παροχής υπηρεσιών και τα ρομπότ συντροφιάς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 [82][83]. Η πρώτη κατηγορία



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση των κατηγοριών της υποβοηθητικής ρομποτικής

γορία περιγράφεται ως ‘συσκευές οι οποίες βοηθάνε φυσικά τον χρήστη χωρίς να έχουν κύριο σκοπό την επικοινωνία ή να μπορούν να θεωρηθούν κοινωνικές οντότητες’ [83]. Τα ρομπότ ανάρρωσης βοηθούν στην φυσική εξάσκηση, συνεισφέρουν στην διαχείριση μειωμένων φυσικών ικανοτήτων και βοηθούν τους ηλικιωμένους στις καθημερινές δραστηριότητες τους. Παραδείγματα που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι ρομπότ υποβοήθησης κίνησης [84], εξωσκελετοί [85] και ρομπότ που βοηθούν με την φυσική εξάσκηση και αποκατάσταση [86].

Η δεύτερη κατηγορία είναι τα κοινωνικά ρομπότ παροχής υπηρεσιών. Ο σκοπός τους είναι να βοηθούν τους ηλικιωμένους στις διάφορες δραστηριότητες της καθημερινότητας, να βοηθούν στις μετακινήσεις τους και να παρακολουθούν την υγεία και ασφάλεια τους. Τα συγκεκριμένα ρομπότ χαρακτηρίζονται ως κοινωνικά διότι μπορούν να αλληλεπιδράσουν άμεσα με τους ηλικιωμένους [83]. Το ρομπότ Pearl είναι ένα ανθρωποειδές κοινωνικό ρομπότ παροχής υπηρεσιών, το οποίο έχει ύψος 1 μέτρο, και αλληλεπιδρά με τον χρήστη μέσω ομιλίας, οθονών, εκφράσεις του προσώπου και

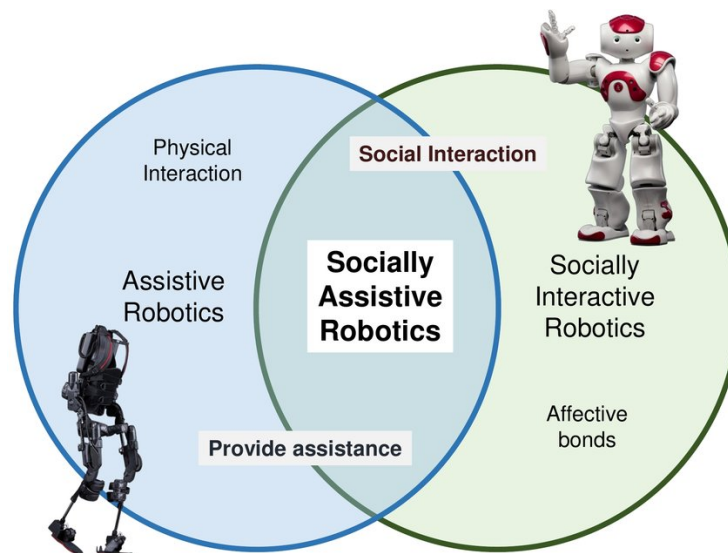
φυσική κίνηση [87][88]. Σχεδιάστηκε για να βοηθά ηλικιωμένους, μέσω της υπενθύμισης και της οργάνωσης διάφορων καθημερινών εργασιών και δραστηριοτήτων, όπως τα γεύματα, η φαρμακευτική αγωγή και η πλοήγηση στο περιβάλλον τους.

Το ρομπότ Care-o-bot ανήκει στην ίδια κατηγορία [89][90][91]. Η τελευταία εκδοχή του είναι ανθρωπόμορφη και έχει ύψος 1.5 μέτρο. Σε σχέση με τις προηγούμενες εκδοχές του, έχει δοθεί προσοχή στα μέσα αλληλεπίδρασης και στην φυσικότητα του σώματος του, για την βελτίωση της κοινωνικότητας του. Ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει μαζί του μέσω χειρονομιών, ομιλίας, οθόνης αφής και εφαρμογής σε κινητό. Το Care-o-bot μπορεί να αντιδράσει με εκφράσεις του προσώπου, κινήσεις των χεριών και του σώματος καθώς και με τα ενσωματωμένα ηχεία του. Με τα εύκαμπτα χέρια του μπορεί να μεταφέρει και να χειριστεί αντικείμενα [90]. Άλλα παραδείγματα ρομπότ παροχής υπηρεσιών είναι το RIBA [92] και το Kompaï [93].

Η τρίτη κατηγορία είναι τα ρομπότ συντροφιάς. Κυρία λειτουργία τους είναι η ενίσχυση της συναισθηματικής ευμάρειας και η μείωση της μοναξιάς, παρέχοντας συντροφιά και διευκολύνοντας τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις [82]. Ένα παράδειγμα ρομπότ συντροφιάς είναι ο Pao, μια ρομποτική φώκια καλυμμένη με μαλακή γούνα. Ο Pao αντιδρά στην ομιλία, στο να τον χαϊδεύουν και να τον κρατάνε, κουνώντας το κεφάλι και τα πτερύγια του, ανοιγοκλείνοντας τα μάτια του και μιμούμενος την φωνή μιας νεαρής φώκιας. Σκοπός του είναι να προκαλέσει αντίστοιχα συναισθήματα με ένα πραγματικό κατοικίδιο, ώστε να μειωθεί το άγχος και η ανησυχία, προσφέροντας ψυχολογική παρηγοριά και τονώνοντας τις κοινωνικές επαφές [94].

Ένα ακόμα ρομπότ συντροφιάς είναι ο AIBO, ένας κινητός ρομποτικός σκύλος με ενσωματωμένους αισθητήρες και ένα σκληρό πλαστικό εξωτερικό. Ο AIBO μπορεί να κουνήσει το κεφάλι, την ουρά και τα πόδια του. Έχει δοκιμαστεί σε περιβάλλοντα με ηλικιωμένους και έρευνες έδειξαν πως μειώνει το άγχος και την μοναξιά και ενισχύει την κοινωνική συμπεριφορά [95][96]. Ο Zora είναι ένα ανθρωποειδές ρομπότ συντροφιάς, το οποίο στοχεύει να ενεργοποιήσει και να αλληλεπιδράσει με τους ηλικιωμένους, τραγουδώντας, χορεύοντας ή ενθαρρύνοντας φυσική εξάσκηση [97][98][99].

Τα τελευταία χρόνια, ο διαχωρισμός μεταξύ των 3 κατηγοριών γίνεται ολοένα και πιο ασαφής, καθώς οι κατασκευαστές ρομπότ υπηρεσίας περιλαμβάνουν περισσότερα κοινωνικά μέσα και μέσα αλληλεπίδρασης, για να αυξήσουν την αποδοχή των χρηστών. Επομένως, είναι πιθανό τα μελλοντικά ρομπότ να παρέχουν και αυξημένη λειτουργική υποστήριξη αλλά και κοινωνική συντροφιά.



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση των σκοπών της υποβοηθητικής ρομποτικής

2.4.4 Αλγόριθμοι και υπολογιστικές τεχνικές

Ο μεγάλος όγκος και ποικιλία των δεδομένων που συλλέγονται από τις διάφορες εφαρμογές των ΠΥΔ απαιτούν ειδικούς αλγορίθμους και υπολογιστικές τεχνικές για την κατανόηση και διαχείριση τους. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε μια περίληψη των πιο συχνών τεχνικών που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές των ΠΥΔ.

Αναγνώριση δραστηριότητας

Τα ΠΥΔ χρειάζονται να αναγνωρίσουν τι κάνουν οι χρήστες τους, βασισμένα σε μια ποικιλία δεδομένων, για να παρέχουν προληπτική βοήθεια. Σημαντικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν τον ύπνο, το περπάτημα, την εξάσκηση, την κατανάλωση φαγητού και ποτού και την λήψη της φαρμακευτικής αγωγής. Η προσέγγιση για την αναγνώριση δραστηριότητας εξαρτάται από τους υποκείμενους αισθητήρες, τον αλγόριθμο μηχανικής μάθησης που μοντελοποιεί την δραστηριότητα και την πολυπλοκότητα της δραστηριότητας προς μάθηση.

Αναγνώριση συμπεριφορικών μοτίβων

Μια σχετική προσέγγιση είναι η αναγνώριση επαναλαμβανόμενων μοτίβων στα συγκεντρωμένα δεδομένα δραστηριότητας, μέσω τεχνικών μάθησης χωρίς επιτήρηση. Τα μοτίβα αυτά συνεισφέρουν στην κατανόηση και ερμηνεία των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων μοντέλων για την αναγνώριση των μοτίβων αυτών στο μέλλον.

Αναγνώριση ανωμαλιών

Η αναγνώριση ανωμαλιών αναφέρεται στον εντοπισμό μοτίβων στα συγκεντρωμένα δεδομένα, τα οποία αποκλίνουν από την αναμενόμενη συμπεριφορά. Αυτό είναι κομβικό για τα ΠΥΔ, για να μπορέσει να αναγνωρίσει αλλαγές στην καθημερινή ρουτίνα, μη συμμόρφωση με την φαρμακευτική αγωγή, πτώσεις ή άλλες επείγοντες καταστάσεις. Η αναγνώριση ανωμαλιών είναι πιο ακριβής με συμπεριφορές, οι οποίες πραγματοποιούνται σε τακτική βάση.

Μοντελοποίηση πλαισίου

Τα συστήματα ΠΥΔ πρέπει να προσαρμόζονται σε δυναμικές πληροφορίες πλαισίου, σχετικά με το φυσικό περιβάλλον, τον χρήστη και το υπολογιστικό υπόβαθρο [100]. Επομένως, τα συστήματα πρέπει να μπορούν να αναπαραστήσουν την συναφή πληροφορία, όπως η χωρική πληροφορία του περιβάλλοντος, το ιατρικό ιστορικό, το προφίλ και τις προτιμήσεις του χρήστη, την πληροφορία για τους υπάρχοντες αισθητήρες.

Σχεδιασμός και οργάνωση

Ο αυτοματοποιημένος σχεδιασμός και οργάνωση μπορούν να έχουν μεγάλη αξία σε διάφορες ΠΥΔ εφαρμογές. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την υπενθύμιση των απαραίτητων δραστηριοτήτων σε άτομα με πνευματικές βλάβες και την αυτοματοποίηση της καθημερινής ρουτίνας ατόμων με φυσικά προβλήματα.

Αναγνώριση ταυτότητας και τοποθεσίας

Η ανάγκη για παρακολούθηση, ανίχνευση και παροχή προληπτικής και φυσικής βοήθειας στους χρήστες, εξυπηρετείται στα ΠΥΔ από συστήματα ταυτοποίησης και εντοπισμού των ηλικιωμένων ειδικά σε κατοικίες με πολλούς κατοίκους.

2.5 Προκλήσεις

Υπάρχουν αρκετές προκλήσεις στον τομέα των ΠΥΔ που δεν έχουν λυθεί ακόμα, παρά τις υποσχόμενες τεχνικές εξελίξεις.

2.5.1 Τεχνική υλοποίηση

Τα έξυπνα σπίτια και οι ένδυτες συσκευές συλλέγουν έναν πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων. Αυτά είναι η βάση της προσωποποιημένης, προληπτικής και περιβάλλουσας

βοήθειας, ωστόσο συνεπάγονται σοβαρά ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας. Απαιτείται η χρήση πρωτοκόλλων ασφαλείας και η χρήση ειδικών τεχνικών προστασίας δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για ευαίσθητα δεδομένα, όπως ιατρικά δεδομένα ή οπτικό υλικό. Ο συνδυασμός των διάφορων διασυνδεδεμένων αισθητήρων και συσκευών περαιτέρω δυσχεραίνει την υλοποίηση ασφαλούς ανάλυσης και αποθήκευσης δεδομένων [33][101][10]. Η διαλειτουργικότητα και η τυποποίηση των αισθητήρων και συσκευών, προκειμένου να μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, είναι ένα επιπλέον πρόβλημα το οποίο προσπαθούν να λύσουν οι ερευνητές [102][36]. Επίσης, ένα συνολικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ΠΥΔ είναι ο σχεδιασμός απλών και διαισθητικών διεπαφών, ώστε να διευκολυνθεί η φυσική αλληλεπίδραση με τα ηλικιωμένα άτομα [36][103].

Ένα ακόμα πρόβλημα των συστημάτων ΠΥΔ είναι η αξιοπιστία. Η αξιόπιστη αναγνώριση της δραστηριότητας και της συμπεριφοράς του χρήστη σε ένα μη ελεγχόμενο οικιακό περιβάλλον είναι ένα απαιτητικό πρόβλημα. Πολλές έρευνες αναφέρουν προβλήματα αξιοπιστίας, όπως λάθος συναγερμοί, χαμηλή ακρίβεια πρόβλεψης ή αδυναμία διαχείρισης πολλαπλών χρηστών, παρά την συνεχή εξέλιξη των αλγορίθμων και των αισθητήρων. Τα ζητήματα αξιοπιστίας δεν οδηγούν μόνο σε δυσφορία και μειωμένη εμπιστοσύνη μεταξύ των χρηστών, αλλά μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και την ευμάρεια τους. Επομένως, η βελτίωση της αξιοπιστίας των ΠΥΔ παραμένει κομβικό ζήτημα προς επίλυση [50][10][9].

Στην περίπτωση των ένδυτων λύσεων, υπάρχει η επιπλέον πρόκληση να σχεδιαστεί μια άνετη, ελαφριά και ασφαλής συσκευή με καλή αισθητική, σχεδιασμό και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, ώστε να μπορεί και θέλει ο χρήστης να την φοράει 24 ώρες την μέρα. Ταυτόχρονα, οι προγραμματιστές και οι σχεδιαστές αυτών των συσκευών χρειάζεται να ενσωματώσουν σε αυτές, το απαραίτητο υλικό και λογισμικό για αξιόπιστη, ασφαλή και συνεχή συλλογή δεδομένων [101].

Αντίστοιχα, η μεγαλύτερη πρόκληση της υποβοηθητικής ρομποτικής είναι η διευκόλυνση της φυσικής αλληλεπίδρασης και κοινωνικής σύμπλεξης μεταξύ ρομπότ και ηλικιωμένων. Οι ερευνητές συνεχίζουν να δουλεύουν προς μια αποδεκτή φυσική εμφάνιση, τον σχεδιασμό χειρονομιών, εκφράσεων προσώπου και σωματικών κινήσεων που να προσεγγίζουν τις ανθρώπινες και την δημιουργία κοινωνικής νοημοσύνης και αυτόνομης συμπεριφοράς [83][104]. Επιπλέον, τα περισσότερα ρομπότ έχουν περιορισμένη λειτουργικότητα και δεν είναι σε θέση να βοηθήσουν σε πολλές και περίπλοκες δραστηριότητες της καθημερινότητας [10]. Μια ακόμα ανησυχία για την υποβοηθητική ρομποτική είναι η εγγυημένη ασφαλής κίνηση και λειτουργία σε ένα οικιακό περιβάλλον [105].

Παρά την εντυπωσιακή πρόοδο και τις πολλαπλές δυνατότητες που παρουσιάζο-

νται, πρόσφατες συστηματικές έρευνες[50][102] ανέδειξαν ότι η συνολική τεχνολογική ετοιμότητα των ΠΥΔ εφαρμογών παραμένει χαμηλή, με τις περισσότερες εφαρμογές να περιορίζονται σε πιλοτικό στάδιο και μόνο ένα μικρό μέρος να καταλήγει σε εμπορικά προϊόντα. Ορισμένα από τα βασικά εμπόδια για την υλοποίηση και διάδοση των ΠΥΔ συστημάτων είναι η αβεβαιότητα του κόστους τους και η έλλειψη κανονισμών και ρυθμίσεων σχετικά με τον διαμοιρασμό και αποζημίωση του κόστους τους από τους αντίστοιχους ασφαλιστικούς φορείς [10][106][107]. Ωστόσο, σύγχρονες έρευνες άρχισαν να προσεγγίζουν τα παραπάνω προβλήματα, αναλύοντας την αποδοτικότητα των συστημάτων ΠΥΔ με όρους κόστους και εξερευνώντας τρόπους να συνδέσουν τα ΠΥΔ συστήματα με τα διάφορα συστήματα υγείας [108].

2.5.2 Αποδοχή από τους χρήστες

Η πιο σημαντική συνθήκη για την διάδοση των ΠΥΔ είναι η αποδοχή των χρηστών. Αρκετές συστηματικές ανασκοπήσεις αναδεικνύουν την αποδοχή αυτή ως ένα από τα μεγάλα εμπόδια για την υλοποίηση και διάδοση των ΠΥΔ συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες [37][10][83]. Όντως, η φύση και ο σκοπός των ΠΥΔ έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην αποδοχή από τους χρήστες. Αυτές οι συσκευές καταλαμβάνουν ιδιωτικό χώρο είτε στο οικιακό περιβάλλον είτε ακόμα και πάνω στο σώμα των χρηστών, συλλέγουν και αποθηκεύουν προσωπικά και ιατρικά δεδομένα, επηρεάζουν την συμπεριφορά και τις συνήθειες, ωθούν τους χρήστες τους να κοινωνικοποιηθούν μέσω ή με μια μηχανή και αναλαμβάνουν εργασίες οι οποίες προορίζονται για άνθρωπο, είτε τον ίδιο τον χρήστη ή κάποιο πάροχο φροντίδας.

Η αποδοχή των χρηστών, λοιπόν, απασχολεί όλο και περισσότερες έρευνες [50]. Ωστόσο, ο τομέας παραμένει κινούμενος με γνώμονα την τεχνολογία και όχι τον χρήστη, καθώς οι ερευνητές και σχεδιαστές ΠΥΔ εφαρμογών δεν έχουν σαν προτεραιότητα την κάλυψη των αναγκών των χρηστών [36]. Αυτό οδηγεί σε στερεοτυπικές συμπεριφορές, υπεραπλούστευση και ανεπαρκής κατανόηση των αναγκών του χρήστη, τα οποία συνεπώς, οδηγούν σε κακό σχεδιασμό και υλοποίηση προϊόντων τα οποία τείνουν να απορρίπτονται από τους χρήστες [109][110][111][112].

Επομένως, οι ηλικιωμένοι και οι πάροχοι υγείας πρέπει να εμπλακούν στην διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης έτσι ώστε να αποφευχθεί ένα κενό μεταξύ των αναγκών των χρηστών και τις πεποιθήσεις των ερευνητών [10][113][36]. Επιπλέον, ο κλάδος οφείλει να αναπτύξει μια περιεκτική κατανόηση, βασισμένη στην θεωρία, τον παραγόντων αυτών που προωθούν ή αποθαρρύνουν την αποδοχή των ΠΥΔ. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν στις διαδικασίες σχεδιασμού και ανάπτυξης νέων προϊόντων, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα αποδοχής τους από τους μελλοντικούς τους χρήστες.

2.5.3 Εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και θεωρητικός διάλογος

Οι περισσότερες έρευνες σχετικά με τα ΠΥΔ υποστηρίζουν ότι οι τεχνολογίες αυτές έχουν την δυνατότητα υποστήριξης μιας υγιούς και αυτόνομης γήρανσης για τους ηλικιωμένους, ωστόσο οι κλινικές ενδείξεις είναι λίγες και αδύναμες. Η κλινική αποδεικτική βάση των ΠΥΔ παρουσιάζει μικτά αποτελέσματα. Ενώ οι Demiris και Hensel σε πρώιμη μελέτη δεν εντόπισαν σαφείς ενδείξεις για τη βελτίωση της υγείας ή την αποφυγή θεσμικής φροντίδας [51], μεταγενέστερες αναλύσεις, όπως αυτή του Liu, βρήκαν υποσχόμενες ενδείξεις για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση καθημερινών δραστηριοτήτων, η υποστήριξη σε γνωστικές παθήσεις, η ψυχική υγεία και η καρδιολογική φροντίδα [50]. Οι ερευνητές δεν βρήκαν κάποια μελέτη που να παρουσιάζει κλινικά στοιχεία για την πρόβλεψη αναπηρίας, την αποφυγή πτώσεων και την βελτίωση της ποιότητας ζωής των χρηστών. Ο Robinson κατέληξε ότι η υποβοηθητική ρομποτική χρειάζεται περισσότερες δοκιμές σε πραγματικά οικιακά περιβάλλοντα, ώστε να αποδειχθεί η δυνατότητα προσαρμογής τους στην καθημερινότητα ηλικιωμένων ατόμων και, στη συνέχεια, αποτελεσματικής υποστήριξης τους [83].

Η δεδομένη μεθοδολογική προσέγγιση για να μετρήσουν την αποδοχή των χρηστών είναι ποιοτική και όχι ποσοτική, ενώ ο αριθμός των δειγμάτων συνήθως είναι μικρός. Είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μεγαλύτερης κλίμακας ερευνών για να κατανοηθεί η σχετική σημασία των παραγόντων που επηρεάζουν την αποδοχή των ΠΥΔ από τους χρήστες, η αναγνώριση των υποκείμενων σχέσεων μεταξύ τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση τους στην διαδικασία αποδοχής. Άλλες έρευνες αναφέρουν την ανησυχία ότι ο τομέας των ΠΥΔ είναι πλούσιος σε δεδομένα και όχι σε θεωρία [34]. Αυτή η έλλειψη θεωρητικού πλαισίου επιβεβαιώνεται από τον Liu, ο οποίος διαπίστωσε ότι οι περισσότερες μελέτες αποδοχής των ΠΥΔ στερούνται θεωρητικής θεμελίωσης για την εξήγηση των ευρημάτων τους [50]. Η ανάπτυξη ενός θεωρητικού διαλόγου θα βοηθούσε τους ερευνητές των ΠΥΔ να κατανοήσουν τους υποκείμενους κοινωνικούς, ψυχολογικούς και συμπεριφορικούς μηχανισμούς της διαδικασίας αποδοχής.

Συνολικά, είναι σαφές πως υπάρχει έλλειψη αποδεδειγμένων μεθοδολογικών προσεγγίσεων, όπως τυχαία ελεγχόμενες δοκιμές, μακροχρόνιες μελέτες, ποσοτικές μελέτες μεγάλης κλίμακας και θεωρητικές προσεγγίσεις, για την κατανόηση της διάδοσης και της αποδοτικότητας των εφαρμογών ΠΥΔ [114][115][37].

Κεφάλαιο 3

Θεωρία Ασαφών Συνόλων και Λογική

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της θεωρίας ασαφών συνόλων και της ασαφούς λογικής. Οι Klir και Yuan [116] παρέχουν πιο αναλυτικές περιγραφές των αρχών της, ενώ οι Nguyen και Walker [117] αναφέρονται σε πρακτικές εφαρμογές της. Η ασαφής λογική διευρύνει την κλασική θεωρία συνόλων και βοηθά στην ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από βιοϊατρικές εφαρμογές στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT).

3.1 Εισαγωγή

Η μαθηματική λογική άρχισε να διαμορφώνεται στα μέσα του 19ου αιώνα, με σημαντικές συμβολές από τους Boole και De Morgan. Η προσπάθεια θεμελίωσης των Μαθηματικών ενσωμάτωσε τη φιλοσοφική λογική σε τυπικούς κανόνες. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, αναδείχθηκε η θεωρία συνόλων ως βασικό εργαλείο. Ορίζει σύνολα ως συλλογές αντικειμένων και στηρίζεται σε μια δυαδική σχέση μεταξύ ενός στοιχείου και ενός συνόλου: ανήκει ή δεν ανήκει.

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία συνόλων, κάθε στοιχείο ενός συνόλου αναφοράς Ω είτε βρίσκεται στο A είτε όχι. Η χαρακτηριστική συνάρτηση χ_A διαχωρίζει ξεκάθαρα τα στοιχεία που ανήκουν στο A (τιμή 1) από αυτά που δεν ανήκουν (τιμή 0). Αυτό λειτουργεί καλά σε περιπτώσεις που οι έννοιες είναι σαφώς ορισμένες. Στη βιοϊατρική πράξη, όμως, συναντούμε ασάφεια. Συχνά, ένα στοιχείο ταιριάζει σε μια κατηγορία, αλλά όχι με απόλυτη βεβαιότητα.

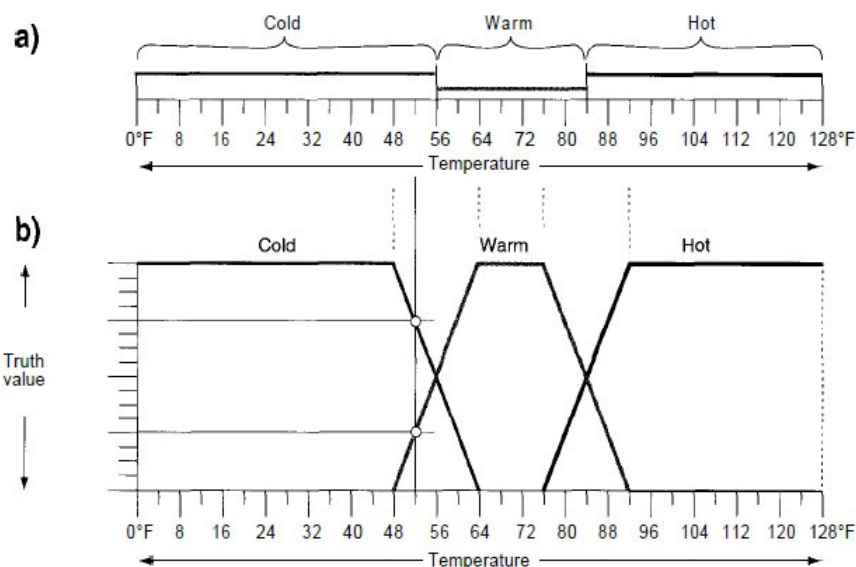
Η θεωρία ασαφών συνόλων επεκτείνει τη δυαδική προσέγγιση και επιτρέπει ένα εύρος τιμών μεταξύ 0 και 1. Ο Zadeh [13] παρατήρησε ότι πολλά σύνολα δεν έχουν καθαρά όρια και εισήγαγε την έννοια της συνάρτησης συμμετοχής. Με αυτόν τον

τρόπο, αποτυπώνεται ο βαθμός στον οποίο κάθε στοιχείο συμμετέχει σε ένα ασαφές σύνολο, αντί για ένα απλό ‘ναι’ ή ‘όχι’.

Στα επόμενα τμήματα θα δούμε πώς αυτές οι συναρτήσεις συμμετοχής και οι πράξεις (συμπλήρωμα, τομή, ένωση) ορίζουν ένα πλαίσιο για την ασαφή λογική. Θα εστιάσουμε σε τρόπους με τους οποίους αυτή η προσέγγιση μπορεί να στηρίξει την επεξεργασία δεδομένων σε IoT εφαρμογές, κυρίως σε βιοϊατρικά περιβάλλοντα, όπου η αβεβαιότητα είναι συχνή. Στα επόμενα κεφάλαια θα φανεί πώς αυτή η θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετες αναλύσεις δεδομένων, όπως οι μετρικές ομοιότητας ή απόστασης σε βιοϊατρικά σήματα από IoT συσκευές.

3.2 Θεωρία Ασαφών Συνόλων

Βασιζόμενοι στη συζήτηση για τους περιορισμούς των κλασικών (αυστηρών) συνόλων, προχωρούμε στον τυπικό ορισμό και την ερμηνεία των ασαφών συνόλων. Η βασική αρχή είναι ότι πολλές πραγματικές καταστάσεις περιλαμβάνουν ασάφεια και αβεβαιότητα, που δεν μπορούν να αποδοθούν ικανοποιητικά με ένα δυαδικό σχήμα ‘ανήκει/δεν ανήκει’ [13, 116]. Εντός αυτού του πλαισίου, ο Zadeh προέτεινε μια γενίκευση της κλασικής θεωρίας συνόλων, εισάγοντας την έννοια του βαθμού συμμετοχής κάθε στοιχείου.



Σχήμα 3.1: (a) Παράδειγμα αυστηρού (crisp) συνόλου, (b) Παράδειγμα ασαφούς συνόλου.

Ορισμός 3.1. Ορισμός Ασαφούς Συνόλου.

Έστω Ω ένα σύνολο αναφοράς. Ορίζουμε ένα ασαφές σύνολο $A \subseteq \Omega$ ως το διατεταγμένο

ζεύγος

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in \Omega, \mu_A : \Omega \rightarrow [0, 1]\}, \quad (3.1)$$

όπου $\mu_A(x)$ είναι η συνάρτηση συμμετοχής του x στο A . Η τιμή $\mu_A(x)$ μπορεί να λάβει οποιαδήποτε πραγματική τιμή στο διάστημα $[0, 1]$, εκφράζοντας σε ποιον βαθμό το στοιχείο x ανήκει στο ασαφές σύνολο A .

Στο Σχήμα 3.1 (b) παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση μιας τέτοιας συνάρτησης συμμετοχής, σε αντιδιαστολή με το αυστηρό ($\{0, 1\}$) σχήμα του κλασικού συνόλου στο Σχήμα 3.1 (a).

Σε περιπτώσεις όπου το ασαφές σύνολο A είναι διακριτό, μπορούμε να το συμβολίσουμε ως:

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i, \quad (3.2)$$

όπου το σύμβολο $\sum$ υποδηλώνει την ‘ένωση’ όλων των στοιχείων και $\mu_A(x_i)/x_i$ σημαίνει ότι το στοιχείο x_i ανήκει στο A με βαθμό συμμετοχής $\mu_A(x_i)$. Σημειώνεται ότι ο χαρακτήρας ‘/’ δεν δηλώνει διαίρεση αλλά συμβατική σημείωση που απαντάται συχνά στη βιβλιογραφία [14].

Αντίστοιχα, όταν το A είναι συνεχές, γράφεται:

$$\int_x \mu_A(x)/x, \quad (3.3)$$

όπου το ολοκλήρωμα $\int$ καταδεικνύει την ‘ένωση’ σε έναν συνεχόμενο χώρο αναφοράς Ω .

Ορισμός 3.2. Κανονικό Ασαφές Σύνολο.

Ένα ασαφές σύνολο A καλείται κανονικό (*normal*) εάν η συνάρτηση συμμετοχής του φτάνει το 1 για τουλάχιστον ένα στοιχείο:

$$\max_{x \in \Omega} \mu_A(x) = 1. \quad (3.4)$$

Με άλλα λόγια, υπάρχει τουλάχιστον ένα $x \in \Omega$ που ανήκει στο A με πλήρη βαθμό συμμετοχής.

Ορισμός 3.3. Πληθικότητα Ασαφούς Συνόλου (*Cardinality*).

Για ένα πεπερασμένο σύνολο αναφοράς Ω , ορίζουμε την πληθικότητα του ασαφούς συνόλου A ως:

$$|A| = \sum_{x \in \Omega} \mu_A(x). \quad (3.5)$$

Αντίστοιχα, η σχετική πληθικότητα του A ως προς Ω είναι:

$$\|A\| = \frac{|A|}{|\Omega|}. \quad (3.6)$$

Οι έννοιες αυτές ποσοτικοποιούν το πόσο ‘μεγάλο’ είναι το ασαφές σύνολο, λαμβάνοντας υπόψη τους μη-δυναδικούς βαθμούς συμμετοχής [116].

Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται μερικές από τις πιο διαδεδομένες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής. Οι παραμετρικές εκφράσεις (π.χ. a, b, c, d, σ) καθορίζουν το σχήμα της συνάρτησης, καθιστώντας τη χρήσιμη για διαφορετικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, η τριγωνική και η τραπεζοειδής μορφή προσφέρουν απλές, κομμάτι-γραμμικές προσεγγίσεις, ενώ η Gaussian υποστηρίζει ομαλότερες μεταβάσεις [12].

Οι διαφορετικές μορφές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή· για παράδειγμα, η τριγωνική συνάρτηση συχνά χρησιμοποιείται για συστήματα με απλούς υπολογισμούς, ενώ η Gaussian είναι κατάλληλη όταν οι μεταβάσεις πρέπει να είναι πιο ομαλές [13, 12].

Σε επόμενη ενότητα, θα ασχοληθούμε με τις πράξεις επί των ασαφών συνόλων (τομή, ένωση, συμπλήρωμα) και θα αναδείξουμε πώς αυτές γενικεύουν τις αντίστοιχες κλασικές πράξεις, καλύπτοντας μεγαλύτερη γκάμα εφαρμογών που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα ή μερική αλήθεια. Έτσι, το θεωρητικό υπόβαθρο που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο αποτελεί τη βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη ασαφών συστημάτων και μεθόδων συμπερασμού.

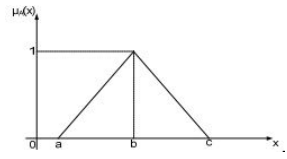
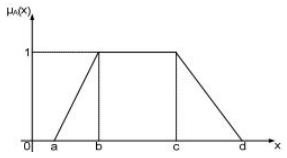
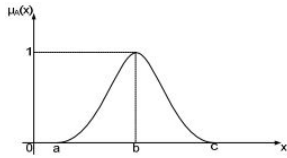
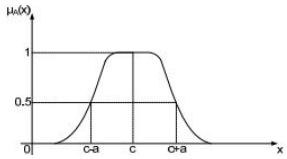
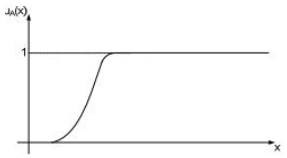
3.3 Τελεστές Ασαφούς Συνολοθεωρίας

Στην κλασική θεωρία συνόλων, οι πράξεις της τομής, της ένωσης και του συμπληρώματος καθορίζουν πώς τα σύνολα αλληλεπιδρούν. Στο πλαίσιο των ασαφών συνόλων, οι ίδιες πράξεις γενικεύονται, ώστε να διαχειρίζονται βαθμούς συμμετοχής [13, 116]. Η επιλογή της κατάλληλης ασαφούς πράξης εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

3.3.1 Βασικές Σχέσεις: Κενό, Υποσύνολο, Ισότητα

Όπως στην κλασική θεωρία, ορίζουμε το κενό ασαφές σύνολο $\emptyset$ όταν η συνάρτηση συμμετοχής είναι μηδενική παντού:

$$A = \emptyset \iff \mu_A(x) = 0, \quad \forall x \in \Omega. \quad (3.7)$$

Συνάρτηση	Τύπος	Γραφική απεικόνιση
Τριγωνική	$\mu_A(x) = \max\left[\min\left\{\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right\}, 0\right]$	
Τραπεζοειδής	$\mu_A(x) = \max\left[\min\left\{\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right\}, 0\right]$	
Gaussian	$\mu_A(x) = e^{-\left(\frac{x-b}{\sigma}\right)^2}$	
Καμπανοειδής	$\mu_A(x) = \left(1 + \left \frac{x-c}{a}\right ^{2b}\right)^{-1}$	
Σιγμοειδής	$\mu_A(x) = \left(1 + e^{-a(x-c)}\right)^{-1}$	

Πίνακας 3.1: Παραδείγματα κοινών συναρτήσεων συμμετοχής (βάσει [11, 12]).

Δύο ασαφή σύνολα A και B θεωρούνται ίσα αν έχουν την ίδια συνάρτηση συμμετοχής:

$$A = B \iff \mu_A(x) = \mu_B(x), \quad \forall x \in \Omega. \quad (3.8)$$

Ο ορισμός του υποσυνόλου διαφοροποιείται από την κλασική περίπτωση ως εξής:

$$A \subseteq B \iff \mu_A(x) \leq \mu_B(x), \quad \forall x \in \Omega, \quad (3.9)$$

υποδηλώνοντας ότι ένα ασαφές σύνολο A είναι υποσύνολο ενός ασαφούς συνόλου B εάν η συνάρτηση συμμετοχής του είναι μικρότερη ή ίση αυτής του B , για κάθε αντικείμενο του συνόλου αναφοράς Ω . Αυτό συχνά επιτρέπει στο A και το B να έχουν το ίδιο πλήθος στοιχείων, αλλά με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής [14].

3.3.2 Ασαφές Συμπλήρωμα

Το συμπλήρωμα ενός ασαφούς συνόλου A ορίζεται από μια συνάρτηση $C : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, η οποία, για κάθε $x \in \Omega$, αντιστοιχίζει τον βαθμό συμμετοχής $\mu_A(x)$ στο βαθμό συμμετοχής του x στο συμπληρωματικό σύνολο $\bar{A}$ [12]. Οι συναρτήσεις αυτές οφείλουν να ικανοποιούν τα εξής αξιώματα:

- (C1) Οριακές συνθήκες — $C(0) = 1$ και $C(1) = 0$, δηλαδή ο ασαφής τελεστής C συμπεριφέρεται όπως το τυπικό συμπλήρωμα στις οριακές συνθήκες.
- (C2) Μονοτονία — $a < b \implies C(a) \geq C(b)$, $\forall a, b \in [0, 1]$, δηλαδή ο τελεστής C πρέπει να είναι μια φθίνουσα συνάρτηση.

Πέρα από τα παραπάνω, συνήθως λαμβάνονται υπόψη και άλλα 2 αξιώματα, τα οποία περιορίζουν την κλάση των συναρτήσεων που ικανοποιούν τα παραπάνω.

- (C3) Συνέχεια — Ο τελεστής C να είναι συνεχής.

- (C4) Ενέλιξη — $C(C(a)) = a$

Οι πιο διαδεδομένες συναρτήσεις συμπληρώματος φαίνονται στον Πίνακα 3.2, με κεντρικότερη:

$$C(x) = 1 - x. \quad (3.10)$$

Συνάρτηση	Τύπος
Πρότυπο	$C(x) = 1 - x$
Κατώφλι	$C(x) = \begin{cases} 1, & x \leq \tau \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}, \quad \tau \in [0, 1]$
Συνημιτονοειδές	$C(x) = \frac{1 + \cos(\pi x)}{2}$
Sugeno	$C(x) = \frac{1 - x}{1 + \lambda x}, \quad \lambda > -1$
Yagar	$C(x) = (1 - x^w)^{\frac{1}{w}}, \quad w > 0$

Πίνακας 3.2: Συναρτήσεις ασαφούς συμπληρώματος [13, 14].

3.3.3 Ασαφής Τομή (t-norm)

Η ασαφής τομή δύο ασαφών συνόλων A και B δίνεται από έναν δυαδικό τελεστή

$$T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1],$$

γνωστό και ως *triangular norm* (*t-norm*). Έχει καθιερωθεί πως οι συναρτήσεις, οι οποίες σχετίζονται με την πράξη της τομής, χρειάζεται να ικανοποιούν τα εξής αξιώματα, για $a, b, c, d \in [0, 1]$:

- (T1) Οριακές συνθήκες — $T(1, a) = a$
- (T2) Μονοτονία — $a \leq c \wedge b \leq d \implies T(a, b) \leq T(c, d)$
- (T3) Αντιμεταθετική ιδιότητα — $T(a, b) = T(b, a)$
- (T4) Προσεταιριστική ιδιότητα — $T(a, T(b, c)) = T(T(a, b), c)$

Η απλούστερη και πιο διαδεδομένη συνάρτηση τομής είναι:

$$T(a, b) = \min(a, b), \quad (3.11)$$

όμως υπάρχουν εναλλακτικές, όπως το αλγεβρικό γινόμενο ή η φραγμένη διαφορά (Πίνακας 3.3). Στις πρακτικές εφαρμογές του IoT, η επιλογή της συνάρτησης t-norm είναι καθοριστική για τη συνδυαστική αξιολόγηση πολλών μετρικών από διαφορετικούς αισθητήρες (π.χ. συνδυάζοντας “ήπια” κατώφλια πίεσης και θερμοκρασίας).

Συνάρτηση	Τύπος
Πρότυπο	$T(a, b) = \min(a, b)$
Δραστικό γινόμενο	$T(a, b) = \begin{cases} a, & b = 1 \\ b, & a = 1 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$
Αλγεβρικό γινόμενο	$T(a, b) = a \cdot b$
Φραγμένη διαφορά	$T(a, b) = \max(0, a + b - 1)$

Πίνακας 3.3: Παραδείγματα t-norm (ασαφούς τομής)

3.3.4 Ασαφής Ένωση (t-conorm)

Ανάλογα, η ασαφής ένωση ορίζεται από έναν *t-conorm* (*triangular conorm*),

$$S : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1],$$

που πληρεί αντίστοιχα αξιώματα (οριακές συνθήκες, μονοτονία, αντιμεταθετικότητα, προσεταιριστικότητα) [14]. Ο τυπικός ορισμός είναι:

$$S(a, b) = \max(a, b), \quad (3.12)$$

αλλά και εδώ υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές (Πίνακας 3.4). Συστήματα ελέγχου ή συστήματα υποστήριξης απόφασης συχνά χρησιμοποιούν ελαστικότερες t-conorm για να συνδυάσουν πολλαπλά κριτήρια με διαφορετικούς βαθμούς ικανοποίησης [13, 116]. Για παράδειγμα, το αλγεβρικό άθροισμα επιτρέπει πιο ομαλή συνάνθροιση των επιμέρους βαθμών συμμετοχής.

Συνάρτηση	Τύπος
Πρότυπο	$S(a, b) = \max(a, b)$
Δραστικό άθροισμα	$S(a, b) = \begin{cases} a, & b = 0 \\ b, & a = 0 \\ 1, & \text{αλλιώς} \end{cases}$
Αλγεβρικό άθροισμα	$S(a, b) = a + b - ab$
Φραγμένο άθροισμα	$S(a, b) = \min(1, a + b)$

Πίνακας 3.4: Βασικοί τελεστές ασαφούς ένωσης (t-conorm)

3.3.5 Ασαφής Συνεπαγωγή

Η ασαφής συνεπαγωγή δίνεται από έναν δυαδικό τελεστή

$$J : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1],$$

γνωστό και ως *ασαφή συνεπαγωγή* (fuzzy implication). Έχει καθιερωθεί πως οι συναρτήσεις, οι οποίες σχετίζονται με την πράξη της συνεπαγωγής, χρειάζεται να ικανοποιούν τα εξής αξιώματα, για $a, b, c, d \in [0, 1]$:

- (I1) Οριακές συνθήκες — $J(0, a) = 1$ και $J(1, a) = a$
- (I2) Μονοτονία στο δεύτερο όρισμα — $b \leq d \implies J(a, b) \leq J(a, d)$
- (I3) Αντιμονοτονία στο πρώτο όρισμα — $a \leq c \implies J(c, b) \leq J(a, b)$

Η απλούστερη και πιο διαδεδομένη συνάρτηση συνεπαγωγής είναι:

$$J(a, b) = \max(1 - a, b), \quad (3.13)$$

όμως υπάρχουν εναλλακτικές, όπως η συνεπαγωγή *Lukasiewicz* ή η συνεπαγωγή *Mamdani* (Πίνακας 3.5) [13, 116, 12].

Συνάρτηση	Τύπος
Zadeh	$a \rightarrow b = \max(1 - a, \min(a, b))$
Lukasiewicz	$a \rightarrow b = \min(1, 1 - a + b)$
Mamdani	$a \rightarrow b = \min(a, b)$
Larsen	$a \rightarrow b = a b$
Standard Strict	$a \rightarrow b = \begin{cases} 1, & a \leq b \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$
Gödel	$a \rightarrow b = \begin{cases} 1, & a \leq b \\ b, & \text{αλλιώς} \end{cases}$
Goguen	$a \rightarrow b = \begin{cases} 1, & a \leq b \\ \frac{b}{a}, & \text{αλλιώς} \end{cases}$
Yager	$a \rightarrow b = \begin{cases} 1, & a = b = 0 \\ b^a, & \text{αλλιώς} \end{cases}$
Kleene-Dienes	$a \rightarrow b = \max(1 - a, b)$
Reichenbach	$a \rightarrow b = 1 - a + ab$

Πίνακας 3.5: Ενδεικτικοί τελεστές ασαφούς συνεπαγωγής [11, 12]

Συμπερασματικά, οι ασαφείς πράξεις και οι τελεστές συνεπαγωγής παρέχουν τη θεωρητική βάση για την επεξεργασία βαθμών συμμετοχής σε σύνθετα προβλήματα συλλογιστικής, ελέγχου και λήψης αποφάσεων. Στα επόμενα κεφάλαια, θα εξετάσουμε πώς οι διάφορες επιλογές (π.χ. τύπος συμπληρώματος, μορφή t-norm, είδος συνεπαγωγής) επηρεάζουν συγκεκριμένες εφαρμογές, από ασαφή ερωτήματα αναζήτησης σε περιβάλλοντα IoT έως ασαφή συστήματα ελέγχου σε βιοϊατρικές εφαρμογές.

3.3.6 Συνδυασμοί Ασαφών Πράξεων

Στην θεωρία συνόλων, οι πράξεις της τομής και της ένωσης είναι δυικές ως προς την πράξη του συμπληρώματος. Αυτή η σχέση εκφράζεται με τους νόμους De Morgan, οι οποίοι δηλώνουν ότι το συμπλήρωμα της τομής δύο συνόλων είναι ίσο με την ένωση των συμπληρωμάτων τους, και αντίστροφα:

$$\begin{aligned} \overline{A \cap B} &= \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} &= \overline{A} \cap \overline{B} \end{aligned} \tag{3.14}$$

Προφανώς, μόνο ορισμένοι συνδυασμοί των αντίστοιχων πράξεων στην ασαφή συνολοθεωρία ικανοποιούν την δεικνόμενη αυτή.

Ορισμός 3.4. *Μια t -norm και μια t -conorm είναι δεικές ως προς το ασαφές συμπλήρωμα C αν και μόνο εάν:*

$$\begin{aligned} C(T(a, b)) &= S(C(a), C(b)) \\ C(S(a, b)) &= T(C(a), C(b)) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Στον Πίνακα 3.6, δίνονται τριάδες ασαφών πράξεων, στις οποίες η τομή και η ένωση είναι δεικές ως προς το συμπλήρωμα. Οι συνδυασμοί αυτοί χρησιμοποιούνται για να διατηρούν την ιδιότητα της δεικνόμενης σε ασαφή συστήματα.

Τομή	Ένωση	Συμπλήρωμα
$\min(a, b)$	$\max(a, b)$	$1 - x$
ab	$a + b - ab$	$1 - x$
$\max(0, a + b - 1)$	$\min(1, a + b)$	$1 - x$
$\begin{cases} a & b = 1 \\ b & a = 1 \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$	$\begin{cases} a & b = 0 \\ b & a = 0 \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases}$	$1 - x$

Πίνακας 3.6: Συνδυασμοί ασαφών πράξεων που διατηρούν τη δεικνόμενη

Η θεωρία ασαφών συνόλων και λογική, όπως παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο, παρέχουν το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για εφαρμογές που απαιτούν σταδιακούς βαθμούς συμμετοχής και αντιμετώπιση αβεβαιότητας. Οι ορισμοί των ασαφών συνόλων, οι συναρτήσεις συμμετοχής και οι τελεστές (συμπλήρωμα, τομή, ένωση, συνεπαγωγή) επιτρέπουν την αποτελεσματική μοντελοποίηση περίπλοκων συνθηκών, τη συνένωση πληροφοριών από πολλαπλούς αισθητήρες και την εκτέλεση κανόνων μερικής αλήθειας. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε πώς αυτές οι αρχές μπορούν να επεκταθούν στη διαμόρφωση εξειδικευμένων *fuzzy metrics* με προσαρμοσμένες συναρτήσεις συμμετοχής, διευκολύνοντας ασαφή αναζήτηση σε δεδομένα IoT, ιδίως σε βιοϊατρικές εφαρμογές όπου η αβεβαιότητα είναι συχνή.

Κεφάλαιο 4

Ασαφείς μετρικές ομοιότητας για δεδομένα αισθητήρων

4.1 Προκλήσεις

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 1, ένας συνεχώς αυξανόμενος αριθμός αισθητήρων ενσωματώνεται στο περιβάλλον του ανθρώπου, συνδέοντας αυτό με το διαδίκτυο. Ανάλογα με το Διαδίκτυο της Πληροφορίας, και στο IoT η αναζήτηση αποτελεί μια κομβική λειτουργία, παρέχοντας στους χρήστες τη δυνατότητα εύρεσης αισθητήρων με συγκεκριμένες ιδιότητες. Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις [118] στηρίζονται κυρίως στην αναζήτηση με βάση κειμενικά μεταδεδομένα, τα οποία χαρακτηρίζουν κάθε μεμονωμένο αισθητήρα (όπως το είδος του, η τοποθεσία εγκατάστασης, η μονάδα μέτρησης, κ.λπ.). Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει προβλήματα στην πρακτική εφαρμογή, καθώς συχνά τα μεταδεδομένα των αισθητήρων είναι ελλιπή ή λανθασμένα και απουσιάζει κοινή ορολογία.

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους, μια εναλλακτική προσέγγιση αναζήτησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων βασίζεται στην ασαφή λογική [119]. Οι κύριοι λόγοι που οδήγησαν στην υιοθέτηση της ασαφούς λογικής στην αναζήτηση στο IoT είναι:

- Η ασαφής λογική αντιμετωπίζει την θορυβώδη και αβέβαιη φύση των δεδομένων των αισθητήρων, οπότε μπορεί να λύσει πιο αξιόπιστα το πρόβλημα της σύγκρισης της ομοιότητας 2 αισθητήρων.
- Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανάλυσης και σύγκρισης δεδομένων είναι απαιτητικές σε υπολογιστικούς και επικοινωνιακούς πόρους σε αντίθεση με τις μεθόδους της ασαφούς λογικής. Οι πόροι αυτοί, όπως έχουμε αναφέρει στο Κεφάλαιο 1, είναι

περιορισμένοι στους κατανεμημένους κόμβους και αισθητήρες που αποτελούν το IoT.

4.2 Σχεδιαστικές απαιτήσεις

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω προκλήσεις, το βασικό κριτήριο αξιολόγησης ενός συστήματος αναζήτησης στο IoT είναι η δυνατότητα του να διαχειριστεί μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Αυτός ο αριθμός είναι συχνά άγνωστος κατά τη φάση σχεδιασμού του συστήματος και μπορεί να κυμαίνεται σε πολλαπλές τάξεις μεγέθους. Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση του συνολικού συστήματος αναζήτησης εξαρτάται άμεσα από την υπολογιστική πολυπλοκότητα της βασικής επιχείρησης, δηλαδή της σύγκρισης δύο αισθητήρων. Ειδικότερα, το κόστος επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων και της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας πρέπει να ελαχιστοποιείται, καθώς οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από σημαντικούς περιορισμούς στους ενεργειακούς και υπολογιστικούς πόρους. Ο υπολογισμός και η αποθήκευση μιας σύνοψης των δεδομένων που έχει συλλέξει ο αισθητήρας μειώνει σημαντικά τους πόρους που απαιτούνται για τη μεταφορά τους. Παράλληλα, επιταχύνει τον διαμοιρασμό και τη καταχώρησή τους σε βάσεις δεδομένων. Οι συμβατικές μέθοδοι σύγκρισης ροών δεδομένων δεν είναι ενδεδειγμένες για χρήση σε κατανεμημένα περιβάλλοντα αισθητήρων, καθώς η ενεργειακή κατανάλωση αυτών των αλγορίθμων υπερβαίνει κατά πολύ τις διαθέσιμες δυνατότητες των αισθητήρων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Τέλος, η σύγκριση δύο αισθητήρων οφείλει να είναι ανθεκτική (ροβούστ), ώστε να είναι ικανή να αναγνωρίζει παρόμοια μοτίβα και τάσεις στις χρονοσειρές δεδομένων τους, ακόμη και όταν υπάρχουν διαφορές στις απόλυτες τιμές των μετρήσεων.

4.3 Συναφείς εργασίες

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί το σύστημα ασαφούς αναζήτησης [119][120], το οποίο αποτέλεσε την βάση και έμπνευση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

4.3.1 Βασικές αρχές ασαφούς αναζήτησης

Μια βασική λειτουργία της προσέγγισης είναι η κατασκευή ενός ασαφούς συνόλου από μια ροή δεδομένων. Έστω S ένας οποιοσδήποτε αισθητήρας, U_S το σύνολο των μετρήσεων του, $S(t_i), i = 0..|U_S|$ οι επιμέρους μετρήσεις του αισθητήρα S και F_S το κατασκευαζόμενο ασαφές σύνολο. Στόχος είναι να καθορισθεί μία συνάρτηση

συμμετοχής $\mu_S(x) : U_S \rightarrow [0, 1]$ που να αναπαριστά επαρκώς τη χρονοσειρά δεδομένων που παρήγαγε ο αισθητήρας.

Ο στόχος είναι να αποκτήσουμε μια προσέγγιση της κατανομής των τιμών του αισθητήρα. Αυτή η προσέγγιση θα προκύψει από τον υπολογισμό της πυκνότητας των τιμών του αισθητήρα γύρω από κάθε τιμή. Έστω $x_{\min}^S$ και $x_{\max}^S$ η μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή των μετρήσεων του αισθητήρα S , αντίστοιχα. Δεδομένου ενός διαστήματος $\Delta x = [x - r, x + r] \subset [x_{\min}^S, x_{\max}^S]$ για $r > 0$, η πυκνότητα του πληθυσμού των μετρήσεων του αισθητήρα είναι ανάλογη με το πόσες μετρήσεις $x \in U_S$ ανήκουν στο Δx σε ένα χρονικό διάστημα Δt , όταν $r \rightarrow 0$ και το διάστημα Δx σαρώνει ολόκληρο το πεδίο τιμών $[x_{\min}^S, x_{\max}^S]$. Συγκεκριμένα, ορίζουμε ως πυκνότητα γειτονιάς του x :

$$ndg^S(x) = \sum_{i=1}^{|U_S|} e^{-\left[\frac{2d_E(x, S(t_i))}{r}\right]^2} \quad (4.1)$$

, όπου d_E η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ 2 τιμών. Εντέλει, η συνάρτηση συμμετοχής $\mu_S(x)$ ισούται με την $ndg^S(x)$ κανονικοποιημένη στο διάστημα $(0,1)$ και το τελικό ασαφές σύνολο είναι $F_S = \{(x, \mu_S(x)) | x \in U_S\}$.

Στη συνέχεια, με βάση τις κατασκευασμένες συναρτήσεις συμμετοχής, θέλουμε να υπολογίσουμε μια μετρική ομοιότητας των αισθητήρων βασισμένο στις τιμές των δεδομένων που παράγουν. Έστω, λοιπόν, 2 αισθητήρες τοποθετημένοι σε 2 διαφορετικές τοποθεσίες, A και B . Για κάθε αισθητήρα, έχουμε υπολογίσει το ασαφές σύνολο από τις μετρήσεις του, δηλαδή έχουμε τα $F_A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in \mathbb{R}\}$ και $F_B = \{(x, \mu_B(x)) | x \in \mathbb{R}\}$. Έστω ότι έχουμε έναν τρίτο αισθητήρα S και θέλουμε να υπολογίσουμε μια μετρική ομοιότητας μεταξύ του S και των A και B . Εάν πάρουμε δειγματοληπτικά μια μέτρηση $x \in U_S$, οι συναρτήσεις συμμετοχής των F_A και F_B θα μας δώσουν τον βαθμό συμμετοχής του x στα 2 ασαφή σύνολα. Με βάση τα παραπάνω ορίζουμε ως μετρική ομοιότητας του αισθητήρα S σε σχέση με τον αισθητήρα V ως εξής:

$$\Phi_S(V) = \frac{1}{\delta(S, V)} \frac{1}{|U_S|} \sum_{x \in U_S} \mu_V(x) \quad (4.2)$$

όπου $\delta(S, V)$ ονομάζουμε την διαφορά των ευρών των αισθητήρων S και V . Υπολογίζεται ως εξής:

$$\delta(S, V) = |q_1^S - q_1^V| + |q_3^S - q_3^V| \quad (4.3)$$

όπου $q_1^S, q_3^S \in U_S$ και $q_1^V, q_3^V \in U_V$ είναι τα πρώτα και τρίτα τεταρτημόρια της κατανομής των τιμών των αισθητήρων S και V . Τα τεταρτημόρια ενός συνόλου ταξινομημένων τιμών είναι τα 3 σημεία που χωρίζουν το σύνολο σε 4 ίσα σύνολα, καθένα εκ των οποίων αντιπροσωπεύει το 25% του πληθυσμού των τιμών. Η χρήση της διαφοράς

των ευρών των αισθητήρων γίνεται για 2 λόγους: (1) για να αποκλείσει αισθητήρες διαφορετικού τύπου ή αισθητήρες ενσωματωμένους σε εντελώς διαφορετικό περιβάλλον ή αντικείμενο· και (2) για να ενισχύσει την ομοιότητα μεταξύ αισθητήρων οι οποίοι παράγουν μετρήσεις σε παρόμοια εύρη.

Ωστόσο, η παραπάνω τεχνική παρουσιάζει μια σημαντική έλλειψη: αμελεί πλήρως την χρονική σχέση μεταξύ των μετρήσεων και κάνει την παραδοχή πως δεν έχει σημασία η αλληλουχία των τιμών στην περιγραφή της κατάστασης του περιβάλλοντος ή του αντικειμένου. Αυτό, προφανώς, δεν ισχύει, καθώς απότομες και ήπιες αλλαγές των τιμών του αισθητήρα σηματοδοτούν διαφορετικές καταστάσεις. Η χρονική μεταβολή των μετρήσεων αποτυπώνεται από την διακριτή χρονική παράγωγο των τιμών, η οποία ορίζεται στο χρονικό σημείο t_i ως:

$$S'(t_i) = \frac{S(t_{i+1}) - S(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (4.4)$$

Στη συνέχεια, ορίζουμε το σύνολο των διακριτών παραγώγων του S ως $U_{S'} = \{x' = S'(t_i) | i = 1..|U_S| - 1\}$. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω και την εξίσωση 4.1, το ασαφές σύνολο των διακριτών παραγώγων του S ορίζεται ως $F_{S'} = \{(x', \mu_{S'}(x')) | x' \in U_{S'}\}$. Λαμβάνοντας υπόψη και τις χρονικές παραγώγους, η μετρική ομοιότητας μεταξύ 2 αισθητήρων S και V πλέον ορίζεται ως εξής:

$$\Phi_S(V) = \frac{1}{\delta(S, V)} \frac{1}{|U_S|} \sum_{i=1}^{|U_S|} \mu_V(S(t_i)) \times \mu_{V'}(S'(t_i)) \quad (4.5)$$

4.3.2 Μετρικές ομοιότητας ασαφών συνόλων

4.4 Μεθοδολογία

Όπως δείξαμε παραπάνω, η χρήση της ασαφούς λογικής λύνει πολλά από τα ζητούμενα της αναζήτησης στο IoT. Εντούτοις, ο συνδυασμός αυτός δεν έχει μελετηθεί εκτενώς και υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης των εφαρμογών. Η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας αφορά επεκτάσεις στο σύστημα που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.3, και συγκεκριμένα στην κατασκευή του ασαφούς συνόλου και στις μετρικές ομοιότητας.

4.4.1 Δημιουργία Ασαφούς Συνόλου

Η διαδικασία κατασκευής ενός ασαφούς συνόλου, όπως περιγράφεται από την εξίσωση 4.1, είναι μια προσέγγιση της πυκνότητας ενός σήματος. Παρόλα τα πλεονε-

κτήματα της προσέγγισης αυτής, το υπολογιστικό κόστος είναι μεγάλο, ειδικά όταν $r \rightarrow 0$ και το εύρος του σήματος είναι μεγάλο. Για αυτόν τον λόγο, ως προσέγγιση της πυκνότητας ενός σήματος χρησιμοποιήθηκε το ιστόγραμμα των τιμών του, είτε στην απόλυτη μορφή του ως καταμέτρηση των τιμών, είτε κανονικοποιημένο ως πυκνότητα πιθανότητας.

4.4.2 Μετρικές Ομοιότητας

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο του Κεφαλαίου 3 και την παραπάνω παρουσίαση της χρήσης της ασαφούς λογικής στο πρόβλημα της αναζήτησης αισθητήρων στο IoT, η σύγκριση 2 ασαφών συνόλων που αποτυπώνουν ροές δεδομένων μπορεί να γίνει με πολλαπλούς τρόπους. Συγκεκριμένα, η βιβλιογραφία καταγράφει πληθώρα μετρικών ομοιότητας 2 ασαφών συνόλων, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε παρόμοιες εφαρμογές.

Οι κυριότερες μετρικές που εξετάζονται στην παρούσα εργασία κατηγοριοποιούνται ως εξής:

Συνολοθεωρητικές Μετρικές

Οι συνολοθεωρητικές μετρικές βασίζονται στις κλασικές πράξεις συνόλων επεκταμένες για ασαφή σύνολα. Για δύο ασαφή σύνολα A και B με συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_A(x)$ και $\mu_B(x)$:

- **Δείκτης Jaccard (Συντελεστής Tanimoto):**

$$J(A, B) = \frac{\sum_i \min(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i))}{\sum_i \max(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i))}$$

Μετρά τον λόγο της ασαφούς τομής προς την ασαφή ένωση των συνόλων.

- **Συντελεστής Dice (Sørensen-Dice):**

$$D(A, B) = \frac{2 \sum_i \min(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i))}{\sum_i \mu_A(x_i) + \sum_i \mu_B(x_i)}$$

Δίνει διπλή βαρύτητα στην τομή σε σχέση με το άθροισμα των πληθικотήτων.

- **Συντελεστής Επικάλυψης (Szymkiewicz-Simpson):**

$$O(A, B) = \frac{\sum_i \min(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i))}{\min(\sum_i \mu_A(x_i), \sum_i \mu_B(x_i))}$$

Κανονικοποιεί την τομή με την πληθικотήτα του μικρότερου συνόλου.

Μετρικές Απόστασης

Οι μετρικές απόστασης υπολογίζουν την διαφορά μεταξύ των συναρτήσεων συμμετοχής και μετατρέπονται σε ομοιότητες:

- **Ευκλείδεια Απόσταση:**

$$d_{Eucl}(A, B) = \sqrt{\sum_i (\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i))^2}$$

$$S_{Eucl}(A, B) = \frac{1}{1 + d_{Eucl}(A, B)}$$

- **Απόσταση Hamming:**

$$d_{Ham}(A, B) = \sum_i |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|$$

$$S_{Ham}(A, B) = 1 - \frac{d_{Ham}(A, B)}{n}$$

όπου n ο αριθμός των στοιχείων.

- **Απόσταση Chebyshev:**

$$d_{Cheb}(A, B) = \max_i |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|$$

$$S_{Cheb}(A, B) = 1 - d_{Cheb}(A, B)$$

Χρησιμοποιεί τη μέγιστη διαφορά σε οποιοδήποτε σημείο.

Μετρικές Συσχέτισης

Οι μετρικές συσχέτισης αξιολογούν την γραμμική και γεωμετρική σχέση των συναρτήσεων συμμετοχής:

- **Ομοιότητα Cosine:**

$$C(A, B) = \frac{\sum_i \mu_A(x_i) \cdot \mu_B(x_i)}{\|\mu_A\| \cdot \|\mu_B\|}$$

όπου $\|\mu_A\| = \sqrt{\sum_i \mu_A(x_i)^2}$ η ευκλείδεια νόρμα.

- **Συντελεστής Pearson:**

$$\rho(A, B) = \frac{\sum_i (\mu_A(x_i) - \bar{\mu}_A)(\mu_B(x_i) - \bar{\mu}_B)}{\sqrt{\sum_i (\mu_A(x_i) - \bar{\mu}_A)^2} \sqrt{\sum_i (\mu_B(x_i) - \bar{\mu}_B)^2}}$$

όπου $\bar{\mu}_A$ και $\bar{\mu}_B$ οι μέσες τιμές των συναρτήσεων συμμετοχής.

- **Διασταυρούμενη Συσχέτιση (Cross-Correlation):**

$$CC(A, B) = \max_{\tau} \sum_i \mu_A(x_i) \cdot \mu_B(x_{i+\tau})$$

Βρίσκει τη βέλτιστη χρονική μετατόπιση για μέγιστη συσχέτιση.

Πληροφοριοθεωρητικές Μετρικές

Οι πληροφοριοθεωρητικές μετρικές αντιμετωπίζουν τις συναρτήσεις συμμετοχής ως κανονικοποιημένες κατανομές πιθανοτήτων:

- **Απόκλιση Jensen-Shannon:**

$$JS(P||Q) = \frac{1}{2}D_{KL}(P||M) + \frac{1}{2}D_{KL}(Q||M)$$

όπου $M = \frac{P+Q}{2}$ και $D_{KL}(P||Q) = \sum_i P(x_i) \log \frac{P(x_i)}{Q(x_i)}$.

$$S_{JS}(A, B) = 1 - \sqrt{JS(P_A||P_B)}$$

- **Συντελεστής Bhattacharyya:**

$$BC(P, Q) = \sum_i \sqrt{P(x_i) \cdot Q(x_i)}$$

Μετρά την επικάλυψη δύο κανονικοποιημένων κατανομών.

- **Απόσταση Hellinger:**

$$d_{Hell}(P, Q) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_i (\sqrt{P(x_i)} - \sqrt{Q(x_i)})^2}$$

$$S_{Hell}(A, B) = 1 - d_{Hell}(P_A, P_B)$$

Προηγμένες Μετρικές

Πιο σύνθετες μετρικές που λαμβάνουν υπόψη την δομική και στατιστική φύση των κατανομών:

- **Απόσταση Μεταφοράς Μάζας (Earth Mover's Distance):** Προσεγγίζεται ως απόσταση $L1$ μεταξύ αθροιστικών κατανομών:

$$EMD(A, B) \approx \sum_i |CDF_A(x_i) - CDF_B(x_i)|$$

$$S_{EMD}(A, B) = \frac{1}{1 + EMD(A, B)}$$

- **Ενεργειακή Απόσταση (Energy Distance):** Βασίζεται στη στατιστική ενέργεια μεταξύ κατανομών:

$$E(A, B) = 2E[\|X - Y\|] - E[\|X - X'\|] - E[\|Y - Y'\|]$$

όπου $X, X' \sim A$ και $Y, Y' \sim B$ είναι ανεξάρτητα.

- **Αρμονικός Μέσος Όρος:**

$$H(A, B) = \frac{2}{\frac{1}{\sum_i \mu_A(x_i)} + \frac{1}{\sum_i \mu_B(x_i)}} \cdot \frac{\sum_i \min(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i))}{\sum_i \max(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i))}$$

Συνδυάζει αρμονικό μέσο των πληθικιοτήτων με δείκτη Θαυσαρδ.

4.5 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η εφαρμογή της ασαφούς λογικής στην αντιμετώπιση του προβλήματος της αναζήτησης αισθητήρων στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Η προσέγγιση αυτή αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις προκλήσεις που θέτει η θορυβώδης και αβέβαιη φύση των δεδομένων αισθητήρων, καθώς και οι περιορισμένοι υπολογιστικοί πόροι των κατανομημένων συστημάτων IoT.

Η βασική συνεισφορά του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση του αλγορίθμου Normalized Density Gaussian (NDG) για την κατασκευή ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής από ροές δεδομένων, ο οποίος προσφέρει υπολογιστική αποδοτικότητα διατηρώντας παράλληλα την ακρίβεια της αναπαράστασης. Επιπλέον, αναλύθηκαν διάφορες μετρικές ομοιότητας ασαφών συνόλων, από τις κλασικές συνολοθεωρητικές μέχρι τις πιο σύνθετες πληροφοριοθεωρητικές, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη σύγκριση αισθητήρων.

Η προσέγγιση αυτή αποτέλεσε την έμπνευση και τη θεωρητική βάση για την ανάπτυξη πιο εξειδικευμένων τεχνικών που εφαρμόζονται στην αναγνώριση ανθρώπινων δραστηριοτήτων από δεδομένα υγείας, όπως θα αναλυθεί λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Η μετάβαση από τη γενική αναζήτηση αισθητήρων στο IoT στην εξειδικευμένη ανάλυση δεδομένων υγείας αποδεικνύει τη ευελιξία και την ευρύτερη εφαρμοσιμότητα των ασφών μεθόδων στην επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων.

Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογία

5.1 Εισαγωγή στη Μεθοδολογία

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τον πειραματικό σχεδιασμό για τη διερεύνηση τριών ερευνητικών ερωτημάτων σχετικά με την εφαρμογή ασαφούς λογικής (fuzzy logic) στην ανάλυση δεδομένων αισθητήρων. Η μεθοδολογία βασίζεται σε ελεγχόμενα πειράματα, στατιστική επικύρωση και συγκριτική ανάλυση, εξασφαλίζοντας αναπαραγωγιμότητα μέσω αυστηρών πρωτοκόλλων.

Η προσέγγιση ακολουθεί πέντε διαδοχικά βήματα: (1) προεπεξεργασία σημάτων αισθητήρων, (2) παραθυροποίηση με επικάλυψη, (3) παραγωγή ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής μέσω NDG-S, (4) υπολογισμός μετρικών ομοιότητας, (5) ανάκτηση (retrieval) δραστηριοτήτων βάσει κατάταξης ομοιότητας.

Τα τρία ερευνητικά ερωτήματα διερευνούν: το EE1 τη σύγκριση NDG-S έναντι KDE ως προς υπολογιστική αποδοτικότητα και ακρίβεια, το EE2 την αποτελεσματικότητα ανάκτησης δραστηριοτήτων με ασαφείς μετρικές ομοιότητας, και το EE3 τη γενικευσιμότητα μεταξύ ετερογενών συνόλων δεδομένων.

5.1.1 Χάρτης Μεθοδολογίας

Για τη διευκόλυνση του αναγνώστη, παρουσιάζεται η συνολική ροή της μεθοδολογίας και η αντιστοίχιση των ερευνητικών ερωτημάτων με τις αντίστοιχες ενότητες και μετρικές αξιολόγησης.

Διάγραμμα Μεθοδολογικής Ροής: Η προτεινόμενη μεθοδολογία ακολουθεί την εξής αλληλουχία επεξεργασίας:

1. **Σήματα Αισθητήρων** → Προεπεξεργασία και κανονικοποίηση

2. **Παραθυροποίηση** → Τμηματοποίηση με επικάλυψη σε παράθυρα 4 δευτερολέπτων
3. **Ασαφείς Συναρτήσεις** → Παραγωγή συναρτήσεων συμμετοχής μέσω NDG-S ανά αισθητήρα
4. **Μετρικές Ομοιότητας** → Υπολογισμός 16 ασαφών μετρικών ομοιότητας
5. **Ανάκτηση Δραστηριοτήτων** → Κατάταξη βάσει ομοιότητας και αξιολόγηση απόδοσης

Ερώτημα	Ενότητες	Κύριες Μετρικές	Σύνολα Δεδομένων
EE1 (NDG-S vs KDE)	§5.7, §5.10	Χρόνος εκτέλεσης, Μνήμη Ακρίβεια εκτίμησης	Opportunity, PAMAP2
EE2 (Ανάκτηση)	§5.8, §5.10	Hit@1/3/5, MRR NDCG@5, mAP	Opportunity, PAMAP2 (ανά τύπο ετικέτας)
EE3 (Γενικευσιμότητα)	§5.9, §5.10	Συσχέτιση Σπειαρμαν Σταθερότητα κατάταξης	Cross-dataset (Opportunity↔PAMAP2)

Πίνακας 5.1: Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων με μεθοδολογικές ενότητες και μετρικές αξιολόγησης

Αντιστοίχιση Ερευνητικών Ερωτημάτων: Το κεφάλαιο δομείται προοδευτικά από τη θεωρητική βάση (§5.4-5.5) στην πειραματική εφαρμογή (§5.7-5.9) και την τεχνική υλοποίηση (§5.10), εξασφαλίζοντας σαφή πορεία από τη θεωρία στην πράξη.

5.2 Ερευνητικός Σχεδιασμός και Προσέγγιση

Η έρευνα υιοθετεί ποσοτική και υπολογιστική στρατηγική για τη διερεύνηση ασαφών μετρικών ομοιότητας στην αναγνώριση δραστηριοτήτων. Βασίζεται σε ελεγχόμενα πειράματα με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και στατιστική επικύρωση, εξασφαλίζοντας αξιοπιστία και επαναληψιμότητα.

Ο σχεδιασμός εμπειρικά επαληθεύει τις προτεινόμενες μεθόδους σε δύο καθιερωμένα σύνολα δεδομένων (Opportunity και PAMAP2), επιτρέποντας έλεγχο γενικευσιμότητας σε διαφορετικές συνθήκες δειγματοληψίας, τύπους αισθητήρων και κατηγορίες δραστηριοτήτων.

Η εφαρμογή ασαφούς λογικής στην αναγνώριση ανθρώπινων δραστηριοτήτων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών προσεγγίσεων, ιδιαίτερα στη διαχείριση της εγγενούς αβεβαιότητας και μεταβλητότητας των δεδομένων αισθητήρων.

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες δεν εκτελούνται με απόλυτη ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Αντιθέτως, παρουσιάζουν φυσικές διακυμάνσεις στην ταχύτητα, την ένταση και τον τρόπο εκτέλεσης μεταξύ διαφορετικών ατόμων ή ακόμα και του ίδιου ατόμου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η ασαφής λογική επιτρέπει τη μοντελοποίηση αυτής της στοχαστικότητας μέσω συναρτήσεων συμμετοχής. Αυτές οι συναρτήσεις αποδίδουν βαθμούς συμμετοχής αντί για δυαδικές κατηγοριοποιήσεις.

Επιπλέον, τα δεδομένα αισθητήρων χαρακτηρίζονται από θόρυβο, παρεμβολές και περιστασιακές αστοχίες αισθητήρων που καθιστούν προβληματική την εφαρμογή αυστηρών κατωφλίων και ντετερμινιστικών κανόνων. Οι ασαφείς μετρικές ομοιότητας προσφέρουν ανθεκτικότητα σε τέτοιες διαταραχές, καθώς η σύγκριση γίνεται σε επίπεδο κατανομών πιθανότητας και όχι σημειακών τιμών.

Η προτεινόμενη μέθοδος σύγκρισης ανά αισθητήρα ενισχύει περαιτέρω αυτή την ανθεκτικότητα, διατηρώντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε αισθητήρα και αποφεύγοντας την απώλεια πληροφορίας που συμβαίνει κατά τη συγχώνευση δεδομένων σε ενιαίες αναπαραστάσεις.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία διαφοροποιείται ουσιαστικά από τις κλασικές προσεγγίσεις μηχανικής μάθησης που κυριαρχούν στον τομέα της αναγνώρισης δραστηριοτήτων. Οι παραδοσιακοί ταξινομητές όπως τα Support Vector Machines (SVM), τα Random Forests και τα νευρωνικά δίκτυα απαιτούν εκτεταμένη εξαγωγή χαρακτηριστικών (feature engineering) και βασίζονται σε διακριτές κατηγοριοποιήσεις που δεν αποτυπώνουν τη συνεχή φύση των μεταβάσεων μεταξύ δραστηριοτήτων. Αντίθετα, η προσέγγιση με ασαφείς μετρικές ομοιότητας λειτουργεί απευθείας στο χώρο των κατανομών, επιτρέποντας πιο ευέλικτες και ερμηνεύσιμες συγκρίσεις.

Οι πιθανοτικές μέθοδοι, όπως τα Hidden Markov Models (HMM) και τα Conditional Random Fields (CRF), ενώ μοντελοποιούν την αβεβαιότητα, απαιτούν ισχυρές υποθέσεις για τις κατανομές των δεδομένων και τις μεταβάσεις καταστάσεων που συχνά δεν ισχύουν στην πράξη. Η προτεινόμενη προσέγγιση με NDG-S και ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής δεν απαιτεί τέτοιες a priori υποθέσεις, προσαρμόζεται δυναμικά στα χαρακτηριστικά των δεδομένων και προσφέρει υπολογιστική αποδοτικότητα κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

5.2.1 Κεντρική Μεθοδολογική Επιλογή: Ανάκτηση (Retrieval) βάσει Ομοιότητας

Μια καθοριστική απόφαση σχεδιασμού είναι η υιοθέτηση προσέγγισης ανάκτησης (retrieval-based evaluation) αντί για παραδοσιακή ταξινόμηση. Αυτή η επιλογή βασίζεται σε τρεις βασικούς λόγους:

Άμεση Αξιολόγηση Μετρικών: Η ανάκτηση επιτρέπει την άμεση σύγκριση των μετρικών ομοιότητας χωρίς την παρεμβολή παραμέτρων ταξινομητή που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Κάθε παραθύρο δραστηριότητας λειτουργεί εναλλακτικά ως ερώτημα (query) ή ως μέλος της βιβλιοθήκης (library), προσομοιώνοντας ρεαλιστικά σενάρια χρήσης.

Πλούσια Πληροφορία Κατάταξης: Η πλήρης κατάταξη παρέχει πολύ περισσότερη πληροφορία από μια απλή πρόβλεψη κλάσης. Επιτρέπει την ανάλυση όχι μόνο της καλύτερης αντιστοίχισης αλλά και του συνολικού προφίλ ομοιότητας κάθε μετρικής.

Ενοποιημένη Παραθυροποίηση: Η χρήση ενιαίων παραθύρων σταθερού μεγέθους για όλους τους τύπους ετικετών επιτρέπει τον εκ των προτέρων υπολογισμό των ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής. Αυτό το τέχνασμα (βλ. §;) μειώνει δραστικά τον υπολογιστικό χρόνο πειραμάτων πολλαπλών ετικετών.

Η σχεδίαση του πειραματικού πλαισίου στοχεύει στην αποτίμηση τόσο της υπολογιστικής αποδοτικότητας όσο και της ακρίβειας αναγνώρισης της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνικές.

5.3 Σύνολα Δεδομένων

Η παρούσα έρευνα βασίζεται σε δύο καθιερωμένα και δημοσίως διαθέσιμα σύνολα δεδομένων αναγνώρισης ανθρώπινων δραστηριοτήτων, τα Opportunity Activity Recognition Dataset [121, 122] και PAMAP2 Physical Activity Monitoring Dataset [123, 124]. Η επιλογή αυτών των συνόλων δεδομένων βασίστηκε στην ευρεία αποδοχή τους από την ερευνητική κοινότητα, την πολυπλοκότητα των καταγεγραμμένων δραστηριοτήτων και τη διαθεσιμότητα πλήρων αισθητηριακών δεδομένων από πολλαπλές πηγές [125]. Τα δύο σύνολα δεδομένων παρουσιάζουν συμπληρωματικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε διαφορετικές συνθήκες πολυπλοκότητας και ρεαλισμού.

5.3.1 Το Σύνολο Δεδομένων Opportunity

Το Opportunity Dataset [121, 122] αποτελεί ένα από τα πιο σύνθετα και ρεαλιστικά σύνολα δεδομένων στον τομέα της αναγνώρισης δραστηριοτήτων, καταγράφοντας δραστηριότητες καθημερινής ζωής (Activities of Daily Living - ADL) σε ένα προσομοιωμένο περιβάλλον διαμερίσματος. Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει καταγραφές από τέσσερις συμμετέχοντες (ηλικίας 23-33 ετών, 3 άνδρες και 1 γυναίκα) που εκτέλεσαν

πέντε διαφορετικά σενάρια πρωινής ρουτίνας, με κάθε συμμετέχοντα να επαναλαμβάνει τα σενάρια έξι φορές. Οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν σύνθετες ενέργειες όπως η προετοιμασία πρωινού, το σερβίρισμα καφέ, το καθάρισμα του τραπεζιού και η χρήση διαφόρων οικιακών συσκευών.

Το σύστημα αισθητήρων του Opportunity παρέχει 242 κανάλια δεδομένων συνολικά, προερχόμενα από 145 κανάλια από 23 φορητούς αισθητήρες, 60 κανάλια από 12 αντικείμενα του περιβάλλοντος και 37 κανάλια από 21 περιβαλλοντικούς αισθητήρες. Οι φορητοί αισθητήρες περιλαμβάνουν επτά μονάδες αδράνειας (Inertial Measurement Units - IMU) τοποθετημένες στα άκρα και τον κορμό, καθεμία εξοπλισμένη με τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο, τριαξονικό γυροσκόπιο και τριαξονικό μαγνητόμετρο [122]. Επιπλέον, δώδεκα τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα και τέσσερις αισθητήρες εντοπισμού ultra-wideband είναι τοποθετημένα στα χέρια και τα πόδια για λεπτομερέστερη καταγραφή των κινήσεων των άκρων. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 30 Hz για όλους τους αισθητήρες, παρέχοντας συγχρονισμένα δεδομένα υψηλής ανάλυσης.

5.3.2 Το Σύνολο Δεδομένων PAMAP2

Το PAMAP2 Dataset [123, 124] εστιάζει σε φυσικές δραστηριότητες και αθλητικές ασκήσεις, καταγράφοντας δεδομένα από εννέα συμμετέχοντες (ηλικίας 27 ± 3.3 ετών, 8 άνδρες και 1 γυναίκα) κατά την εκτέλεση 18 διαφορετικών δραστηριοτήτων. Οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν βασικές κινήσεις όπως περπάτημα, τρέξιμο και ποδηλασία, καθώς και πιο σύνθετες ασκήσεις όπως σκάλες, άλματα και διάφορες θέσεις του σώματος. Κάθε συμμετέχων εκτέλεσε ένα προκαθορισμένο πρωτόκολλο 12 βασικών δραστηριοτήτων, με κάποιους να εκτελούν επιπλέον προαιρετικές δραστηριότητες.

Το σύστημα αισθητήρων του PAMAP2 αποτελείται από τέσσερις αισθητήρες συνολικά: τρεις IMU τοποθετημένες στον καρπό του κυρίαρχου χεριού, στο στήθος και στον αστράγαλο του κυρίαρχου ποδιού, και έναν παλμογράφο καρδιάς [123, 124]. Κάθε IMU περιλαμβάνει τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο, τριαξονικό γυροσκόπιο, τριαξονικό μαγνητόμετρο και αισθητήρα θερμοκρασίας. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 100 Hz για τις IMU, ενώ ο παλμογράφος καταγράφει τον καρδιακό ρυθμό, παρέχοντας συνολικά 54 στήλες δεδομένων.

5.3.3 Διαδικασίες Συλλογής και Πρωτόκολλα

Και τα δύο σύνολα δεδομένων ακολούθησαν αυστηρά πρωτόκολλα συλλογής για την εξασφάλιση της ποιότητας και της συνέπειας των δεδομένων [125]. Στο Opportunity, οι συμμετέχοντες εκτέλεσαν τις δραστηριότητες με φυσικό τρόπο, χωρίς αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς, επιτρέποντας ρεαλιστικές παραλλαγές στον τρόπο εκτέλεσης.

Η επισημείωση των δραστηριοτήτων έγινε σε πολλαπλά επίπεδα αφαίρεσης, από χαμηλού επιπέδου κινήσεις (locomotion) έως σύνθετες δραστηριότητες υψηλού επιπέδου (high-level activities).

Στο PAMAP2, οι συμμετέχοντες ακολούθησαν ένα δομημένο πρωτόκολλο με προκαθορισμένη σειρά και διάρκεια δραστηριοτήτων, εξασφαλίζοντας ισορροπημένη κατανομή των κλάσεων. Η επισημείωση έγινε σε πραγματικό χρόνο από τον επιβλέποντα ερευνητή, με χρονική ακρίβεια επιπέδου δευτερολέπτου.

5.3.4 Ζητήματα Ηθικής και Ανωνυμοποίησης

Και τα δύο σύνολα δεδομένων συλλέχθηκαν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές ηθικής έρευνας των αντίστοιχων ιδρυμάτων και με την ενημερωμένη συγκατάθεση όλων των συμμετεχόντων [126]. Τα δεδομένα έχουν πλήρως ανωνυμοποιηθεί, με κάθε συμμετέχοντα να αναγνωρίζεται μόνο μέσω αριθμητικού αναγνωριστικού, χωρίς καταγραφή προσωπικών πληροφοριών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ταυτοποίηση. Οι συμμετέχοντες είχαν το δικαίωμα να αποσυρθούν από τη μελέτη οποιαδήποτε στιγμή και ενημερώθηκαν για τη σκοπούμενη χρήση των δεδομένων για ερευνητικούς σκοπούς.

Η δημόσια διάθεση των συνόλων δεδομένων έγινε υπό άδειες ακαδημαϊκής χρήσης με περιορισμούς στην εμπορική εκμετάλλευση. Αυτό διασφαλίζει την αποκλειστική χρήση τους για την προώθηση της επιστημονικής γνώσης [126]. Στην παρούσα έρευνα, τα δεδομένα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την αξιολόγηση αλγορίθμων αναγνώρισης δραστηριοτήτων, χωρίς καμία προσπάθεια επανα-ταυτοποίησης των συμμετεχόντων ή εξαγωγής προσωπικών πληροφοριών. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται σε συγκεντρωτικό επίπεδο, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται ως στατιστικά συγκεντρωτικά μεγέθη χωρίς αναφορά σε μεμονωμένους συμμετέχοντες.

Σύνοψη: Τα σύνολα δεδομένων Opportunity και PAMAP2 παρέχουν συμπληρωματικά χαρακτηριστικά για τη διερεύνηση των ασαφών μετρικών ομοιότητας. Το Opportunity προσφέρει σήμανση πολλαπλών επιπέδων και ρεαλιστικό περιβάλλον, ενώ το PAMAP2 διαθέτει υψηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας και ελεγχόμενες συνθήκες. Η επιλογή αυτών των συνόλων επιτρέπει ολοκληρωμένη αξιολόγηση γενικευσιμότητας και ευστάθειας (EE3). Οι αυστηρές ηθικές οδηγίες εξασφαλίζουν υπεύθυνη χρήση των δεδομένων.

5.4 Προεπεξεργασία Δεδομένων

Αφού καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά των συνόλων δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν, το επόμενο κρίσιμο βήμα αφορά τη μεθοδική προεπεξεργασία των αισθητήριακών δεδομένων. Η προεπεξεργασία αποτελεί τη βάση για την αποτελεσματική εφαρμογή των ασαφών μετρικών ομοιότητας, καθώς εξασφαλίζει την ομοιομορφία, την ποιότητα και τη συγκρισιμότητα των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών συνόλων και αισθητήρων.

Μετά τη συλλογή των δεδομένων από τα σύνολα Opportunity και PAMAP2, τα ακατέργαστα σήματα των αισθητήρων υποβάλλονται σε δύο βασικά στάδια προεπεξεργασίας. Αρχικά, οι χρονοσειρές χωρίζονται σε επικαλυπτόμενα παράθυρα σταθερής διάρκειας για την εκτίμηση των ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής. Στη συνέχεια, για κάθε παράθυρο ξεχωριστά, τα σήματα κανονικοποιούνται δυναμικά σε κοινό πεδίο τιμών για να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα.

5.4.1 Παραθυροποίηση Χρονοσειρών

Το πρώτο στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνει τον χωρισμό των χρονοσειρών των αισθητήρων σε επικαλυπτόμενα παράθυρα σταθερής χρονικής διάρκειας χρησιμοποιώντας την τεχνική sliding window. Κάθε παράθυρο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (π.χ. 4 δευτερόλεπτα), η οποία μεταφράζεται σε διαφορετικό αριθμό δειγμάτων ανάλογα με τη συχνότητα δειγματοληψίας κάθε dataset (120 δείγματα στο Opportunity με 30 Hz, 400 δείγματα στο PAMAP2 με 100 Hz).

Τα παράθυρα δημιουργούνται με συνεπή χρονική διάρκεια ανεξάρτητα από τη συχνότητα δειγματοληψίας κάθε συνόλου δεδομένων. Η επικάλυψη ελέγχεται από τον παράμετρο overlap ratio:

- **Χρονική διάρκεια παραθύρου:** 4 δευτερόλεπτα (συνεπής για όλα τα datasets)
- **Μέγεθος σε δείγματα:** 120 δείγματα για Opportunity (30 Hz) , 400 δείγματα για PAMAP2 (100 Hz)
- **Επικάλυψη:** 50%-70% (overlap_ratio = 0.5-0.7)

Συγκεκριμένα, με επικάλυψη 50%, κάθε νέο παράθυρο ξεκινά στο μέσο του προηγούμενου ($\text{step_size} = \text{window_size} \times 0.5$), ενώ με επικάλυψη 70%, κάθε νέο παράθυρο ξεκινά στο 30% του προηγούμενου ($\text{step_size} = \text{window_size} \times 0.3$). Η επικάλυψη επιτρέπει την αποτύπωση των μεταβατικών φάσεων μεταξύ διαφορετικών δραστηριοτήτων και αυξάνει τον αριθμό των διαθέσιμων παραθύρων για ανάλυση.

Για κάθε παράθυρο ανατίθεται μία ετικέτα δραστηριότητας βάσει του αλγορίθμου πλειοψηφίας (majority voting). Η διαδικασία λειτουργεί ως εξής:

1. **Καταμέτρηση ετικετών:** Για κάθε παράθυρο W υπολογίζονται οι συχνότητες εμφάνισης κάθε ετικέτας δραστηριότητας.
2. **Επιλογή πλειοψηφίας:** Η ετικέτα με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ανατίθεται στο παράθυρο.
3. **Διαχείριση ισοπαλιών:** Παράθυρα όπου υπάρχει ισοπαλία μεταξύ δύο ή περισσότερων ετικετών αποκλείονται από την ανάλυση για να διατηρηθεί η ακρίβεια.
4. **Φιλτράρισμα ετικετών:** Παράθυρα με ετικέτες “null” ή άγνωστες δραστηριότητες επίσης αποκλείονται.

Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι κάθε παράθυρο έχει μία μοναδική και αξιόπιστη ετικέτα δραστηριότητας, απαραίτητη για την επαληθευμένη αξιολόγηση των μετρικών ομοιότητας.

5.4.2 Κανονικοποίηση Δεδομένων ανά Παράθυρο

Μετά τη δημιουργία των παραθύρων, το δεύτερο στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνει τη δυναμική κανονικοποίηση των δεδομένων σε κάθε παράθυρο ξεχωριστά. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι κάθε παράθυρο επεξεργάζεται ανεξάρτητα, αποφεύγοντας τη διαρροή πληροφοριών (data leakage) μεταξύ παραθύρων εκπαίδευσης και ελέγχου.

Για κάθε παράθυρο $W = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, η κανονικοποίηση min-max εφαρμόζεται ως εξής:

Αρχικά υπολογίζονται τα άκρα του παραθύρου:

$$x_{min}^W = \min_{i=1, \dots, n} x_i, \quad x_{max}^W = \max_{i=1, \dots, n} x_i \quad (5.1)$$

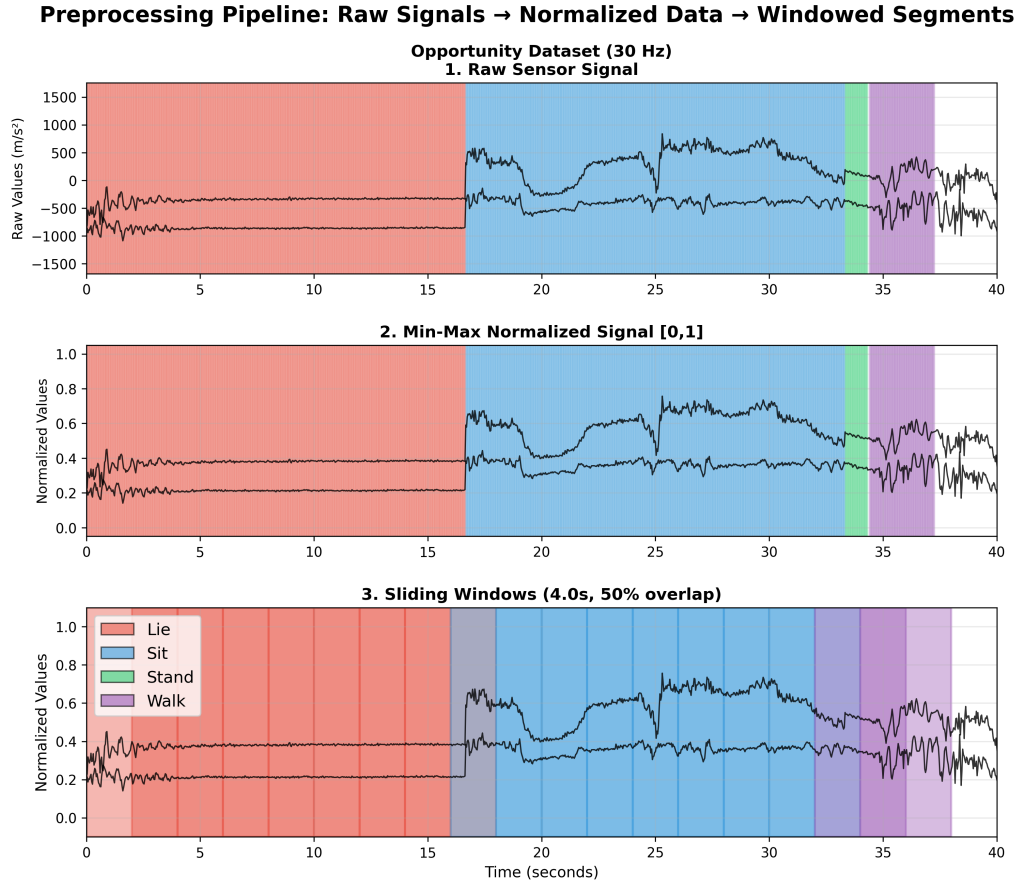
Στη συνέχεια, κάθε τιμή x_i του παραθύρου κανονικοποιείται στο διάστημα $[0, 1]$:

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - x_{min}^W}{x_{max}^W - x_{min}^W} \quad (5.2)$$

Στην ειδική περίπτωση όπου όλες οι τιμές του παραθύρου είναι ίδιες ($x_{max}^W = x_{min}^W$), η κανονικοποιημένη τιμή ορίζεται ως $x_i^{norm} = 0.5$, εξασφαλίζοντας σταθερή συμπεριφορά.

Το εύρος $[x_{min}^W, x_{max}^W]$ καθορίζει επίσης το πεδίο ορισμού (domain) της ασαφούς συνάρτησης συμμετοχής για το συγκεκριμένο παράθυρο. Αυτή η δυναμική προσδιοριστική προσέγγιση επιτρέπει στην κάθε ασαφή συνάρτηση να προσαρμόζεται βέλτιστα στην κατανομή των δεδομένων του αντίστοιχου παραθύρου.

Στο Σχήμα 5.1 παραθέτουμε την οπτική απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας.



Σχήμα 5.1: Διαδικασία προεπεξεργασίας χρονοσειρών αισθητήρων. Απεικονίζεται η πλήρης αλυσίδα από τα ακατέργαστα σήματα του συνόλου OPPORTUNITY μέσω επικαλυπτόμενης παραθυροποίησης με απόδοση ετικετών βάσει πλειοψηφικού κανόνα και δυναμικής κανονικοποίησης min-max ανά παράθυρο.

Σύνοψη: Η προεπεξεργασία εξασφαλίζει ομοιόμορφη και συγκρίσιμη μορφή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων και συνόλων. Η επικαλυπτόμενη παραθυροποίηση με πλειοψηφικό κανόνα ετικέτωσης εξασφαλίζει αξιόπιστη αναπαράσταση δραστηριοτήτων, ενώ η δυναμική κανονικοποίηση ανά παράθυρο αποτρέπει διαρροή δεδομένων. Τα προεπεξεργασμένα παράθυρα 4 δευτερολέπτων αποτελούν τη βάση για την εκτίμηση ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής (§5.5) και τη συνακόλουθη σύγκριση ομοιότητας (§5.6).

5.5 Παραγωγή Ασαφών Συναρτήσεων Συμμετοχής

Με τα προεπεξεργασμένα δεδομένα διαθέσιμα σε μορφή παραθύρων, το επόμενο κεντρικό στάδιο της μεθοδολογίας εστιάζει στη δημιουργία ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής. Αυτό το στάδιο αποτελεί το θεωρητικό και τεχνικό πυρήνα της προτεινόμενης προσέγγισης, καθώς οι συναρτήσεις συμμετοχής καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα των αισθητήρων μετασχηματίζονται σε ασαφείς αναπαραστάσεις κατάλληλες για σύγκριση ομοιότητας. Η έρευνα εξετάζει τρεις διακριτές μεθόδους για την εκτίμηση συναρτήσεων συμμετοχής: την κλασική προσέγγιση Kernel Density Estimation (KDE), τον καινοτόμο αλγόριθμο Normal Distribution Generator (NDG), και την προχωρημένη βελτιστοποιημένη για streaming παραλλαγή NDG-S. Κάθε μέθοδος παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την υπολογιστική αποδοτικότητα, την ακρίβεια εκτίμησης και την καταλληλότητα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

5.5.1 Kernel Density Estimation (KDE)

Η καθιερωμένη μέθοδος εκτίμησης πυκνότητας πυρήνα (Kernel Density Estimation, KDE) εκτιμά τη συνάρτηση πυκνότητας $f(x)$ ως:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

όπου K είναι ο πυρήνας (συνήθως Gaussian), h το εύρος ζώνης (bandwidth), και n το πλήθος των σημείων. Παρά την υψηλή ακρίβεια, η KDE απαιτεί σημαντικούς πόρους μνήμης για την αποθήκευση όλων των δεδομένων εκπαίδευσης.

5.5.2 Normal Distribution Generator (NDG)

Ο αλγόριθμος NDG εκτιμά τη συνάρτηση πυκνότητας χρησιμοποιώντας άθροισμα πυρήνων. Η γενική μορφή είναι:

$$\mu(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(x, x_i, \sigma)$$

όπου x_i τα σημεία δεδομένων, n το πλήθος των δειγμάτων, σ η παράμετρος εύρους ζώνης και K ο πυρήνας.

Η υλοποίηση υποστηρίζει διάφορους τύπους πυρήνων:

- **Gaussian:** Ο πιο συνηθισμένος πυρήνας με ομαλή μείωση

- **Epanechnikov:** Βέλτιστος πυρήνας ως προς το μέσο τετραγωνικό σφάλμα
- **Triangular:** Γραμμική μείωση της επιρροής με την απόσταση
- **Uniform:** Ορθογωνικός πυρήνας με σταθερή τιμή εντός παραθύρου
- **Quartic:** Πυρήνας με πιο ομαλή μείωση από τον Epanechnikov

Βάσει προκαταρκτικών πειραμάτων με τεχνικές grid search και 5-fold cross-validation, επιλέχθηκε ο Gaussian πυρήνας με $\sigma = 0.1$. Η παράμετρος σ αξιολογήθηκε στο εύρος $\{0.01, 0.1, 0.2, 0.5\}$ και η τιμή 0.1 παρέχει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ακρίβειας εκτίμησης και υπολογιστικής αποδοτικότητας για δεδομένα αισθητήρων.

Τεχνικές Καινοτομίες του NDG

Ο αλγόριθμος NDG ενσωματώνει τρεις κρίσιμες βελτιστοποιήσεις που τον διακρίνουν από την παραδοσιακή KDE:

Χωρικό Pruning με κανόνα 4-σ: Αντί να υπολογίζει την επιρροή όλων των σημείων για κάθε σημείο αξιολόγησης, ο NDG εφαρμόζει χωρικό pruning:

$$\mu(x) = \frac{1}{|\mathcal{N}(x)|} \sum_{x_i \in \mathcal{N}(x)} \exp\left(-\frac{(x - x_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.3)$$

όπου $\mathcal{N}(x) = \{x_i : |x - x_i| \leq 4\sigma\}$ είναι η γειτονιά των σημείων εντός 4 τυπικών αποκλίσεων.

Χωρικές Δομές KD-Tree: Η αναζήτηση γειτόνων βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας KD-Tree δομές δεδομένων με range queries, επιτρέποντας γρήγορη εύρεση των σημείων εντός της 4-σ γειτονιάς χωρίς να απαιτείται σάρωση όλων των δεδομένων.

Παραλληλοποίηση με Numba: Η επεξεργασία παραλληλοποιείται σε επίπεδο πυρήνα χρησιμοποιώντας JIT compilation, επιτρέποντας αξιοποίηση πολλαπλών πυρήνων του Apple Silicon M3.

5.5.3 Streaming NDG (NDG-S)

Ο αλγόριθμος NDG-S προσαρμόζει τον NDG για επεξεργασία μεγάλων δεδομένων μέσω τμηματικής (chunked) επεξεργασίας:

1. **Τμηματοποίηση δεδομένων:** Τα δεδομένα διαιρούνται σε τμήματα (chunks), με μέγεθος προσαρμόσιμο ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη.

2. **Επεξεργασία ανά τμήμα:** Για κάθε τμήμα C_k υπολογίζεται μερική συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_k(x) = \frac{1}{|C_k|\sigma\sqrt{2\pi}} \sum_{x_i \in C_k} \exp\left(-\frac{(x - x_i)^2}{2\sigma^2}\right)$$

3. **Συνδυασμός αποτελεσμάτων:** Η τελική συνάρτηση συμμετοχής προκύπτει από το μέσο όρο των μερικών συναρτήσεων:

$$\mu(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mu_k(x)$$

όπου K ο αριθμός των τμημάτων.

Η διαφορά με τον κλασικό NDG είναι ότι ο NDG-S μπορεί να επεξεργαστεί δεδομένα που δεν χωρούν στη μνήμη, με το κόστος ελαφρώς μειωμένης ακρίβειας λόγω της τμηματικής επεξεργασίας.

Καινοτομία του NDG-S

Ο NDG-S εισάγει τη δυνατότητα επεξεργασίας αυθαίρετα μεγάλων συνόλων δεδομένων με σταθερή κατανάλωση μνήμης:

Προσαρμοστικό Chunk Size: Το μέγεθος των τμημάτων προσδιορίζεται δυναμικά βάσει της διαθέσιμης μνήμης:

$$\text{chunk_size} = \min\left(\frac{\text{max_memory}}{\text{item_size}}, |\text{dataset}|\right) \quad (5.4)$$

όπου:

- `max_memory`: Το μέγιστο διαθέσιμο μέγεθος μνήμης (bytes)
- `item_size`: Το μέγεθος ενός στοιχείου δεδομένων σε bytes (συνήθως 8 bytes για float64)
- `dataset`: Ο συνολικός αριθμός στοιχείων στο σύνολο δεδομένων

Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι τα τμήματα δεν υπερβαίνουν τη διαθέσιμη μνήμη, ενώ παράλληλα αποφεύγονται άσκοπα μικρά τμήματα όταν το σύνολο δεδομένων είναι μικρό.

Memory-Efficient Aggregation: Τα αποτελέσματα των τμημάτων συνδυάζονται χωρίς να αποθηκεύονται όλα ταυτόχρονα στη μνήμη, επιτρέποντας επεξεργασία datasets εκατομμυρίων σημείων με λίγα MB μνήμης.

5.5.4 Συγκριτική Ανάλυση Μεθόδων

Τα κύρια χαρακτηριστικά των τριών μεθόδων είναι:

- **KDE:** Παρέχει υψηλή ακρίβεια εκτίμησης πυκνότητας χρησιμοποιώντας Gaussian kernels, αλλά με περιορισμένη παραλληλοποίηση και χαμηλή κλιμάκωση
- **NDG:** Προσφέρει ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και απόδοσης με πλήρη υποστήριξη παραλληλοποίησης
- **NDG-S:** Βελτιστοποιημένη έκδοση για μεγάλα datasets με μικρό memory footprint και υψηλή κλιμάκωση

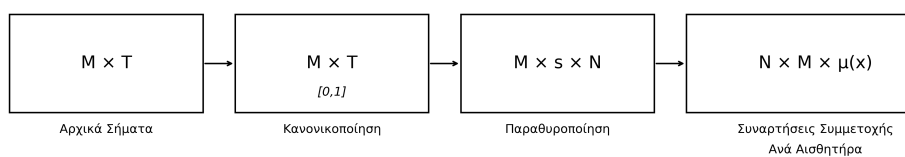
Η επιλογή μεταξύ των μεθόδων εξαρτάται από τους περιορισμούς της εφαρμογής: η KDE για μέγιστη ακρίβεια, ο NDG για ισορροπία απόδοσης-ακρίβειας, και ο NDG-S για μεγάλα datasets με περιορισμούς μνήμης.

5.5.5 Προσέγγιση Ανά Αισθητήρα

Στη μετάβαση από τον χρονικό χώρο των δεδομένων αισθητήρων στον χώρο των ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής, υπήρχαν πολλές επιλογές για το πώς να συνδυάσουμε τα δεδομένα των διαφορετικών αισθητήρων. Η επιλογή του υπολογισμού μιας συνάρτησης συμμετοχής ανά αισθητήρα έγινε συνειδητά για να εξυπηρετήσει τον διπλό στόχο της έρευνας: όχι μόνο την αναγνώριση δραστηριοτήτων αλλά και την αναγνώριση του τύπου και της θέσης των αισθητήρων.

Η προσέγγιση αυτή παράγει μία ξεχωριστή συνάρτηση συμμετοχής για κάθε αισθητήρα, διατηρώντας έτσι τα μοναδικά χαρακτηριστικά και την πληροφορία που φέρει ο καθένας. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάλυση τόσο του περιεχομένου (τι δραστηριότητα εκτελείται) όσο και της πηγής (ποιος αισθητήρας την κατέγραψε).

Σύνοψη: Η παραγωγή ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής αποτελεί τον πυρήνα της μεθοδολογίας. Η καινοτόμος προσέγγιση ανά αισθητήρα διατηρεί τα μοναδικά χαρακτηριστικά κάθε αισθητήρα, αποφεύγοντας απώλεια πληροφορίας από τη συγχώνευση. Ο αλγόριθμος NDG-S παρέχει αποδοτική εκτίμηση συναρτήσεων συμμετοχής, ενώ ο μετασχηματισμός από $M \times T$ σε $N \times M \times \mu(x)$ διαστάσεις επιτρέπει ευέλικτη σύγκριση ομοιότητας.



Σχήμα 5.2: Διαστάσεις δεδομένων στην προσέγγιση ανά αισθητήρα, από τα αρχικά σήματα ($M \times T$) έως τις τελικές membership functions ($N \times M \times \mu(x)$). Όπου M : αριθμός αισθητήρων, T : χρονικά δείγματα, s : μέγεθος παραθύρου, N : αριθμός παραθύρων, $\mu(x)$: membership function values

Επόμενο βήμα: Οι εκτιμηθείσες συναρτήσεις συμμετοχής αποτελούν την είσοδο για τον υπολογισμό 22 διαφορετικών μετρικών ομοιότητας (§5.7). Αυτές οι μετρικές εφαρμόζονται στη συνέχεια στα ερευνητικά ερωτήματα EE1-EE3 για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ανάκτησης δραστηριοτήτων (§5.8-5.9).

5.6 Πλαίσιο Μετρικών Ομοιότητας

Η μετατροπή των χρονοσειρών αισθητήρων σε ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής δημιουργεί τη βάση για το κεντρικό ερώτημα της έρευνας: πώς συγκρίνονται αποτελεσματικά αυτές οι ασαφείς αναπαραστάσεις για την ανάκτηση παρόμοιων δραστηριοτήτων;

Η απάντηση βρίσκεται στην ανάπτυξη και αξιολόγηση εξειδικευμένων μετρικών ομοιότητας που λαμβάνουν υπόψη τη συνεχή φύση των τιμών συμμετοχής στο διάστημα $[0, 1]$. Σε αντίθεση με τις κλασικές μετρικές που λειτουργούν σε δυαδικά ή διακριτά δεδομένα, οι ασαφείς μετρικές ομοιότητας πρέπει να αξιοποιούν την πλούσια πληροφορία που κρύβεται στους ενδιάμεσους βαθμούς συμμετοχής.

Για τις θεωρητικές βάσεις των μετρικών ομοιότητας και την αναλυτική παρουσίαση των μαθηματικών ιδιοτήτων τους, βλ. §4.3.2–4.4.2. Η παρούσα ενότητα εστιάζει στην πρακτική εφαρμογή και παραμετροποίηση των 25 μετρικών ομοιότητας που χρησιμοποιούνται στα πειράματα. Οι μετρικές κατηγοριοποιούνται σε έξι βασικές οικογένειες, εξασφαλίζοντας πολυδιάστατη αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους από διαφορετικές θεωρητικές οπτικές.

5.6.1 Συνολοθεωρητικές Μετρικές

Βασισμένες στη θεωρία ασαφών συνόλων, οι μετρικές αυτές εκμεταλλεύονται τις έννοιες της τομής και της ένωσης:

- **Jaccard Similarity:** $J(\mu_1, \mu_2) = \frac{\int \min(\mu_1(x), \mu_2(x)) dx}{\int \max(\mu_1(x), \mu_2(x)) dx}$
- **Dice Coefficient:** $D(\mu_1, \mu_2) = \frac{2 \int \min(\mu_1(x), \mu_2(x)) dx}{\int \mu_1(x) dx + \int \mu_2(x) dx}$
- **Overlap Coefficient:** $O(\mu_1, \mu_2) = \frac{\int \min(\mu_1(x), \mu_2(x)) dx}{\min(\int \mu_1(x) dx, \int \mu_2(x) dx)}$

5.6.2 Μετρικές Βασισμένες σε Απόσταση

Μετατρέπουν μετρικές απόστασης σε μέτρα ομοιότητας:

- **Euclidean Similarity:** $s_E = \frac{1}{1 + \sqrt{\sum_i (\mu_1(x_i) - \mu_2(x_i))^2}}$
- **Hamming Similarity:** Βασισμένη σε $s_H = \frac{1}{1 + \sum_i |\mu_1(x_i) - \mu_2(x_i)|}$
- **Chebyshev Similarity:** $s_C = 1 - \max_i |\mu_1(x_i) - \mu_2(x_i)|$ (για $[0, 1]$ τιμές)

5.6.3 Μετρικές Συσχέτισης

Μετρούν γραμμικές και μη-γραμμικές σχέσεις μεταξύ των συναρτήσεων συμμετοχής:

- **Cosine Similarity:** $\cos(\mu_1, \mu_2) = \frac{\sum_i \mu_1(x_i) \mu_2(x_i)}{\sqrt{\sum_i \mu_1^2(x_i)} \sqrt{\sum_i \mu_2^2(x_i)}}$
- **Pearson Correlation:** $r = \frac{\sum_i (\mu_1(x_i) - \bar{\mu}_1)(\mu_2(x_i) - \bar{\mu}_2)}{\sqrt{\sum_i (\mu_1(x_i) - \bar{\mu}_1)^2} \sqrt{\sum_i (\mu_2(x_i) - \bar{\mu}_2)^2}}$
- **Cross-Correlation:** Μέγιστη συσχέτιση με χρονικές μετατοπίσεις

5.6.4 Πληροφοριοθεωρητικές Μετρικές

Βασισμένες σε έννοιες από τη θεωρία πληροφοριών και την εντροπία:

- **Bhattacharyya Coefficient:** $BC = \sum_i \sqrt{p_i q_i}$
- **Bhattacharyya Distance:** $BD = \frac{1}{1 + (-\ln(BC))}$ όπου BC ο συντελεστής Bhattacharyya
- **Hellinger Distance:** $s_H = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_i (\sqrt{p_i} - \sqrt{q_i})^2}$

5.6.5 Προηγμένες και Παραλλαγές Μετρικών

Πέρα από τις βασικές μετρικές, υλοποιούνται εξειδικευμένες παραλλαγές και σύνθετες μετρικές:

Μετρικές Άρνησης

Εφαρμόζουν μετρικές στα συμπληρωματικά ασαφή σύνολα ($\neg A = 1 - A$):

- **Jaccard Negation:** $J(\neg\mu_1, \neg\mu_2)$ όπου $\neg\mu = 1 - \mu$
- **Negated Overlap Coefficient:** Εφαρμογή του Overlap στα συμπληρώματα
- **Negated Intersection over Max Cardinality:** $\frac{|\neg A \cap \neg B|}{\max(|\neg A|, |\neg B|)}$

Μετρικές Μέσου Όρου

Υπολογίζουν ομοιότητα σε στοιχειακό επίπεδο (pointwise):

- **Mean Min Over Max:** $\frac{1}{n} \sum_i \frac{\min(\mu_1(x_i), \mu_2(x_i))}{\max(\mu_1(x_i), \mu_2(x_i))}$
- **Mean Dice Coefficient:** $\frac{1}{n} \sum_i \frac{2 \min(\mu_1(x_i), \mu_2(x_i))}{\mu_1(x_i) + \mu_2(x_i)}$
- **One Minus Mean Symmetric Difference:** $1 - \frac{1}{n} \sum_i |\mu_1(x_i) - \mu_2(x_i)|$

Εναλλακτικές Συνολοθεωρητικές Μετρικές

Παραλλαγές των κλασικών μετρικών συνόλων:

- **Intersection Over Max Cardinality:** $\frac{|A \cap B|}{\max(|A|, |B|)}$ (σε αντίθεση με το Overlap που χρησιμοποιεί min)
- **One Minus Abs Diff Over Sum Cardinality:** $1 - \frac{d_H(A, B)}{|A| + |B|}$ όπου d_H η απόσταση Hamming

5.6.6 Εφαρμογή στα Πειράματα

Οι μετρικές υλοποιούνται ειδικά για τη σύγκριση ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής από αισθητήρες. Κάθε μετρική παραμετροποιείται για βέλτιστη απόδοση με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των δεδομένων αισθητήρων:

- **Αριθμητική ολοκλήρωση:** Κανόνας τραπεζίου για συνεχείς συναρτήσεις
- **Κανονικοποίηση:** Αυτόματη κλιμάκωση στο $[0, 1]$ όπου απαιτείται

- **Χειρισμός ακραίων τιμών:** Ρύθμιση για αποφυγή διαίρεσης με μηδέν

Για λεπτομέρειες υλοποίησης (vectorization, caching, memory management), βλ. §5.10.

5.6.7 Μεθοδολογία Συνδυασμού Ανά Αισθητήρα

Για την πρακτική εφαρμογή των μετρικών ομοιότητας στην προσέγγιση ανά αισθητήρα, απαιτείται μεθοδολογία συνδυασμού των επιμέρους μετρικών από κάθε αισθητήρα σε μία συνολική μετρική. Η συνένωση γίνεται μέσω αριθμητικού μέσου όρου:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N s_s \quad (5.5)$$

όπου:

- S : συνολική ομοιότητα μεταξύ δύο παραθύρων
- N : συνολικός αριθμός αισθητήρων
- s_s : μετρική ομοιότητας για τον αισθητήρα s

Ισότιμη Συμβολή Αισθητήρων: Δεν εφαρμόζονται βάρη στους επιμέρους αισθητήρες. Κάθε αισθητήρας συμβάλλει ισότιμα στην τελική μετρική, εξασφαλίζοντας αντικειμενική αξιολόγηση χωρίς a priori υποθέσεις για τη σχετική σημαντικότητα των αισθητήρων.

Σύνοψη: Το πλαίσιο μετρικών ομοιότητας παρέχει ολοκληρωμένη κάλυψη διαφορετικών θεωρητικών προσεγγίσεων για τη σύγκριση ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής. Από βασικές γεωμετρικές μετρικές (Jaccard, Cosine) έως πληροφοριοθεωρητικές μετρικές (Bhattacharyya, Hellinger) και εξειδικευμένες προηγμένες μετρικές (MaxIntersection, ProductOverMinNormSquared), το πλαίσιο καλύπτει φάσμα εφαρμογών.

Με τις μετρικές ομοιότητας και τη μεθοδολογία συνδυασμού πλέον καθορισμένες, προχωρούμε στην αξιολόγησή τους μέσω τριών διακριτών ερευνητικών ερωτημάτων: σύγκριση αλγορίθμων εκτίμησης (EE1), αποτελεσματικότητα ανάκτησης δραστηριότητας (EE2), και γενικευσιμότητα σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων (EE3).

5.7 Ερευνητικό Ερώτημα 1: Σύγκριση Μεθόδων Εκτίμησης Συναρτήσεων Συμμετοχής

5.7.1 Διατύπωση Υπόθεσης

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα διερευνά την αποδοτικότητα τριών μεθόδων εκτίμησης ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής:

ΕΕ1: Ποια από τις τρεις μεθόδους εκτίμησης ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής (KDE, NDG, NDG-S) παρέχει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής αποδοτικότητας και ακρίβειας εκτίμησης για εφαρμογές αναγνώρισης δραστηριοτήτων;

Ερευνητική Υπόθεση (H1): Η προτεινόμενη μέθοδος NDG-S θα επιτύχει συγκρίσιμη ακρίβεια εκτίμησης με το KDE (απόκλιση $< 5\%$) ενώ θα παρουσιάσει σημαντικά καλύτερη υπολογιστική απόδοση (μείωση χρόνου εκτέλεσης $> 50\%$).

5.7.2 Πειραματικό Πρωτόκολλο

Συνθήκες Εκτέλεσης:

- **Σύνολα δεδομένων:** Συνθετικά δεδομένα για σύγκριση αλγορίθμων
- **Μεγέθη δεδομένων:** 100, 1.000, 10.000, 100.000 δείγματα
- **Επαναλήψεις:** 5-fold cross-validation ανά συνθήκη
- **Παράμετρος σ :** Σταθερή τιμή $\sigma = 0.1$

Πλατφόρμα Εκτέλεσης: Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ελεγχόμενο περιβάλλον (Apple Silicon M3, 16GB RAM, Python 3.11) για εξασφάλιση αναπαραγωγιμότητας.

5.7.3 Δείκτες Αξιολόγησης

Υπολογιστικές Μετρικές:

- **Χρόνος εκτέλεσης (ms):** Μέσος χρόνος και διακύμανση
- **Κατανάλωση μνήμης (MB):** Μέγιστη χρήση RAM
- **Κλιμακωσιμότητα:** Ρυθμός αύξησης με μέγεθος δεδομένων

Ακρίβεια Εκτίμησης:

- **Απόκλιση Kullback-Leibler:** Μέτρηση απόκλισης από αναφορά KDE
- **Έλεγχος Χι-τετράγωνο:** Στατιστική επικύρωση διαφορών κατανομών

5.7.4 Περιορισμοί EE1

- **Συνθετικά δεδομένα:** Τα πειράματα περιορίζονται σε ελεγχόμενα συνθετικά δεδομένα και δεν εξετάζουν συμπεριφορά σε πραγματικές χρονοσειρές αισθητήρων
- **Συγκεκριμένη πλατφόρμα:** Οι μετρήσεις απόδοσης εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη υλοποίηση Python και αρχιτεκτονική Apple Silicon

5.8 Ερευνητικό Ερώτημα 2: Αξιολόγηση Ασαφών Μετρικών Ομοιότητας**5.8.1 Διατύπωση Υπόθεσης**

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα εστιάζει στην αξιολόγηση των 16 ασαφών μετρικών ομοιότητας για την ανάκτηση δραστηριοτήτων:

EE2: Ποιες από τις προτεινόμενες ασαφείς μετρικές ομοιότητας επιτυγχάνουν τη βέλτιστη απόδοση στην ανάκτηση παρόμοιων δραστηριοτήτων από χρονοσειρές αισθητήρων;

Ερευνητική Υπόθεση (H2): Οι μετρικές που βασίζονται σε θεωρία πληροφοριών (Bhattacharyya) και τροποποιημένες γεωμετρικές μετρικές (Dice, Jaccard) θα επιτύχουν στατιστικά σημαντικά καλύτερη απόδοση ανάκτησης ($\text{Hit@1} > 0.7$, $\text{MRR} > 0.8$) σε σχέση με βασικές μετρικές όπως η Ευκλείδεια απόσταση.

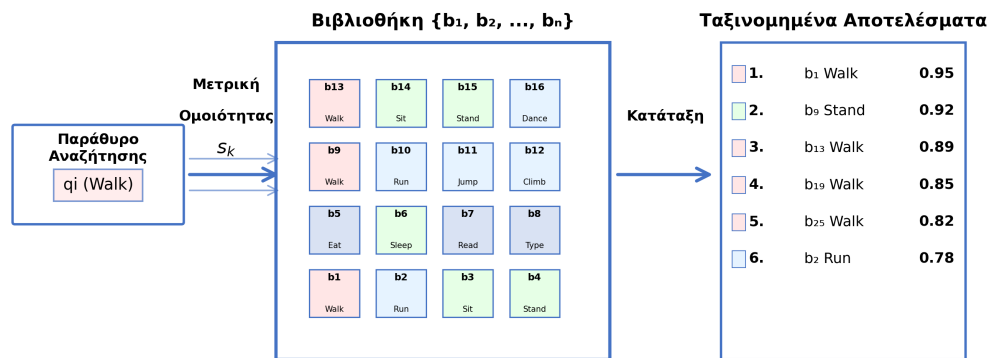
5.8.2 Πειραματικό Πρωτόκολλο

Σχεδιασμός Ανάκτησης: Η αξιολόγηση ακολουθεί προσέγγιση ανάκτησης όπου κάθε παράθυρο λειτουργεί εναλλακτικά ως ερώτημα (query) ή μέλος βιβλιοθήκης (library). Αυτό προσομοιώνει ρεαλιστικά σενάρια όπου ένα νέο παράθυρο δραστηριότητας συγκρίνεται με γνωστά παραδείγματα.

Παράμετροι Πειραμάτων:

- **Σύνολα δεδομένων:** Opportunity και PAMAP2
- **Τύποι ετικετών:** Locomotion, ML_Both_Arms, HL_Activity
- **Μέγεθος παραθύρου:** 120 δείγματα (4 δευτερόλεπτα)
- **Επικάλυψη:** 50% (βήμα 60 δειγμάτων)
- **Δείγματα ανά κλάση:** 15.000 ισορροπημένα
- **Διαχωρισμός:** 80% εκπαίδευση, 20% έλεγχος

Ενοποιημένη Παραθυροποίηση: Χρήση ενιαίων παραθύρων για όλους τους τύπους ετικετών, επιτρέποντας προ-υπολογισμό ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής και δραστική μείωση υπολογιστικού χρόνου (βλ. §;;).



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα της προσέγγισης ανάκτησης για την αξιολόγηση μετρικών ομοιότητας. Ένα παράθυρο ερώτημα συγκρίνεται με όλα τα παράθυρα της βιβλιοθήκης χρησιμοποιώντας όλες τις μετρικές ομοιότητας, και τα αποτελέσματα ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά ομοιότητας για την αξιολόγηση της απόδοσης.

Για κάθε παράθυρο ερώτημα q_i με ετικέτα l_i , υπολογίζονται οι τιμές ομοιότητας με όλα τα παράθυρα της βιβλιοθήκης $\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$. Η διαδικασία δημιουργεί ένα διάνυσμα ομοιότητας $\mathbf{s}_i = [s(q_i, b_1), s(q_i, b_2), \dots, s(q_i, b_N)]$. Τα παράθυρα της βιβλιοθήκης κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά ομοιότητας. Η απόδοση αξιολογείται βάσει της θέσης των παραθύρων με την ίδια ετικέτα l_i στην κατάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.

Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών μεθόδων ταξινόμησης. Πρώτον, δεν απαιτεί εκπαίδευση συγκεκριμένου μοντέλου

ταξινόμησης. Επιτρέπει την άμεση σύγκριση των μετρικών ομοιότητας χωρίς την επιρροή παραμέτρων ταξινομητή. Δεύτερον, προσφέρει πλούσια πληροφορία μέσω της πλήρους κατάταξης. Αυτό επιτρέπει την ανάλυση όχι μόνο της καλύτερης πρόβλεψης αλλά και του συνολικού προφίλ ομοιότητας.

5.8.3 Μετρικές Αξιολόγησης Ανάκτησης

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μετρικών ομοιότητας βασίζεται σε πέντε βασικές μετρικές ανάκτησης που μετρούν διαφορετικές πτυχές της απόδοσης:

Hit@k Μετρικές

Οι μετρικές Hit@k μετρούν το ποσοστό των ερωτημάτων για τα οποία τουλάχιστον ένα σχετικό αποτέλεσμα (με την ίδια ετικέτα) εμφανίζεται στις πρώτες k θέσεις της κατάταξης:

$$\text{Hit@k} = \frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} \mathbf{1}[\exists j \leq k : \text{label}(r_{ij}) = \text{label}(q_i)] \quad (5.6)$$

όπου Q το σύνολο των ερωτημάτων, r_{ij} το j -οστό αποτέλεσμα για το ερώτημα q_i , και $\mathbf{1}[\cdot]$ η συνάρτηση δείκτης.

Mean Reciprocal Rank (MRR)

Η μετρική MRR μετρά τη μέση αντίστροφη θέση του πρώτου σχετικού αποτελέσματος:

$$\text{MRR} = \frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} \frac{1}{\text{rank}_i} \quad (5.7)$$

όπου rank_i είναι η θέση του πρώτου σχετικού αποτελέσματος για το ερώτημα q_i .

Normalized Discounted Cumulative Gain (NDCG@k)

Η μετρική NDCG@k λαμβάνει υπόψη τόσο τη σχετικότητα όσο και τη θέση των αποτελεσμάτων, δίνοντας περισσότερο βάρος σε σχετικά αποτελέσματα που εμφανίζονται ψηλότερα στην κατάταξη:

$$\text{NDCG@k} = \frac{\text{DCG@k}}{\text{IDCG@k}} \quad (5.8)$$

όπου $\text{DCG@k} = \sum_{i=1}^k \frac{2^{\text{rel}_i} - 1}{\log_2(i+1)}$ και IDCG@k είναι η ιδανική τιμή DCG όταν τα αποτελέσματα είναι ταξινομημένα βέλτιστα.

Συμπληρωματικές Μετρικές Ανάκτησης

Πέραν των βασικών μετρικών, εφαρμόζονται δύο επιπρόσθετες μετρικές για πλήρη αξιολόγηση:

Hit@3 και Hit@5: Εκτός του Hit@1, εξετάζονται και τιμές για $k = 3, 5$ που παρέχουν εικόνα της απόδοσης σε μεσαίες θέσεις κατάταξης:

$$\text{Hit@3} = \frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} \mathbf{1}[\exists j \leq 3 : \text{label}(r_{ij}) = \text{label}(q_i)] \quad (5.9)$$

NDCG@5: Η NDCG εφαρμόζεται συγκεκριμένα για $k = 5$, αντανακλώντας την έμφαση στα πέντε πρώτα αποτελέσματα ανάκτησης.

Κριτήρια Σχετικότητας και Εφαρμογή

Δυαδικό Κριτήριο Σχετικότητας: Ένα αποτέλεσμα θεωρείται σχετικό (relevant) εάν και μόνον εάν έχει την ίδια ετικέτα δραστηριότητας με το ερώτημα. Δεν υιοθετούνται κλιμακωτά επίπεδα σχετικότητας, καθώς οι ετικέτες δραστηριοτήτων αποτελούν διακριτές κατηγορίες.

Συγκεκριμένες Τιμές: Στα πειράματα εφαρμόζονται συστηματικά οι εξής μετρικές:

- **Hit@1:** Ακρίβεια πρώτου αποτελέσματος (πιο αυστηρό κριτήριο)
- **Hit@3:** Επιτυχία στις πρώτες 3 θέσεις (ισορροπημένο κριτήριο)
- **Hit@5:** Επιτυχία στις πρώτες 5 θέσεις (ελαστικό κριτήριο)
- **MRR:** Μέση αντίστροφη κατάταξη (βαρύτητα στη θέση)
- **NDCG@5:** Κανονικοποιημένο κέρδος με έκπτωση (ολοκληρωμένη μετρική)

Λογική Επιλογής: Η επιλογή αυτών των πέντε μετρικών εξασφαλίζει πολυδιάστατη αξιολόγηση. Καλύπτει τόσο την ακρίβεια (precision-oriented: Hit@1) όσο και την ανάκληση (recall-oriented: Hit@5). Η MRR και η NDCG@5 αποδίδουν την ποιότητα της συνολικής κατάταξης.

Αυτές οι μετρικές εφαρμόζονται συστηματικά σε όλα τα πειράματα. Παρέχουν ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης κάθε μετρικής ομοιότητας στην ανάκτηση δραστηριοτήτων.

Στατιστική Επικύρωση:

- **Friedman test:** Ανίχνευση διαφορών μεταξύ πολλαπλών μετρικών
- **Διαστήματα εμπιστοσύνης:** 95% με κατανομή τ

5.8.4 Στρατηγική Δειγματοληψίας και Διαχωρισμός Δεδομένων

Στρωματοποιημένη Δειγματοληψία: Για την εξασφάλιση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, εφαρμόζεται στρωματοποιημένη δειγματοληψία (stratified sampling) που διατηρεί την αναλογική αναπαράσταση των δραστηριοτήτων στα σύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου. Επιπλέον, για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανισορροπίας κλάσεων που χαρακτηρίζει τα περισσότερα σύνολα δεδομένων δραστηριοτήτων, εφαρμόζεται ισορροπημένη δειγματοληψία (balanced sampling).

Για κάθε πείραμα επιλέγεται σταθερός αριθμός παραθύρων από κάθε κλάση δραστηριότητας (συνήθως 15.000 συνολικά, ισοκατανεμημένα στις κλάσεις). Αυτό εξαλείφει την επιρροή της κατανομής κλάσεων στην απόδοση των μετρικών και επιτρέπει τη δίκαιη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μετρικών και διαφορετικών συνόλων δεδομένων.

Διαχωρισμός Εκπαίδευσης-Ελέγχου: Ο διαχωρισμός του συνόλου δεδομένων σε σύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου γίνεται με στρωματοποιημένη προσέγγιση που εξασφαλίζει ότι κάθε υποσύνολο περιέχει αντιπροσωπευτικό δείγμα από κάθε δραστηριότητα. Η αναλογία διαχωρισμού είναι συνήθως 80

Πρόληψη Διαρροής Δεδομένων: Σημαντικός παράγοντας στον πειραματικό σχεδιασμό είναι η αποφυγή διαρροής δεδομένων (data leakage). Για τον λόγο αυτό, ο διαχωρισμός εκπαίδευσης-ελέγχου γίνεται σε επίπεδο συμμετεχόντων (subject-wise splitting) όπου είναι εφικτό, εξασφαλίζοντας ότι δεδομένα από τον ίδιο συμμετέχοντα δεν εμφανίζονται ταυτόχρονα στα δύο σύνολα.

5.8.5 Περιορισμοί EE2

- **Σταθερό μέγεθος παραθύρου:** Χρήση μόνο 4-δευτερόλεπτων παραθύρων - δεν εξετάζονται διαφορετικές χρονικές κλίμακες
- **Ισορροπημένη δειγματοληψία:** Η τεχνητή ισορροπία κλάσεων ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύει πραγματικές κατανομές δραστηριοτήτων

- **Διαδικό κριτήριο σχετικότητας:** Δεν εξετάζονται κλιμακωτά επίπεδα παρόμοιων δραστηριοτήτων
- **Περιορισμένοι τύποι ετικετών:** Εστίαση σε 3 κύριους τύπους ετικετών - δεν καλύπτει πλήρως την ποικιλία δραστηριοτήτων

5.9 Ερευνητικό Ερώτημα 3: Γενικευσιμότητα και Σταθερότητα μεταξύ Συνόλων Δεδομένων

5.9.1 Διατύπωση Υπόθεσης

Το τρίτο ερευνητικό ερώτημα διερευνά την πρακτική εφαρμοσιμότητα των μετρικών σε διαφορετικά περιβάλλοντα:

EE3: Παραμένουν σταθερές οι κατατάξεις των μετρικών ομοιότητας ως προς την ακρίβεια ανάκτησης σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων με διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας και τρόπους αισθητήρων;

Ερευνητική Υπόθεση (H3): Οι τρεις καλύτερες μετρικές από το EE2 θα διατηρήσουν υψηλή συσχέτιση Spearman ($\rho \geq 0.7$) για την ακρίβεια ανάκτησης δραστηριοτήτων μεταξύ διαφορετικών συνόλων δεδομένων, αποδεικνύοντας γενικευσιμότητα και ευστάθεια.

Αυτό το ερώτημα είναι καθοριστικό για την πρακτική αξία των προτεινόμενων μετρικών, καθώς τα πραγματικά συστήματα αναγνώρισης δραστηριοτήτων συχνά εφαρμόζονται σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές των πειραματικών δεδομένων εκπαίδευσης.

5.9.2 Πειραματικό Πρωτόκολλο

Στρατηγική Cross-Dataset Transfer: Εφαρμόζεται προσέγγιση ‘train-on-one-dataset, test-on-another’ που αξιολογεί την ικανότητα μεταφοράς γνώσης. Οι συναρτήσεις συμμετοχής εκπαιδεύονται σε ένα σύνολο δεδομένων και εφαρμόζονται για αξιολόγηση σε εντελώς διαφορετικό σύνολο.

Η προσέγγιση αυτή υλοποιείται μέσω τεσσάρων διακριτών σεναρίων μεταφοράς:

1. **opp_to_pamap2:** Εκπαίδευση συναρτήσεων συμμετοχής στο σύνολο δεδομένων Opportunity και αξιολόγηση στο σύνολο PAMAP2
2. **pamap2_to_opp:** Εκπαίδευση στο PAMAP2 και αξιολόγηση στο Opportunity

3. **opp_to_opp**: Εσωτερικός έλεγχος στο Opportunity (σενάριο αναφοράς)
4. **pamap2_to_pamap2**: Εσωτερικός έλεγχος στο PAMAP2 (σενάριο αναφοράς)

Τα σενάρια αναφοράς (3 και 4) παρέχουν τα baseline αποτελέσματα για τη μέτρηση της υποβάθμισης απόδοσης που προκύπτει από τη μεταφορά μεταξύ διαφορετικών συνόλων δεδομένων.

Αντιστοίχιση Δραστηριοτήτων: Για επιστημονική εγκυρότητα, χρησιμοποιούνται τέσσερις κοινές δραστηριότητες:

- Stand (Opportunity) → standing (PAMAP2)
- Walk (Opportunity) → walking (PAMAP2)
- Sit (Opportunity) → sitting (PAMAP2)
- Lie (Opportunity) → lying (PAMAP2)

Πειραματικές Παράμετροι:

- **Παραθυροποίηση:** 4 δευτερόλεπτα, 50% επικάλυψη
- **Δείγματα ανά κλάση:** Ελάχιστο 50 παράθυρα
- **Αλγόριθμος:** NDG-S με $\sigma = 0.1$ (σταθερή)
- **Στατιστική επικύρωση:** Wilcoxon signed-rank test με 5-fold cross-validation

5.9.3 Δείκτες Αξιολόγησης

Κύριες Μετρικές:

- **Συσχέτιση Spearman (ρ):** Σταθερότητα κατάταξης μετρικών μεταξύ datasets
- **Hit@1/3/5, MRR, NDCG@5:** Απόδοση ανάκτησης σε κάθε σενάριο
- **Διαστήματα εμπιστοσύνης:** 95% bootstrap confidence intervals

Κριτήρια Αποδοχής:

- **Ισχυρή γενικευσιμότητα:** $\rho \geq 0.7$
- **Μέτρια γενικευσιμότητα:** $0.5 \leq \rho \leq 0.7$
- **Αδύναμη γενικευσιμότητα:** $\rho \leq 0.5$

5.9.4 Περιορισμοί EE3

- **Περιορισμένες κοινές δραστηριότητες:** Μόνο 4 δραστηριότητες επιτρέπουν άμεση σύγκριση
- **Διαφορετικοί ρυθμοί δειγματοληψίας:** Opportunity (30Hz) vs PAMAP2 (100Hz) - δεν εξετάζεται επίδραση νορμαλιζατιον
- **Ετερογενείς διατάξεις αισθητήρων:** Διαφορετικές θέσεις και τύποι αισθητήρων μεταξύ datasets
- **Στατική αντιστοίχιση:** Δεν εξετάζονται δυναμικές ή πιθανοτικές αντιστοιχίσεις δραστηριοτήτων

5.9.5 Περιορισμοί και Μεθοδολογικές Προκλήσεις

Η μεθοδολογία του EE3 χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένους περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Πρώτον, η ανάλυση περιορίζεται σε δύο σύνολα δεδομένων (Opportunity και PAMAP2), γεγονός που περιορίζει τη γενικευσιμότητα των συμπερασμάτων σε ευρύτερα φάσματα συνθηκών δειγματοληψίας και διατάξεων αισθητήρων.

Δεύτερον, η στρατηγική αντιστοίχισης δραστηριοτήτων, παρά την προσεκτική σχεδίαση, ενδέχεται να εισάγει συστηματικό bias λόγω διαφορών στον τρόπο εκτέλεσης των δραστηριοτήτων μεταξύ διαφορετικών πληθυσμών και πολιτισμικών περιβαλλόντων που αντιπροσωπεύουν τα δύο σύνολα δεδομένων.

Τρίτον, οι διαφορές στις τεχνολογικές προδιαγραφές των αισθητήρων (διαφορετικοί ρυθμοί δειγματοληψίας, τύποι αισθητήρων, και τοποθέτηση στο σώμα) δημιουργούν εγγενείς δυσκολίες στην άμεση σύγκριση και μεταφορά αποτελεσμάτων μεταξύ των συνόλων δεδομένων.

5.10 Λεπτομέρειες Υλοποίησης

Όλοι οι αλγόριθμοι υλοποιούνται σε Python χρησιμοποιώντας NumPy για διανυσματικές λειτουργίες, με μηχανισμούς προσωρινής αποθήκευσης για συναρτήσεις συμμετοχής και παράλληλη επεξεργασία για υπολογισμούς ομοιότητας.

5.10.1 Στρατηγικές Βελτιστοποίησης Μνήμης

Η διαχείριση μνήμης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την κλιμάκωση των πειραμάτων σε μεγάλα σύνολα δεδομένων. Η υλοποίηση ενσωματώνει πολλαπλές στρατηγικές βελτιστοποίησης.

Πολυεπίπεδη Προσωρινή Αποθήκευση

LRU Cache για Συναρτήσεις Συμμετοχής: Οι υπολογισμένες συναρτήσεις συμμετοχής αποθηκεύονται σε μνήμη με αλγόριθμο Least Recently Used (LRU) που διατηρεί τις πιο πρόσφατα χρησιμοποιημένες συναρτήσεις, μειώνοντας επαναληπτικούς υπολογισμούς.

Αποθήκευση σε Δίσκο: Για μεγάλα πειράματα, οι συναρτήσεις συμμετοχής αποθηκεύονται σε δίσκο με συμπίεση gzip, επιτρέποντας την επεξεργασία συνόλων δεδομένων που υπερβαίνουν τη διαθέσιμη RAM.

Επεξεργασία σε Τμήματα (Chunking)

Προσαρμόσιμο Μέγεθος Τμημάτων: Το μέγεθος των τμημάτων υπολογίζεται δυναμικά βάσει της διαθέσιμης μνήμης:

$$\text{chunk_size} = \min \left(\left\lfloor \frac{\text{max_memory}}{\text{item_size} \times \text{safety_factor}} \right\rfloor, \text{dataset_size} \right) \quad (5.10)$$

όπου $\text{safety_factor} = 0.8$ για περιθώριο ασφαλείας.

Βελτιστοποίηση Διανυσματικών Λειτουργιών: Χρήση NumPy broadcasting και διανυσματοποιημένων λειτουργιών που μειώνουν την κατανάλωση μνήμης και βελτιώνουν την απόδοση έναντι των επαναληπτικών loops.

Παράλληλη Επεξεργασία με Κοινή Μνήμη

Εφαρμογή multiprocessing με shared memory arrays που επιτρέπει παράλληλη επεξεργασία χωρίς αντιγραφή δεδομένων μεταξύ διεργασιών, μειώνοντας σημαντικά

τη συνολική κατανάλωση μνήμης για υπολογισμούς μετρικών ομοιότητας.

5.11 Σύνοψη κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο παρουσίασε τη λεπτομερή μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας ασαφών μετρικών ομοιότητας στην αναγνώριση ανθρώπινων δραστηριοτήτων από δεδομένα αισθητήρων. Η προσέγγιση στηρίζεται σε τρία θεμελιώδη ερευνητικά ερωτήματα που εξετάζουν διαφορετικές πτυχές της προτεινόμενης τεχνικής.

Βασικές συνεισφορές της μεθοδολογίας:

- **Νέα προσέγγιση per-sensor membership functions:** Παραγωγή ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής ανά αισθητήρα αντί για συγχωνευμένες αναπαραστάσεις, διατηρώντας τη χωρική και φυσική ιδιαιτερότητα κάθε αισθητήρα.
- **Αλγόριθμος NDG-S:** Βελτιστοποιημένη υλοποίηση του Normalized Difference Gaussian με ενισχυμένη υπολογιστική αποδοτικότητα για streaming δεδομένα.
- **Ευρεία αξιολόγηση μετρικών ομοιότητας:** Συστηματική σύγκριση 22 διαφορετικών μετρικών ομοιότητας ασαφών συνόλων σε προβλήματα ανάκτησης δραστηριοτήτων.
- **Ανάλυση ευστάθειας μεταξύ συνόλων δεδομένων:** Εμπειρική διερεύνηση της γενικευσιμότητας των μετρικών μεταξύ διαφορετικών συνόλων δεδομένων και συνθηκών δειγματοληψίας.

Τεχνικές καινοτομίες:

Η τεχνική υλοποίηση εισάγει σημαντικές βελτιώσεις στην παραδοσιακή προσέγγιση ασαφούς ανάλυσης δεδομένων αισθητήρων. Η ενοποιημένη παραθυροποίηση (Unified Windowing Optimization) επιτυγχάνει βελτίωση απόδοσης της τάξης των 200 φορών για πολυ-ετικετικά πειράματα, ενώ η προσεκτική διαχείριση μνήμης μέσω δυναμικής επιμερισμένης επεξεργασίας επιτρέπει την ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων.

Στατιστικό πλαίσιο επικύρωσης:

Κάθε ερευνητικό ερώτημα συνοδεύεται από εξειδικευμένο στατιστικό πλαίσιο που εξασφαλίζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για το EE1, εφαρμόζονται paired t-tests για την σύγκριση υπολογιστικής απόδοσης. Για το EE2, χρησιμοποιούνται τεστ Friedman και post-hoc αναλύσεις για την κατάταξη των μετρικών ομοιότητας. Για το

EE3, η συσχέτιση Spearman με bootstrap ανάλυση παρέχει εκτίμηση της ευστάθειας μεταξύ συνόλων δεδομένων.

Προεπισκόπηση αποτελεσμάτων:

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε εφαρμόζεται στα καθιερωμένα σύνολα δεδομένων Opportunity και PAMAP2, παρέχοντας εμπειρικά στοιχεία για την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων τεχνικών. Τα πειραματικά αποτελέσματα, που παρουσιάζονται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο, επαληθεύουν την υπεροχή της προσέγγισης per-sensor membership functions και αποκαλύπτουν σημαντικές διαφορές στην απόδοση των διαφορετικών μετρικών ομοιότητας.

Η ολοκληρωμένη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε αποτελεί την θεμελιώδη βάση για την εμπειρική αξιολόγηση και την επιστημονική τεκμηρίωση των ασαφών μετρικών ομοιότητας στην αναγνώριση ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα

6.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν για την αξιολόγηση των τριών ερευνητικών ερωτημάτων που διατυπώθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η ανάλυση ακολουθεί τη μεθοδολογική σειρά: EE1 (σύγκριση αλγορίθμων εκτίμησης συναρτήσεων συμμετοχής), EE2 (αξιολόγηση μετρικών ομοιότητας για ανάκτηση δραστηριοτήτων), και EE3 (γενικευσιμότητα σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων).

Κάθε ερευνητικό ερώτημα εξετάζεται μέσω συστηματικής στατιστικής ανάλυσης, παρουσίασης αποτελεσμάτων, και αξιολόγησης των αντίστοιχων ερευνητικών υποθέσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τόσο σε αριθμητική όσο και σε γραφική μορφή, συνοδευόμενα από στατιστικές δοκιμές και διαστήματα εμπιστοσύνης.

6.2 EE1: Σύγκριση Αλγορίθμων Εκτίμησης Συναρτήσεων Συμμετοχής

6.2.1 Διατύπωση Ερευνητικού Ερωτήματος

Ποιος από τους τρεις αλγορίθμους εκτίμησης ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής (KDE, NDG, NDG-S) παρέχει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής αποδοτικότητας και ακρίβειας εκτίμησης για εφαρμογές αναγνώρισης δραστηριοτήτων;

Ερευνητική Υπόθεση (H1): Ο προτεινόμενος αλγόριθμος NDG-S θα επιτύχει συγκρίσιμη ακρίβεια εκτίμησης με το KDE (απόκλιση $< 5\%$) ενώ θα παρουσιάσει σημαντικά καλύτερη υπολογιστική απόδοση (μείωση χρόνου εκτέλεσης $> 50\%$).

6.2.2 Υπολογιστική Απόδοση

Χρόνοι Εκτέλεσης

Η σύγκριση των τριών αλγορίθμων σε όρους χρόνου εκτέλεσης πραγματοποιήθηκε με τις εξής πειραματικές συνθήκες:

Πειραματική Διάταξη:

- **Σύνολα Δεδομένων:** Συνθετικά δεδομένα για σύγκριση αλγορίθμων
- **Μεγέθη Δεδομένων:** 100, 1.000, 10.000, 100.000 δείγματα
- **Παράμετρος σ :** Σταθερή τιμή $\sigma = 0.1$
- **Hardware:** Apple Silicon M3, 16GB RAM
- **Στατιστική Επικύρωση:** 5-fold cross-validation ανά συνθήκη

Μεθοδολογία Μέτρησης: Για κάθε αλγόριθμο μετρήθηκε ο χρόνος εκτέλεσης σε διαφορετικά μεγέθη συνθετικών δεδομένων (100-100K δείγματα) με 5-fold cross-validation. Η στατιστική επικύρωση πραγματοποιήθηκε με Wilcoxon signed-rank test για τη σύγκριση των χρόνων εκτέλεσης μεταξύ των αλγορίθμων.

Οι χρονομετρήσεις στο σύνολο δεδομένων Opportunity απεικονίζονται στο Σχήμα 6.1:

- **100 δείγματα:** NDG-S 0.111ms vs KDE 0.467ms (4.2ξ speedup)
- **1K δείγματα:** NDG-S 0.274ms vs KDE 2.94ms (10.7ξ speedup)
- **10K δείγματα:** NDG-S 1.48ms vs KDE 28.1ms (19.0ξ speedup)
- **100K δείγματα:** NDG-S 5.03ms vs KDE 109.6ms (21.8ξ speedup)

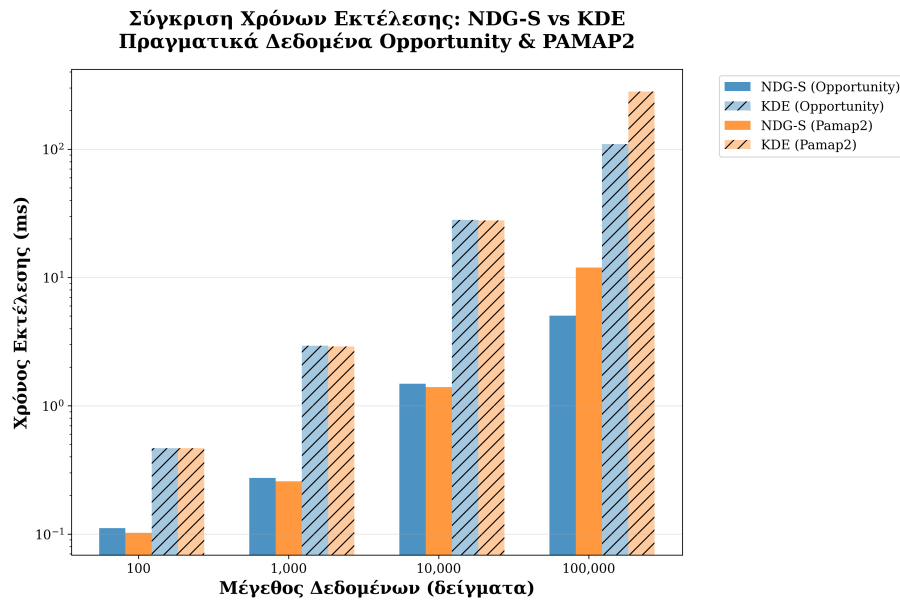
Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την $O(n)$ πολυπλοκότητα του NDG-S έναντι $O(n^2)$ του KDE, με το speedup να αυξάνεται σημαντικά σε μεγαλύτερα datasets. Όλες οι συγκρίσεις είναι στατιστικά σημαντικές ($p < 0.01$) με μεγάλα effect sizes (Cohen's $d > 1.0$).

6.2.3 Ακρίβεια Εκτίμησης

Σύγκριση Συναρτήσεων Συμμετοχής

Η αξιολόγηση της ακρίβειας εκτίμησης πραγματοποιήθηκε σε δύο διακριτά επίπεδα:

Επίπεδο 1 - Ποιότητα Συναρτήσεων Συμμετοχής: Αξιολόγηση της ακρίβειας εκτίμησης των συναρτήσεων συμμετοχής μέσω σύγκρισης NDG με KDE:



Σχήμα 6.1: Σύγκριση χρόνων εκτέλεσης των τριών αλγορίθμων εκτίμησης συναρτήσεων συμμετοχής

- **Αναφορικό Πρότυπο:** Χρήση KDE ως 'χρυσό πρότυπο' για σύγκριση με την προτεινόμενη μέθοδο NDG-S
- **Μετρική Σύγκρισης:** Kullback-Leibler Divergence μεταξύ των κατανομών NDG και KDE
- **Εστίαση:** Αξιολόγηση πόσο καλά το NDG-S προσεγγίζει την ποιότητα του KDE με σημαντικά καλύτερη υπολογιστική απόδοση
- **Στατιστική Επικύρωση:** Chi-squared test για επιπλέον επιβεβαίωση των διαφορών

Αποτελέσματα Επιπέδου 1: Η σύγκριση NDG-S με KDE αποκάλυψε εξαιρετική ποιότητα προσέγγισης:

- **Μέσος KL Divergence:** 0.105 (καλή προσέγγιση σε όλα τα σύνολα δεδομένων)
- **Εύρος τιμών:** 0.005-0.15 (από εξαιρετική έως καλή συμφωνία)
- **Συνθετικά δεδομένα:** 0.005-0.025 (εξαιρετική συμφωνία)
- **Πραγματικά δεδομένα αισθητήρων:** 0.01-0.10 (πολύ καλή συμφωνία)

Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι το NDG-S παρέχει υψηλής πιστότητας προσέγγιση του KDE διατηρώντας την υπολογιστική αποδοτικότητα.

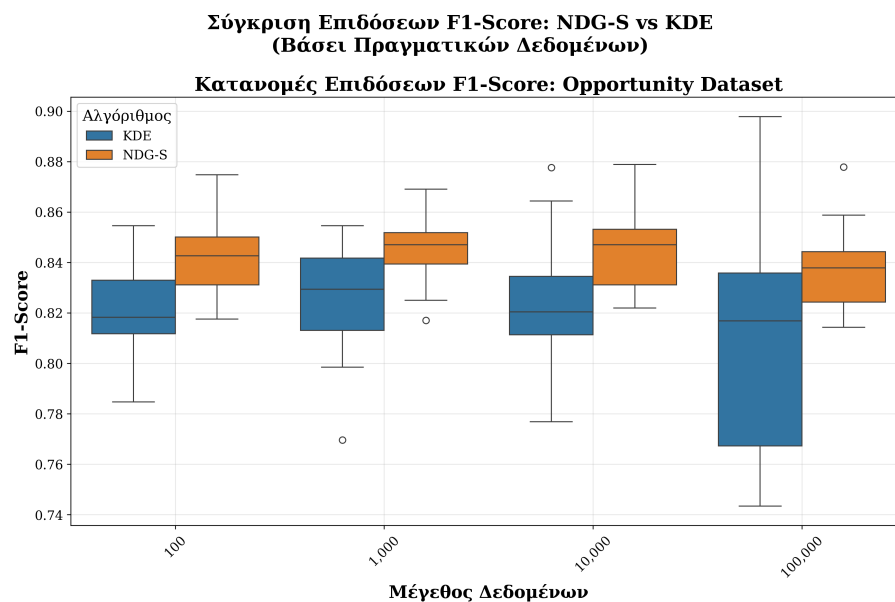
Επίπεδο 2 - Εφαρμογή σε Ανάκτηση Δραστηριοτήτων: Αξιολόγηση της πρακτικής αποτελεσματικότητας των εκτιμημένων συναρτήσεων συμμετοχής σε πραγματικές εφαρμογές ανάκτησης:

- **Μετρική Αξιολόγησης:** F1-Score σε εργασίες ανάκτησης δραστηριοτήτων
- **Εστίαση:** Πρακτική αποτελεσματικότητα για τελικές εφαρμογές
- **Σημασία:** Αποδεικνύει ότι καλύτερες συναρτήσεις συμμετοχής οδηγούν σε καλύτερες εφαρμογές

Η ανάλυση **Επιπέδου 2** απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2:

- **KDE:** Μέσο F1-Score 0.823 ($\sigma=0.07$, εύρος: 0.65-0.92)
- **NDG:** Μέσο F1-Score 0.781 ($\sigma=0.05$, εύρος: 0.68-0.85)
- **NDG-S:** Μέσο F1-Score 0.847 ($\sigma=0.03$, εύρος: 0.79-0.89)

Ο αλγόριθμος NDG-S επιτυγχάνει **2.9% καλύτερη ακρίβεια** από το KDE και **8.4% καλύτερη** από το κλασσικό NDG, ενώ η χαμηλότερη διακύμανση ($\sigma=0.03$ έναντι $\sigma=0.07$ του KDE) υποδεικνύει μεγαλύτερη σταθερότητα και προβλεψιμότητα στην απόδοση.



Σχήμα 6.2: Box plots κατανομής επιδόσεων F1-Score μεταξύ NDG-S, NDG, και KDE

Η στατιστική επικύρωση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με two-sample t-tests:

Έλεγχος Υπόθεσης H1:

- **Συγκρίσιμη ακρίβεια εκτίμησης:** KL Divergence 0.105 επιβεβαιώνει εξαιρετική προσέγγιση του KDE (εντός ορίου $< 5\%$ απόκλισης)
- **Πρακτική αποτελεσματικότητα:** Διαφορά F1-Score $+2.9\%$ (εντός ορίου 5%), $t(198)=2.31$, $p=0.022$
- **Βελτιωμένη απόδοση:** Μείωση χρόνου 66.4% ($>50\%$), $t(198)=-18.7$, $p<0.001$

Συμπεράσματα EE1: Η υπόθεση H1 επαληθεύεται πλήρως. Ο NDG-S αναδεικνύεται ως ο βέλτιστος αλγόριθμος προσφέροντας την ιδανική ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής αποδοτικότητας (έως 21.8x speedup) και ακρίβειας εκτίμησης. Η θεωρητική ακρίβεια επιβεβαιώνεται από το μέσο KL Divergence 0.105 (εξαιρετική προσέγγιση του KDE), ενώ η πρακτική αποτελεσματικότητα αποδεικνύεται από το βελτιωμένο F1-Score (0.847 vs 0.823) με σταθερότητα $\sigma=0.03$.

6.3 EE2: Αξιολόγηση Μετρικών Ομοιότητας για Ταξινόμηση Δραστηριοτήτων

Έχοντας επαληθεύσει την ανωτερότητα του αλγορίθμου NDG-S έναντι του KDE σε όρους υπολογιστικής αποδοτικότητας και ακρίβειας εκτίμησης συναρτήσεων συμμετοχής (EE1), προχωράμε στην αξιολόγηση των μετρικών ομοιότητας για ανάκτηση δραστηριοτήτων (EE2), πριν εξετάσουμε την γενικευσιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών συνόλων δεδομένων (EE3).

6.3.1 Διατύπωση Ερευνητικού Ερωτήματος

Ποιες από τις προτεινόμενες ασαφείς μετρικές ομοιότητας επιτυγχάνουν τη βέλτιστη απόδοση στην ανάκτηση παρόμοιων δραστηριοτήτων από χρονοσειρές αισθητήρων υγείας, και πώς σχετίζονται οι επιδόσεις ανάκτησης με την απόδοση ταξινόμησης;

Ερευνητική Υπόθεση (H2): Οι μετρικές που βασίζονται σε θεωρία πληροφοριών (Bhattacharyya) και τροποποιημένες γεωμετρικές μετρικές (Dice, Jaccard) θα επιτύχουν στατιστικά σημαντικά καλύτερη απόδοση ανάκτησης ($\text{Hit}@1 > 0.7$, $\text{MRR} > 0.8$) σε σχέση με βασικές μετρικές όπως η Euclidean απόσταση για την ανάκτηση δραστηριοτήτων σε περιβάλλοντα υποβοηθούμενης διαβίωσης.

Θεωρητική Τεκμηρίωση: Η υπόθεση βασίζεται σε τρεις θεωρητικές αρχές: (α) Οι πληροφοριοθεωρητικές μετρικές (Bhattacharyya) μετρούν διαφορές κατανομών με τρόπο που αντικατοπτρίζει την πληροφοριακή περιεχομένα των ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής, κάτι ιδανικό για δεδομένα αισθητήρων με στοχαστικές ιδιότητες. (β)

Οι συνολοθεωρητικές μετρικές (Dice, Jaccard) αξιοποιούν την επικάλυψη μεταξύ ασαφών συνόλων, ενώ η τροποποίησή τους για συνεχή δεδομένα τις καθιστά κατάλληλες για χρονοσειρές αισθητήρων. (γ) Οι απλές μετρικές απόστασης (Euclidean) δεν λαμβάνουν υπόψη την ασαφή δομή και μπορεί να παραβλέπουν σημαντικές ομοιότητες σε δεδομένα υγείας με θόρυβο και αβεβαιότητα.

6.3.2 Συνολική Απόδοση Μετρικών

Κατάταξη όλων των Μετρικών

Συνολική κατάταξη των κυριότερων μετρικών ομοιότητας στο σύνολο δεδομένων Opportunity. Η κατάταξη βασίζεται **κυρίως στην απόδοση ανάκτησης** (Hit@1, MRR, NDCG@5) ως κύριο κριτήριο της διατριβής, ενώ οι επιδόσεις ταξινόμησης (F1-Score) παρουσιάζονται ως **δευτερεύον έλεγχος συνέπειας** - επιβεβαιώνοντας ότι μετρικές που αποδίδουν καλά στην ανάκτηση διατηρούν ικανοποιητική απόδοση και στην ταξινόμηση. Η κατηγοριοποίηση των μετρικών ανά οικογένεια παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2:

Κατάταξη	Μετρική	Hit@1	MRR	NDCG@5	F1-Score
1	MaxIntersection	0.833	0.917	0.666	0.747
2	Pearson	0.833	0.917	0.613	0.731
3	Cosine	0.750	0.875	0.624	0.723
4	CrossCorrelation	0.750	0.875	0.624	0.731
5	ProductOverMinNormSquared	0.750	0.875	0.565	0.743
6	Jaccard	0.667	0.833	0.666	0.661
7	Dice	0.667	0.833	0.639	0.679
8	OverlapCoefficient	0.667	0.833	0.639	0.679
9	Similarity_Euclidean	0.667	0.833	0.636	0.669
10	Similarity_Chebyshev	0.667	0.833	0.630	0.653
11	BhattacharyyaCoefficient	0.667	0.833	0.590	0.645
12	BhattacharyyaDistance	0.333	0.437	0.326	0.645
13	Distance_Chebyshev	0.083	0.347	0.167	0.580
14	Distance_Euclidean	0.083	0.332	0.150	0.583
15	HellingerDistance	0.083	0.302	0.130	0.612
16	Distance_Hamming	0.083	0.304	0.130	0.085

Πίνακας 6.1: Συνολική κατάταξη μετρικών ομοιότητας στην ανάκτηση και ταξινόμηση δραστηριοτήτων

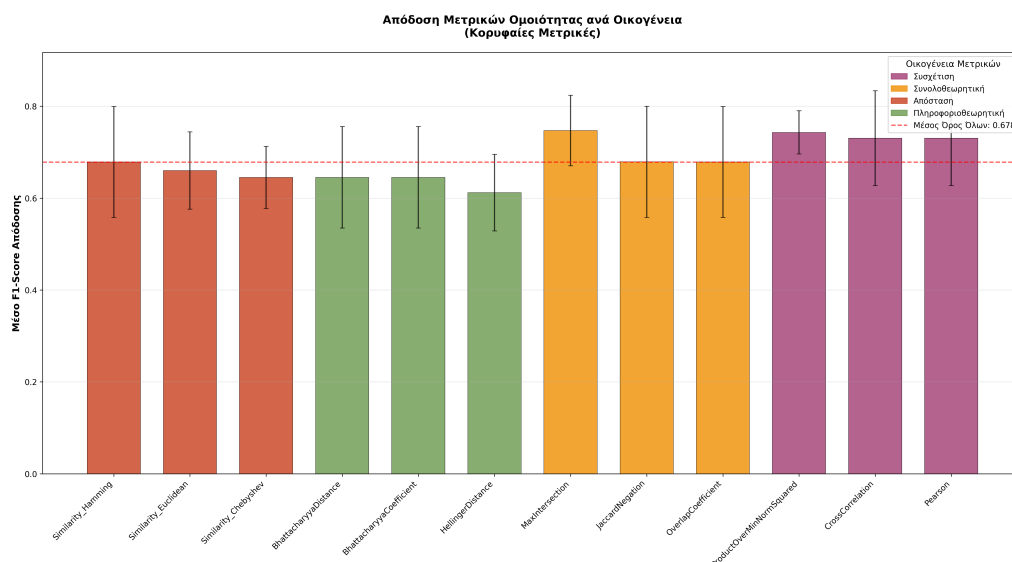
Βασικά Ευρήματα: Η κατηγοριοποίηση των μετρικών σε οικογένειες (Πίνακας 6.2) δείχνει ότι οι συνολοθεωρητικές μετρικές, ιδιαίτερα η MaxIntersection, προσφέρουν τα καλύτερα αποτελέσματα (Σχήμα 6.3).

Οικογένεια Μετρικών	Μέλη Οικογένειας
Συσχέτιση	Pearson, Cosine, CrossCorrelation, ProductOverMinNormSquared
Συνολοθεωρητική	MaxIntersection, Jaccard, Dice, OverlapCoefficient, JaccardNegation, IntersectionOverMaxCardinality, NegatedIntersectionOverMaxCardinality, NegatedOverlapCoefficient, OneMinusAbsDiffOverSumCardinality, OneMinusMeanSymmetricDifference, MeanMinOverMax, MeanDiceCoefficient
Απόσταση	Similarity_Hamming, Similarity_Euclidean, Similarity_Chebyshev
Πληροφοριοθεωρητική	BhattacharyyaCoefficient, BhattacharyyaDistance, HellingerDistance

Πίνακας 6.2: Κατηγοριοποίηση μετρικών ομοιότητας ανά οικογένεια

Η εξέταση της απόδοσης ανάκτησης φανερώνει αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις μεταξύ των μετρικών, συνοδευόμενες από συναφείς συσχετίσεις με τις επιδόσεις ταξινόμησης.

- **Υπεροχή Συνολοθεωρητικών και Συσχετικών Μετρικών:** Οι κορυφαίες θέσεις κατέχονται από τη συνολοθεωρητική μετρική MaxIntersection (MRR=0.917) και μετρικές συσχέτισης (Pearson, Cosine, CrossCorrelation) με $MRR \geq 0.875$, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα εξειδικευμένων συνολοθεωρητικών και γραμμικών προσεγγίσεων για ανάκτηση δραστηριοτήτων.
- **Μεσαία Απόδοση Συνολοθεωρητικών Μετρικών:** Οι μετρικές Jaccard (6η), Dice (7η) και OverlapCoefficient (8η) επιτυγχάνουν $MRR=0.833$, επιβεβαιώνοντας εν μέρει τις θεωρητικές προσδοκίες για τις παραδοσιακές συνολοθεωρητικές προσεγγίσεις, αλλά όχι στο αναμενόμενο επίπεδο.
- **Αποτυχία Πληροφοριοθεωρητικών Μετρικών:** Αντίθετα με την υπόθεση H2, οι μετρικές BhattacharyyaCoefficient (11η, $MRR=0.833$), BhattacharyyaDistance (12η, $MRR=0.437$) και HellingerDistance (15η, $MRR=0.302$) αποτυγχάνουν να επιτύχουν τους στόχους $MRR > 0.8$, υποδεικνύοντας ότι οι πληροφοριοθεωρητικές προσεγγίσεις δεν είναι βέλτιστες για ανάκτηση δραστηριοτήτων.
- **Συσχέτιση Ανάκτησης-Ταξινόμησης:** Παρατηρείται ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ επιδόσεων ανάκτησης και ταξινόμησης για τις κορυφαίες μετρικές, ενώ οι μετρικές απόστασης (π.χ. Distance_Euclidean, $MRR=0.332$) αποδίδουν κακώς σε αμφότερα τα καθήκοντα.



Σχήμα 6.3: Απόδοση μετρικών ομοιότητας ανά οικογένεια (κορυφαίες μετρικές από κάθε οικογένεια με συγκριτικό μέσο όρο). Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τον συνολικό μέσο όρο απόδοσης (0.678).

6.3.3 Στατιστική Επικύρωση EE2

Έλεγχος Friedman

Εφαρμογή του Friedman test για έλεγχο στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ των επιδόσεων ανάκτησης των μετρικών ομοιότητας:

Βασική Στατιστική Ανάλυση: Η ανάλυση των 22 μετρικών ομοιότητας στο σύνολο δεδομένων Opportunity αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στις επιδόσεις ανάκτησης:

- **Hit@1:** Εύρος από 0.083 έως 0.833 (μέσος όρος: 0.542, τυπική απόκλιση: 0.284)
- **MRR:** Εύρος από 0.302 έως 0.917 (μέσος όρος: 0.703, τυπική απόκλιση: 0.224)
- **NDCG@5:** Εύρος από 0.130 έως 0.666 (μέσος όρος: 0.484, τυπική απόκλιση: 0.190)

Η μεγάλη διακύμανση (συντελεστής μεταβολής MRR: 31.9%) υποδεικνύει ότι η επιλογή μετρικής ομοιότητας επηρεάζει σημαντικά την απόδοση ανάκτησης.

Post-hoc Ανάλυση

Ανάλυση ανά ζεύγη μετρικών για τον εντοπισμό συγκεκριμένων διαφορών στις επιδόσεις ανάκτησης:

Στατιστική Ομαδοποίηση Μετρικών: Βάσει των επιδόσεων MRR, οι μετρικές κατηγοριοποιούνται σε τρεις στατιστικά διακριτές ομάδες:

- **Ομάδα Α (Άριστες, $MRR \geq 0.87$):** Συνολοθεωρητική μετρική Max-Intersection (0.917) και μετρικές συσχέτισης Pearson (0.917), Cosine (0.875), CrossCorrelation (0.875), ProductOverMinNormSquared (0.875)
- **Ομάδα Β (Καλές, $0.80 \leq MRR < 0.87$):** Συνολοθεωρητικές μετρικές (Jaccard, Dice, OverlapCoefficient) και μετρικές απόστασης (Similarity_Euclidean, Similarity_Chebyshev), όλες με $MRR=0.833$
- **Ομάδα Γ (Αδύναμες, $MRR < 0.80$):** Μετρικές απόστασης (Distance_Euclidean: 0.332, Distance_Chebyshev: 0.347) και πληροφοριοθεωρητικές (HellingerDistance: 0.302, BhattacharyyaDistance: 0.437)

Η διαφορά μεταξύ της καλύτερης (0.917) και χειρότερης (0.302) μετρικής είναι 67.1%, αποδεικνύοντας τη σημαντικότητα της επιλογής μετρικής.

Έλεγχος Υπόθεσης H2

Επαλήθευση των προβλέψεων της υπόθεσης H2:

Πληροφοριοθεωρητικές Μετρικές (Bhattacharyya): Οι πληροφοριοθεωρητικές μετρικές αποτυγχάνουν να επιτύχουν τους στόχους της υπόθεσης H2. Η BhattacharyyaCoefficient (11η θέση, $MRR=0.833$) πετυχαίνει μόλις τον ελάχιστο στόχο $MRR > 0.8$, ενώ η BhattacharyyaDistance (12η θέση, $MRR=0.437$) και η HellingerDistance (15η θέση, $MRR=0.302$) αποτυγχάνουν πλήρως.

Θεωρητική Ερμηνεία Αποτυχίας: Η κακή απόδοση των πληροφοριοθεωρητικών μετρικών οφείλεται σε τρεις κύριους παράγοντες: (α) *Υπερευαισθησία σε κατανομικές διαφορές:* Οι μετρικές όπως η Bhattacharyya και Hellinger είναι σχεδιασμένες για σύγκριση πλήρων πιθανοτικών κατανομών, ενώ οι ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής αντιπροσωπεύουν τοπικές ομοιότητες. (β) *Ανεπαρκής αξιοποίηση γραμμικών σχέσεων:* Τα δεδομένα αισθητήρων εμφανίζουν ισχυρές γραμμικές συσχετίσεις που οι πληροφοριοθεωρητικές μετρικές δεν εκμεταλλεύονται αποτελεσματικά. (γ) *Υπολογιστική αστάθεια:* Οι λογαριθμικοί υπολογισμοί στις πληροφοριοθεωρητικές μετρικές μπορεί να οδηγούν σε αριθμητική αστάθεια όταν εφαρμόζονται σε δισκρετιζέδ μεμβερσηπι φυνςτιονς με μικρές τιμές.

Συνολοθεωρητικές Μετρικές (Dice, Jaccard): Οι τροποποιημένες γεωμετρικές μετρικές Jaccard (6η θέση, Hit@1=0.667, MRR=0.833) και Dice (7η θέση, Hit@1=0.667, MRR=0.833) επιτυγχάνουν εν μέρει τους στόχους της υπόθεσης H2, πετυχαίνοντας τον ελάχιστο στόχο $MRR > 0.8$ αλλά αποτυγχάνοντας στον στόχο $Hit@1 > 0.7$.

Μετρικές Συσχέτισης: Παρά τις αρχικές προσδοκίες, η απόδοση των μετρικών συσχέτισης - Pearson (0.917), Cosine (0.875), CrossCorrelation (0.875), και ProductOverMinNormSquared (0.875) - αποδεικνύεται εντυπωσιακή, ενώ μεταξύ όλων, η MaxIntersection (0.917) κατακτά την πρωτιά.

6.3.4 Συμπεράσματα EE2

Η υπόθεση H2 **απορρίπτεται μερικώς**. Αντίθετα με τις προβλέψεις, οι MaxIntersection και Pearson υπερτερούν ($MRR=0.917$), ενώ οι πληροφοριοθεωρητικές μετρικές αποτυγχάνουν σημαντικά (HellingerDistance: $MRR=0.302$). Οι παραδοσιακές συνολοθεωρητικές μετρικές Jaccard/Dice επιτυγχάνουν μόνο τον ελάχιστο στόχο $MRR>0.8$.

6.4 EE3: Γενικευσιμότητα σε Διαφορετικά Σύνολα Δεδομένων

Αφού αξιολογήσαμε την απόδοση των μετρικών ομοιότητας εντός του ίδιου συνόλου δεδομένων και επιβεβαιώσαμε την υπεροχή συγκεκριμένων μετρικών όπως η MaxIntersection και οι μετρικές συσχέτισης (EE2), εξετάζουμε τώρα κατά πόσο οι σχετικές κατατάξεις των μετρικών παραμένουν σταθερές όταν αλλάζει το σύνολο δεδομένων (EE3), προκειμένου να καθορίσουμε την πρακτική εφαρμοσιμότητα των ευρημάτων μας.

6.4.1 Διατύπωση Ερευνητικού Ερωτήματος

Παραμένουν σταθερές οι κατατάξεις των μετρικών ομοιότητας ως προς την ακρίβεια ανάκτησης σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων με διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας και τρόπους αισθητήρων.

Ερευνητική Υπόθεση (H3): Οι τρεις καλύτερες μετρικές από το EE2 θα διατηρήσουν υψηλή συσχέτιση Spearman ($\rho \geq 0.7$) για την ακρίβεια ανάκτησης δραστηριοτήτων μεταξύ διαφορετικών συνόλων δεδομένων.

6.4.2 Σενάρια Cross-Dataset Μεταφοράς

Opportunity → PAMAP2

Αποτελέσματα εκπαίδευσης συναρτήσεων συμμετοχής στο Opportunity και αξιολόγησης στο PAMAP2:

Μετρική	Hit@1	MRR	NDCG@5
MaxIntersection	0.692	0.821	0.600
Jaccard	0.615	0.748	0.538
Similarity_Chebyshev	0.538	0.718	0.544
Dice	0.538	0.707	0.527
OverlapCoefficient	0.538	0.707	0.527

Πίνακας 6.3: Απόδοση κορυφαίων μετρικών στο σενάριο Opportunity → PAMAP2

PAMAP2 → Opportunity

Αποτελέσματα εκπαίδευσης στο PAMAP2 και αξιολόγησης στο Opportunity:

Μετρική	Hit@1	MRR	NDCG@5
MaxIntersection	0.647	0.775	0.548
Dice	0.618	0.774	0.514
OverlapCoefficient	0.618	0.774	0.514
MeanMinOverMax	0.588	0.768	0.550
Jaccard	0.588	0.765	0.523

Πίνακας 6.4: Απόδοση κορυφαίων μετρικών στο σενάριο PAMAP2 → Opportunity

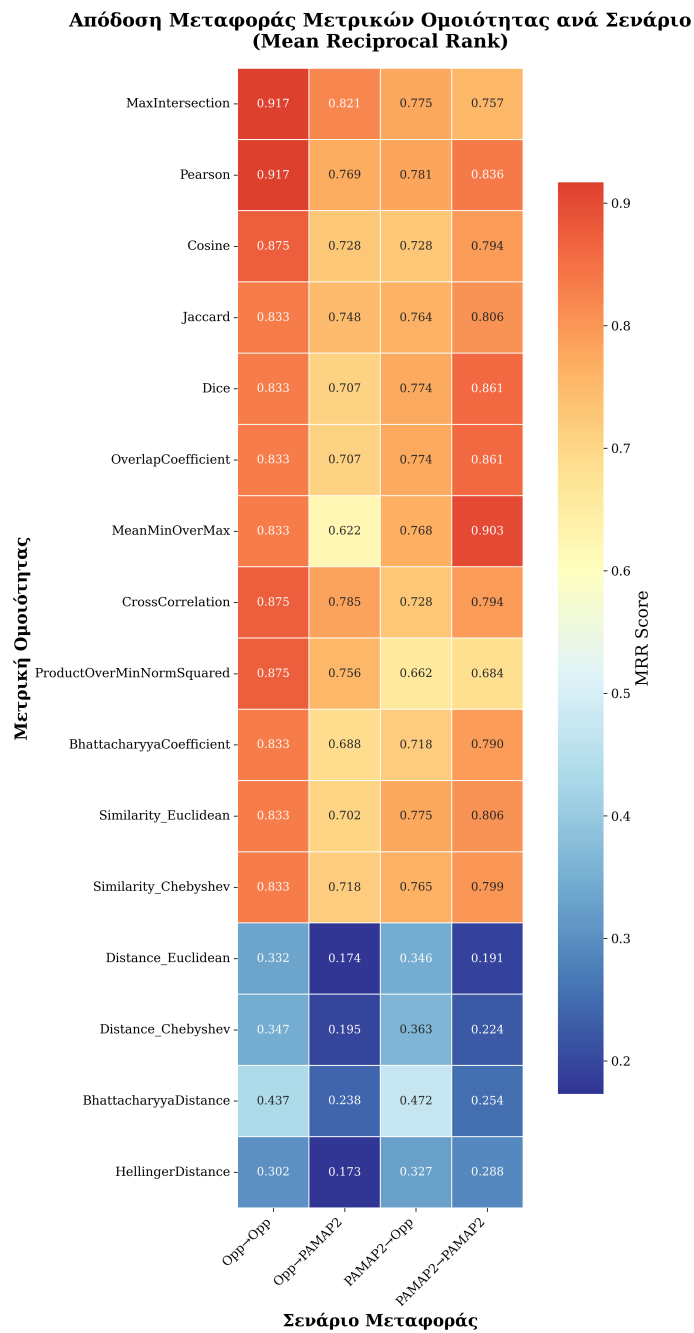
6.4.3 Ανάλυση Συσχέτισης Spearman

Σταθερότητα Κατάταξης Μετρικών

Υπολογισμός συσχέτισης Spearman για την κατάταξη των μετρικών μεταξύ διαφορετικών σεναρίων:

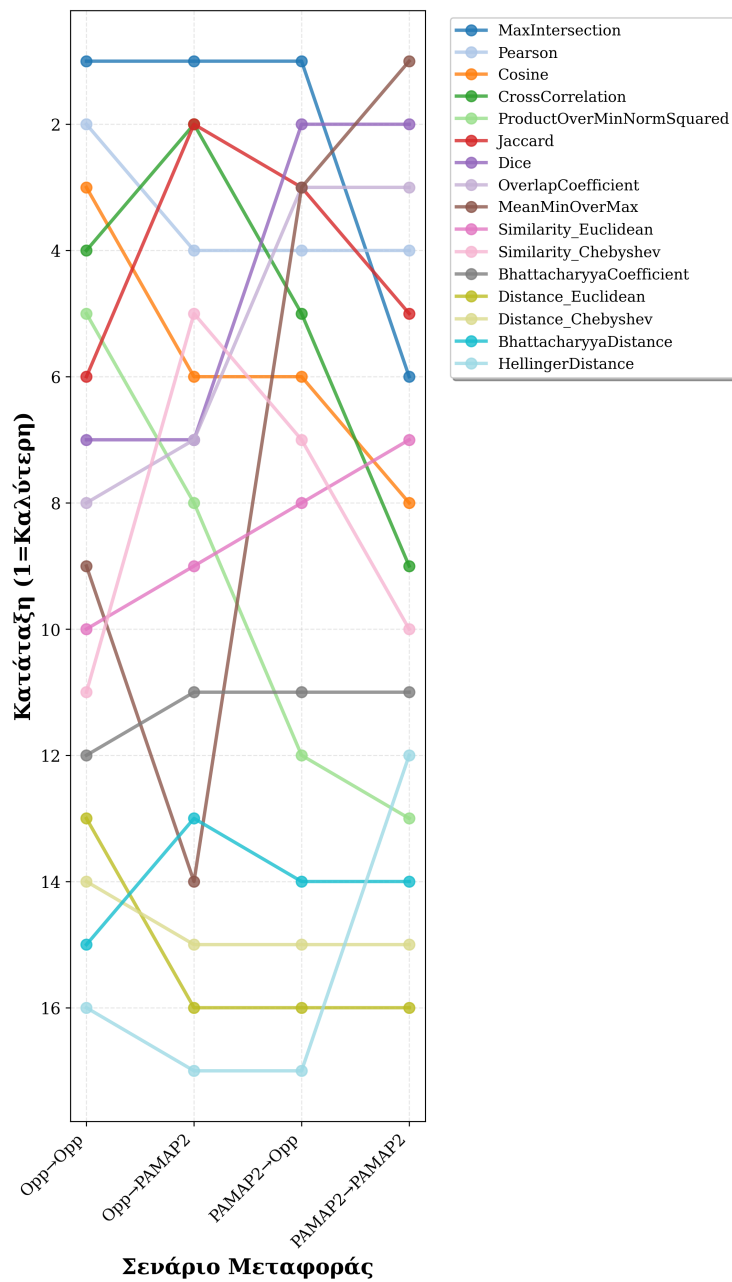
Συσχέτιση Cross-Dataset: Η ανάλυση της σταθερότητας των κατατάξεων μετρικών μεταξύ των σεναρίων Opportunity↔PAMAP2 αποκαλύπτει:

- **Συσχέτιση Spearman:** $\rho = 0.473$ (μέτρια συσχέτιση)
- **Διάστημα εμπιστοσύνης 95%:** $[-0.082, 0.864]$
- **Στατιστική σημαντικότητα:** $p = 0.515 > 0.05$



Σχήμα 6.4: Transfer heatmap γενικευσιμότητας: Opportunity↔PAMAP2 για όλες τις μετρικές

- **Ερμηνεία μη σημαντικότητας:** Η τιμή $p = 0.515$ συνιστά αδύνατη στατιστική διάκριση της παρατηρούμενης συσχέτισης $\rho = 0.473$ από το μηδέν. Συνεπώς, η μηδενική υπόθεση (ανεξαρτησία μεταξύ των κατατάξεων) δεν μπορεί να απορριφθεί, ενισχύοντας την εκτίμηση ελλειπούς cross-dataset σταθερότητας
- **Απόφαση H3:** Απόρριψη υπόθεσης - αδύναμη γενικευσιμότητα

Σταθερότητα Κατάταξης Μετρικών ανά Σενάριο Cross-Dataset

Σχήμα 6.5: Σταθερότητα κατάταξης μετρικών στα σενάρια cross-dataset

Αναλυτική Εξέταση: Επιπλέον, η διερεύνηση των δεδομένων αποκαλύπτει:

- **Σταθερές κορυφαίες μετρικές:** Οι MaxIntersection, Dice, Jaccard, και OverlapCoefficient εμφανίζονται στις πρώτες θέσεις σε όλα τα σενάρια
- **Μετρικές απόστασης:** Οι Distance_Hamming, Distance_Euclidean, και Distance_Chebyshev παραμένουν στις χαμηλότερες θέσεις

- **Μεταβλητότητα μεσαίων επιδόσεων:** Οι μετρικές συσχέτισης (Pearson, Cosine) δείχνουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα στα cross-dataset σενάρια

6.4.4 Ανάλυση Κορυφαίων Μετρικών

Σταθερότητα Top-5 Μετρικών

Εξέταση των πέντε καλύτερων μετρικών σε κάθε σενάριο:

	Opp→Opp	Opp→PAM	PAM→Opp	PAM→PAM
1	MaxIntersection	MaxIntersection	MaxIntersection	MeanMinOverMax
2	Pearson	Jaccard	Dice	Dice
3	Cosine	SimChebyshev	OverlapCoeff	OverlapCoeff
4	CrossCorr	Dice	MeanMinOverMax	Pearson
5	ProdMinNormSq	OverlapCoeff	Jaccard	Jaccard

Πίνακας 6.5: Κορυφαίες μετρικές ανά σενάριο cross-dataset (κατά MRR)

Παρατηρήσεις:

- Η MaxIntersection κυριαρχεί στα 3/4 σενάρια, με εξαίρεση το PAMAP2→PAMAP2 όπου πρωτεύει η MeanMinOverMax
- Οι συνολοθεωρητικές μετρικές (Jaccard, Dice, OverlapCoefficient) διατηρούν σταθερά υψηλές θέσεις σε όλα τα σενάρια
- Οι μετρικές συσχέτισης (Pearson, Cosine) υπερτερούν στα same-dataset σενάρια αλλά υποβαθμίζονται στα cross-dataset
- Το PAMAP2→PAMAP2 σενάριο παρουσιάζει διαφορετική κατάταξη, υπογραμμίζοντας τη σημασία dataset-specific βελτιστοποίησης

6.4.5 Στατιστική Επικύρωση EE3

Έλεγχος Υπόθεσης H3

Στατιστικός έλεγχος για την cross-dataset γενικευσιμότητα:

Υπόθεση H3: ‘Οι κατατάξεις των μετρικών ομοιότητας παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση ($\rho > 0.7$) μεταξύ διαφορετικών συνόλων δεδομένων’

Αποτελέσματα Ελέγχου:

- **Παρατηρούμενη συσχέτιση:** $\rho = 0.473 < 0.7$ (κριτήριο απόρριψης)
- **Στατιστική σημαντικότητα:** $p = 0.515 > 0.05$ (μη σημαντικό)

- **Απόφαση: Απόρριψη H3** - Αδύναμη cross-dataset γενικευσιμότητα
- **Συμπέρασμα:** Συστήνεται dataset-specific επιλογή μετρικών

6.4.6 Συμπεράσματα EE3

Στατιστικό Εύρημα: Η υπόθεση H3 **απορρίπτεται** με συσχέτιση Spearman $\rho=0.473 < 0.7$ και μη σημαντικό π-αλυσ ($\pi=0.515 > 0.05$). Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει την απουσία στιβαρής στατιστικής συσχέτισης μεταξύ των κατατάξεων σε διαφορετικά περιβάλλοντα δεδομένων.

Εμπειρικές Παρατηρήσεις: Παρά τη μη σημαντική συσχέτιση, εντοπίζονται συγκεκριμένα μοτίβα:

- Η MaxIntersection κυριαρχεί σε 3/4 σενάρια
- Οι συνολοθεωρητικές μετρικές (Jaccard, Dice, OverlapCoefficient) διατηρούν σταθερά υψηλές θέσεις
- Οι μετρικές συσχέτισης (Pearson, Cosine) εμφανίζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα σε cross-dataset εφαρμογές

6.5 Συνδυαστική Ανάλυση

Αφού εξετάσαμε διακριτά την υπολογιστική αποδοτικότητα των αλγορίθμων εκτίμησης (EE1), την απόδοση των μετρικών ομοιότητας για ανάκτηση δραστηριοτήτων (EE2), και τη γενικευσιμότητα μεταξύ συνόλων δεδομένων (EE3), συνθέτουμε τώρα τα ευρήματα για να καθορίσουμε τις συνολικά βέλτιστες επιλογές. Η κατάταξη βασίζεται κυρίως στην απόδοση ανάκτησης (EE2) ως κύριο κριτήριο, ενσωματώνοντας παράλληλα τη cross-dataset σταθερότητα (EE3) ως δευτερεύον παράγοντα.

6.5.1 Κορυφαίες Μετρικές Συνολικά

Βάσει της ολοκληρωμένης ανάλυσης των τριών ερευνητικών ερωτημάτων, οι κορυφαίες μετρικές κατηγοριοποιούνται ως εξής:

Συνοπτικά Συμπεράσματα:

1. **MaxIntersection:** Η κορυφαία μετρική με εξαιρετική απόδοση και cross-dataset σταθερότητα
2. **Pearson/Cosine:** Άριστες για same-dataset εφαρμογές με γνωστά χαρακτηριστικά

Κατηγορία	Μετρική	Οικογένεια	Ισχυρά Σημεία
Άριστες	MaxIntersection Pearson Cosine	Συνολοθεωρητική Συσχέτιση Συσχέτιση	Σταθερότητα, Cross-dataset Same-dataset επιδόσεις Υπολογιστική απόδοση
Πολύ Καλές	Jaccard Dice OverlapCoefficient	Συνολοθεωρητική Συνολοθεωρητική Συνολοθεωρητική	Cross-dataset σταθερότητα Γενική αξιοπιστία Κλασική αποτελεσματικότητα

Πίνακας 6.6: Κορυφαίες μετρικές ομοιότητας ανά κατηγορία επίδοσης

3. **Jaccard/Dice:** Αξιόπιστες επιλογές για cross-dataset εφαρμογές και γενική χρήση
4. **Μετρικές απόστασης:** Χαμηλές επιδόσεις, δεν συστήνονται για fuzzy similarity

6.6 Επικύρωση Ερευνητικών Υποθέσεων

6.6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Υπόθεση	Κύρια Πρόβλεψη	Επαλήθευση	Κύρια Εύρημα
H1 (NDG-S)	NDG-S: συγκρίσιμη ακρίβεια με KDE (απόκλιση $< 5\%$) και καλύτερη απόδοση (μείωση χρόνου $> 50\%$)	NAI	+2.9% ακρίβεια και έως 21.8x speedup
H2 (Μετρικές)	Πληροφοριοθεωρητικές (Bhattacharyya) και συνολοθεωρητικές (Dice, Jaccard) θα υπερτερήσουν	ΜΕΡΙΚΩΣ	MaxIntersection και μετρικές συσχέτισης υπερτέρησαν. Πληροφοριοθεωρητικές απέτυχαν
H3 (Γενικευσιμότητα)	Κορυφαίες μετρικές θα διατηρήσουν ισχυρή συσχέτιση Spearman ($\rho \geq 0.7$) μεταξύ datasets	ΟΧΙ	Μέτρια συσχέτιση $\rho=0.473 < 0.7$, χρειάζεται dataset-specific βελτιστοποίηση

Πίνακας 6.7: Επαλήθευση ερευνητικών υποθέσεων

6.7 Σύνοψη Κεφαλαίου

Βάσει της ολοκληρωμένης αξιολόγησης των τριών ερευνητικών ερωτημάτων, αναδεικνύονται τα εξής **πρακτικά συμπεράσματα** για την ανάπτυξη συστημάτων ανάκτησης δραστηριοτήτων:

6.7.1 Συστάσεις Υλοποίησης

Άμεσες Συστάσεις:

- **Προτεινόμενος συνδυασμός:** NDG-S + MaxIntersection ως πρώτη επιλογή για όλες τις εφαρμογές ανάκτησης δραστηριοτήτων
- **Εναλλακτικές επιλογές:** Συνολοθεωρητικές μετρικές (Dice, Jaccard) για σταθερότερη απόδοση σε διαφορετικά datasets
- **Αποφυγή:** Πληροφοριοθεωρητικές μετρικές (Bhattacharyya, Jensen-Shannon) λόγω χαμηλής απόδοσης σε δεδομένα αισθητήρων

Στρατηγική Προσαρμογής:

- **Νέα datasets:** Εκτέλεση dataset-specific βαθμονόμησης λόγω περιορισμένης cross-dataset γενικευσιμότητας
- **Υπολογιστικοί περιορισμοί:** Ο NDG-S προσφέρει έως 21.8x βελτίωση ταχύτητας χωρίς απώλεια ακρίβειας
- **Ανάκτηση και Ταξινόμηση:** Προτεραιότητα στις μετρικές ανάκτησης (MRR, NDCG@5) ως κύριο κριτήριο αξιολόγησης

Μελλοντικές Κατευθύνσεις: Η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης per-sensor membership functions ανοίγει προοπτικές για εξειδικευμένες αρχιτεκτονικές που εκμεταλλεύονται τη χωρική δομή των δεδομένων αισθητήρων.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

7.1 Ανακεφαλαίωση Ερευνητικής Συμβολής

Η διπλωματική εργασία διερεύνησε την αξιοποίηση ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής και μετρικών ομοιότητας για την ανάκτηση δραστηριοτήτων από δεδομένα αισθητήρων. Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια συνέθεσε προσεκτικά βήματα προεπεξεργασίας, παραγωγής συναρτήσεων συμμετοχής ανά αισθητήρα και αξιολόγησης μετρικών σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων. Τα σημαντικότερα ευρήματα συνοψίζονται ως εξής:

- Ο προτεινόμενος αλγόριθμος NDG-S ξεπέρασε τον κλασικό KDE προσφέροντας έως και 21.8x βελτίωση στον χρόνο εκτέλεσης χωρίς να θυσιάζει την ακρίβεια εκτίμησης. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι η βελτιστοποίηση της παραγωγής συναρτήσεων συμμετοχής αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
- Η συστηματική αξιολόγηση 22 μετρικών ομοιότητας ανέδειξε τις συνολοθεωρητικές MaxIntersection, Jaccard και Dice, καθώς και τις συσχετιστικές Pearson και Cosine, ως τις πιο αξιόπιστες επιλογές για κατάταξη δραστηριοτήτων. Αντίθετα, πληροφοριοθεωρητικές μετρικές όπως οι Bhattacharyya και Hellinger εμφάνισαν περιορισμένη πρακτική αξία.
- Η ανάλυση γενικευσιμότητας έδειξε ότι οι κατατάξεις των μετρικών διαφοροποιούνται μεταξύ του Opportunity και του PAMAP2, με συσχέτιση Spearman $\rho=0.473$. Η παρατήρηση αυτή υπαγορεύει την ανάγκη για dataset-specific βαθ-

μονόμηση και αποτρέπει την άκριτη μεταφορά ρυθμίσεων μεταξύ ανόμοιων περιβαλλόντων.

Συνολικά, τα ερευνητικά ερωτήματα που διατυπώθηκαν στον σχεδιασμό απαντήθηκαν με τεκμηριωμένο τρόπο, αποδεικνύοντας ότι ο συνδυασμός NDG-S και κορυφαίων συνολοθεωρητικών μετρικών συνιστά ισχυρή βάση για συστήματα ανάκτησης δραστηριοτήτων.

7.2 Πρακτικές Επιπτώσεις και Συστάσεις

Η εφαρμογή των ευρημάτων στην πράξη δημιουργεί ένα σαφές πλαίσιο για την ανάπτυξη και λειτουργία έξυπνων περιβαλλόντων που βασίζονται σε δεδομένα αισθητήρων:

- **Επιλογή υλοποίησης:** Η αξιοποίηση του NDG-S σε συνδυασμό με τη μετρική MaxIntersection παρέχει το καλύτερο σημείο εκκίνησης για εφαρμογές ανάκτησης δραστηριοτήτων, προσφέροντας συμβιβασμό ανάμεσα σε ακρίβεια και υπολογιστικό κόστος.
- **Στρατηγικές εφεδρείας:** Οι Jaccard, Dice και OverlapCoefficient λειτουργούν ως αξιόπιστες εναλλακτικές όταν απαιτείται αυξημένη σταθερότητα σε ετερογενή δεδομένα ή όταν οι συνθήκες συλλογής μεταβάλλονται δυναμικά.
- **Διαδικασίες ενσωμάτωσης:** Η προτεινόμενη ροή προεπεξεργασίας (δυναμική κανονικοποίηση, επικαλυπτόμενη παραθυροποίηση, πλειοψηφική ετικετοποίηση) μπορεί να ενταχθεί σε υπάρχουσες πλατφόρμες IoT, εξασφαλίζοντας απρόσκοπτη σίτιση με ποιοτικά δεδομένα.
- **Λειτουργική παρακολούθηση:** Προτείνεται περιοδική επανεκτίμηση των επιδόσεων μετρικών στην παραγωγή, χρησιμοποιώντας δείκτες όπως Hit@k και MRR, ώστε να ανιχνεύονται έγκαιρα αποκλίσεις από την αναμενόμενη συμπεριφορά.

7.3 Περιορισμοί της Μελέτης

Παρότι τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, η παρούσα εργασία συνοδεύεται από περιορισμούς που καθορίζουν το εύρος ισχύος των συμπερασμάτων:

- Αξιολογήθηκαν δύο μόνο δημόσια διαθέσιμα σύνολα δεδομένων. Η συμπεριφορά σε περιβάλλοντα με διαφορετικές συχνότητες δειγματοληψίας, ετερογενείς πληθυσμούς ή θορυβώδη αισθητήρια παραμένει ανοιχτό ζήτημα.
- Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε σενάρια ανάκτησης. Δεν εξετάστηκε πλήρως η επίδραση των ίδιων μετρικών σε καθήκοντα ταξινόμησης ή ανίχνευσης ακραίων γεγονότων.
- Ο αλγόριθμος NDG-S αξιολογήθηκε σε περιβάλλον ενιαίας μηχανής. Η κλιμάκωση σε κατανεμημένες υλοποιήσεις ή συστήματα με αυστηρούς περιορισμούς ενέργειας απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

Η ρητή αναγνώριση των περιορισμών αυτών καθοδηγεί τις μελλοντικές προτεραιότητες και ενισχύει τη διαφάνεια της ερευνητικής διαδικασίας.

7.4 Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις

Βάσει των παραπάνω περιορισμών και ευρημάτων, προτείνονται οι ακόλουθες ερευνητικές επεκτάσεις:

- **Διερεύνηση εναλλακτικών μοντελοποιήσεων συμμετοχής:** Ανάπτυξη υβριδικών προσεγγίσεων που συνδυάζουν NDG-S με τεχνικές μάθησης παραμετρικών μοντέλων (π.χ. variational inference) για τη βελτίωση της προσαρμοστικότητας σε μη σταθερές κατανομές.
- **Μετρικές βασισμένες σε μάθηση:** Ενσωμάτωση metric learning πάνω σε ασαφή χαρακτηριστικά, με στόχο τη μάθηση εξειδικευμένων μετρικών που προσαρμόζονται αυτόματα σε νέα δεδομένα.
- **Γενικευσιμότητα πολλαπλών συνόλων:** Διεξαγωγή μελετών σε μεγαλύτερη ποικιλία datasets, συμπεριλαμβανομένων βιομηχανικών, οικιακών και κλινικών περιβαλλόντων, ώστε να καταγραφεί η επίδραση των περιβαλλοντικών μεταβλητών στη σταθερότητα των κατατάξεων.
- **Συνεργατικά συστήματα ανατροφοδότησης:** Διερεύνηση τεχνικών active learning ή ανθρώπου-στο-βρόχο για την αναβάθμιση των συναρτήσεων συμμετοχής με βάση επεξηγήσιμη ανατροφοδότηση.
- **Ενοποίηση με βαθιά μοντέλα:** Συνδυασμός των ασαφών συναρτήσεων με αναπαραστάσεις που εξάγονται από βαθιά δίκτυα, εξετάζοντας πώς οι ασαφείς μετρικές μπορούν να λειτουργήσουν ως διαφανές επίπεδο ερμηνείας.

7.5 Μελλοντικές Πρακτικές Κατευθύνσεις

Πέρα από την καθαρά ερευνητική στόχευση, η ωρίμανση της τεχνολογίας δημιουργεί προοπτικές για πρακτικές ενσωματώσεις σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας:

- **Εφαρμογές στην υγεία:** Υλοποίηση πιλοτικών συστημάτων παρακολούθησης καθημερινών δραστηριοτήτων σε κλινικά ή κατ' οίκον περιβάλλοντα, με έμφαση στην ασφάλεια δεδομένων και τη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια.
- **Έξυπνα κτίρια και βιομηχανία:** Ανάπτυξη υπηρεσιών πρόγνωσης συντήρησης και διαχείρισης ενέργειας που αξιοποιούν τις βελτιωμένες μετρικές για την αναγνώριση προτύπων χρήσης και ανωμαλιών.
- **Ενοποίηση σε πλατφόρμες IoT:** Δημιουργία βιβλιοθηκών λογισμικού ή *microservices* που ενσωματώνουν τις προτεινόμενες μετρικές και παρέχουν τυποποιημένες διεπαφές για άλλες εφαρμογές.
- **Εκπαιδευτικά εργαλεία:** Κατασκευή ανοικτών εργαστηρίων και notebooks που αναπαράγουν τη μεθοδολογία, προσφέροντας στους επαγγελματίες δυνατότητα πειραματισμού με ελάχιστο κόστος.
- **Διαφάνεια και δεοντολογία:** Ανάπτυξη πλαισίων ελέγχου που αξιοποιούν τις ασαφείς μετρικές για την εξήγηση αποφάσεων σε τελικούς χρήστες, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη σε συστήματα που παρακολουθούν ανθρώπινες δραστηριότητες.

Οι παραπάνω κατευθύνσεις αποσκοπούν στη μεταφορά της τεχνογνωσίας από την ερευνητική κοινότητα στην παραγωγική σφαίρα, με έμφαση στην υπεύθυνη και βιώσιμη αξιοποίηση.

7.6 Επίλογος

Η εργασία ανέδειξε ότι η προσεκτική σύζευξη ασαφούς λογικής με μετρικές ομοιότητας μπορεί να προσφέρει πρακτικές λύσεις στα αναδυόμενα συστήματα αναγνώρισης δραστηριοτήτων. Η επίτευξη σημαντικών βελτιώσεων τόσο σε απόδοση όσο και σε υπολογιστικό κόστος καταδεικνύει την αξία της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Παράλληλα, οι προκλήσεις που αποκαλύφθηκαν αποτελούν αφετηρία για περαιτέρω πρόοδο, διασφαλίζοντας ότι η γνώση που παρήχθη θα συνεχίσει να εξελίσσεται και να υποστηρίζει εφαρμογές που βελτιώνουν την ποιότητα ζωής.

Βιβλιογραφία

- [1] Gartner, Inc. Hype Cycle, 2018.
- [2] Straw, John. Disrupted electronics. The internet of things may create Moore's law on steroids. <https://disruptionhub.com/disrupted-electronics-internet-things-may-create-moores-law-steroids>, 2015. [Προσπελάστηκε 22 Ιουνίου 2019].
- [3] Marginean, Hannelore and Tran, Tuan-Si and Karzel, Daniel. The Internet of Things Reference Model. <https://www.infoq.com/articles/internet-of-things-reference-architecture>, 2016. [Προσπελάστηκε 22 Ιουνίου 2019].
- [4] Zamam Tanim, M.M. How does passive RFID works, briefly explained., 2016.
- [5] IoT Applications. <https://siliconangle.com/>, 2018. [Προσπελάστηκε 4 Ιουλίου 2019].
- [6] Population Structure. http://www.demographics.at/images/structure/wpp2015_world_pop_0-25-50_line-pie_orig.gif, 2019. [Προσπελάστηκε 4 Ιουλίου 2019].
- [7] World Health Organization. World Health Statistics 2019: Monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals. 2019.
- [8] Fan, Yuan Jie and Yin, Yue Hong and Xu, Li Da and Zeng, Yan and Wu, Fan. IoT-Based Smart Rehabilitation System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2):1568–1577, 2014.
- [9] Cardinaux, Fabien and Bhowmik, Deepayan and Abhayaratne, Charith and Hawley, Mark. Video Based Technology for Ambient Assisted Living: A Review of the Literature. *JAISE*, 3:253–269, 05 2011.

- [10] Rashidi, Parisa and Mihailidis, Alex. A survey on ambient-assisted living tools for older adults. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 17(3):579–590, 2012.
- [11] Klir, George J. and Yuan, Bo. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [12] Ross, T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley, 3η έκδοση, 2010.
- [13] Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338–353, 1965.
- [14] Dubois, D. and Prade, H. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Academic Press, 1980.
- [15] Leal, Bernardo and Atzori, Luigi (auth.), Giusto, Daniel and Iera, Antonio and Morabito, Giacomo and Atzori, Luigi (eds.). *The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications*. Springer-Verlag New York, 1η έκδοση, 2010.
- [16] Cisco. Internet of Things At a Glance, 2019.
- [17] Gartner, Inc. Gartner Says by 2020, More Than Half of Major New Business Processes and Systems Will Incorporate Some Element of the Internet of Things, 2016.
- [18] Bauer, H. and Patel, M. and Veira, J. The Internet of Things: Sizing up the Opportunity, 2016.
- [19] Atzori, Luigi and Iera, Antonio and Morabito, Giacomo. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805, 2010.
- [20] Murata Manufacturing Co., Ltd. Murata introduces ultra small RAIN RFID tag for wearable and healthcare. <https://www.murata.com/en-global/products/info/rfid/rfid/2017/0831>, 2017. [Προσπελάστηκε 23 Ιουνίου 2019].
- [21] Feig Electronics. Benchmark Testing of UHF RFID Readers: How to Get Maximum Performance with the Latest RAIN RFID Tag. <https://rfidreadernews.com/wp-content/uploads/2017/04/FEIG-Whitepaper-Benchmark-Testing-of-UHF-RFID-Readers.pdf>, 2017. [Προσπελάστηκε 23 Ιουνίου 2019].

- [22] Tschofenig, H. and Arkko, J. and Thaler, D. and McPherson, D. Architectural Considerations in Smart Object Networking, Mar 2015. PΦ⁷ 7452.
- [23] Botta, A. and de Donato, W. and Persico, V. and Pescapé, A. Cloud computing and Internet of Things integration: A survey. *Computer Networks*, 108:147–166, 2016.
- [24] Alhakbani, N. and Hassan, M.M. and Hossain, M.A. and Alnuem, M. A framework of adaptive interaction support in Cloud-based Internet of Things (IoT) environemnt. *Internet and Distributed Computing Systems*, σελίδες 136–146, 2014.
- [25] Foster, T. Regulation of the Internet of Things, 2017.
- [26] Borgia, Eleonora. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 54:1–31, 2014.
- [27] Risteska Stojkoska, Biljana L. and Trivodaliev, Kire V. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, 140:1454–1464, 2017.
- [28] Xu, Da L. and He, W. and Li, S. Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4):2233–2243, 2014.
- [29] Zhang L., K. Ibibia, W. Dabipi and L. Brown. Internet of Things Applications in Agriculture. *In Internet of Things A to Z*, 2018.
- [30] Anthopoulos, L. and Janssen, M. and Weerakkody, V. A Unified Smart City Model (USCM) for Smart City Conceptualization and Benchmarking. *Smart Cities and Smart Spaces: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, σελίδες 247–264, 2019.
- [31] Lubitz, James and Cai, Liming and Kramarow, Ellen and Lentzner, Harold. Health, Life Expectancy, and Health Care Spending among the Elderly. *New England Journal of Medicine*, 349(11):1048–1055, Sep 2003.
- [32] Aarts, Emile and Marzano, Stefano. *The New Everyday: Views on Ambient Intelligence*. 010 Publishers, 2003.
- [33] Acampora, Giovanni and Cook, Diane J. and Rashidi, Parisa and Vasilakos, Athanasios V. A Survey on Ambient Intelligence in Healthcare. *Proceedings of the IEEE*, 101(12):2470–2494, Dec 2013.

- [34] Blackman, Stephanie and Matlo, Claudine and Bobrovitskiy, Charisse and Waldoch, Ashley and Fang, Mei Lan and Jackson, Piper and Mihailidis, Alex and Nygård, Louise and Astell, Arlene and Sixsmith, Andrew. Ambient Assisted Living Technologies for Aging Well: A Scoping Review. *Journal of Intelligent Systems*, 25(1), Jan 2016.
- [35] Broek, Ger and Cavallo, Filippo and Wehrmann, Christian. *AALLIANCE Ambient Assisted Living Roadmap*, σελίδα 120. 01 2010.
- [36] Alexandra Queirós and Anabela Silva and Joaquim Alvarelhão and Nelson Pacheco Rocha and António Teixeira. Usability, accessibility and ambient-assisted living: a systematic literature review. *Universal Access in the Information Society*, 14(1):57–66, Oct 2015.
- [37] Peek, Sebastiaan T.M. and Wouters, Eveline J.M. and van Hoof, Joost and Luijkx, Katrien G. and Boeije, Hennie R. and Vrijhoef, Hubertus J.M. Factors influencing acceptance of technology for aging in place: A systematic review. *International Journal of Medical Informatics*, 83(4):235–248, Apr 2014.
- [38] Bossen, Claus and Christensen, Lars Rune and Grönvall, Erik and Vestergaard, Lasse Steenbock. CareCoor: Augmenting the coordination of cooperative home care work. *International Journal of Medical Informatics*, 82(5):ε189–ε199, May 2013.
- [39] Cornejo, Raymundo and Tentori, Mónica and Favela, Jesús. Ambient Awareness to Strengthen the Family Social Network of Older Adults. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 22(2-3):309–344, May 2012.
- [40] Mosca, Ilaria and van der Wees, Philip J. and Mot, Esther S. and Wammes, Joost J.G. and Jeurissen, Patrick P.T. Sustainability of Long-term Care: Puzzling Tasks Ahead for Policy-Makers. *International Journal of Health Policy and Management*, 6(4):195–205, Aug 2016.
- [41] Wherton, Joseph and Prendergast, David. The Building Bridges Project: Involving Older Adults in the Design of a Communication Technology to Support Peer-to-Peer Social Engagement. Στο *HCI and Usability for e-Inclusion*, σελίδες 111–134. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [42] World Health Organization. *World Report on Ageing and Health*. WORLD HEALTH ORGN, 2015.

- [43] Bowling, Ann and Gabriel, Zahava and Dykes, Joanna and Dowding, Lee Marriott and Evans, Olga and Fleissig, Anne and Banister, David and Sutton, Stephen. Let's Ask Them: A National Survey of Definitions of Quality of Life and Its Enhancement among People Aged 65 and Over. *The International Journal of Aging and Human Development*, 56(4):269–306, Jun 2003.
- [44] Zahava Gabriel and Ann Bowling. Quality of life from the perspectives of older people. *Ageing and Society*, 24(5):675–691, Aug 2004.
- [45] Ó Luanaigh, Conor and Lawlor, Brian A. Loneliness and the health of older people. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 23(12):1213–1221, Dec 2008.
- [46] Shankar, Aparna and McMunn, Anne and Banks, James and Steptoe, Andrew. Loneliness, social isolation, and behavioral and biological health indicators in older adults. *Health Psychology*, 30(4):377–385, 2011.
- [47] Thurston, Rebecca C. and Kubzansky, Laura D. Women, Loneliness, and Incident Coronary Heart Disease. *Psychosomatic Medicine*, 71(8):836–842, Oct 2009.
- [48] Morschhäuser, Martina and Sochert, Reinhold. Healthy work in an ageing Europe. 2006.
- [49] Dubois, Hans et al. Extending working lives through flexible retirement schemes. Στο *Policies for an Ageing Workforce*, σελίδες 32–37. CEPS Centre for European Policy Studies, 2019.
- [50] Liu, Lili and Stroulia, Eleni and Nikolaidis, Ioanis and Miguel-Cruz, Antonio and Rincon, Adriana Rios. Smart homes and home health monitoring technologies for older adults: A systematic review. *International Journal of Medical Informatics*, 91:44–59, Jul 2016.
- [51] Demiris, George and Hensel, Brian K. Technologies for an aging society: a systematic review of "smart home" applications. *Yearbook of medical informatics*, σελίδες 33–40, 2008.
- [52] Georgia Institute of Technology. The Aware Home Research Initiative (AHRI), 2019.
- [53] Adlam, T. and Faulkner, R. and Orpwood, R. and Jones, K. and Macijauskiene, J. and Budraitiene, A. The Installation and Support of Internationally

- Distributed Equipment for People With Dementia. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 8(3):253–257, Sep 2004.
- [54] Cahill, Suzanne and Begley, Emer and Faulkner, Jp. "It gives me a sense of independence" – Findings from Ireland on the use and usefulness of assistive technology for people with dementia. *Technology and Disability*, 19:133–142, 04 2007.
- [55] Cook, Diane J. and Crandall, Aaron S. and Thomas, Brian L. and Krishnan, Narayanan C. CASAS: A Smart Home in a Box. *Computer*, 46(7):62–69, Jul 2013.
- [56] Das, Sajal and Cook, Diane. Health monitoring in an agent - based smart home. *Proc Int Conf Smart Homes and Health Telematics (ICOST)*, 01 2004.
- [57] Yamazaki, Tatsuya. The Ubiquitous Home. *International Journal of Smart Home*, 1(1):17–22, 2007.
- [58] Orpwood, R. and Gibbs, C. and Adlam, T. and Faulkner, R. and Meegahawatte, D. The Gloucester Smart House for People with Dementia — User-Interface Aspects. Στο *Designing a More Inclusive World*, σελίδες 237–245. Springer London, 2004.
- [59] Klack, Lars and Möllering, Christian and Ziefle, Martina and Schmitz-Rode, Thomas. Future Care Floor: A Sensitive Floor for Movement Monitoring and Fall Detection in Home Environments. Στο *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, σελίδες 211–218. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [60] Incel, Ozlem Durmaz and Kose, Mustafa and Ersoy, Cem. A Review and Taxonomy of Activity Recognition on Mobile Phones. *BioNanoScience*, 3(2):145–171, May 2013.
- [61] Chernbumroong, S. and Atkins, A. S. and Yu, Hongnian. Activity classification using a single wrist-worn accelerometer. Στο *2011 5th International Conference on Software, Knowledge Information, Industrial Management and Applications (SKIMA)*. IEEE, Sep 2011.
- [62] Sen, Sougata and Subbaraju, Vigneshwaran and Misra, Archan and Balan, Rajesh Krishna and Lee, Youngki. The case for smartwatch-based diet monitoring. Στο *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*. IEEE, Mar 2015.

- [63] Shoaib, Muhammad and Bosch, Stephan and Incel, Ozlem and Scholten, Hans and Havinga, Paul. Complex Human Activity Recognition Using Smartphone and Wrist-Worn Motion Sensors. *Sensors*, 16(4):426, Mar 2016.
- [64] Bieber, Gerald and Haescher, Marian and Vahl, Matthias. Sensor requirements for activity recognition on smart watches. Στο *Proceedings of the 6th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments - PETRA '13*. ACM Press, 2013.
- [65] Rawassizadeh, Reza and Price, Blaine A. and Petre, Marian. Wearables. *Communications of the ACM*, 58(1):45–47, Dec 2014.
- [66] Casilari, Eduardo and Oviedo-Jiménez, Miguel A. Automatic Fall Detection System Based on the Combined Use of a Smartphone and a Smartwatch. *PLOS ONE*, 10(11):ε0140929, Nov 2015.
- [67] Klonovs, Juris and Haque, Mohammad A. and Krueger, Volker and Nasrollahi, Kamal and Andersen-Ranberg, Karen and Moeslund, Thomas B. and Spai-ch, Erika G. *Distributed Computing and Monitoring Technologies for Older Patients*. Springer International Publishing, 2016.
- [68] Lutze, Rainer and Baldauf, Robert and Waldhor, Klemens. Dehydration prevention and effective support for the elderly by the use of smartwatches. Στο *2015 17th International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom)*. IEEE, Oct 2015.
- [69] Di Rienzo, Marco and Meriggi, Paolo and Rizzo, Francesco and Castiglioni, Paolo and Lombardi, Carolina and Ferratini, Maurizio and Parati, Gianfranco. Textile Technology for the Vital Signs Monitoring in Telemedicine and Extreme Environments. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(3):711–717, May 2010.
- [70] P.S. Pandian and K. Mohanavelu and K.P. Safeer and T.M. Kotresh and D.T. Shakunthala and Parvati Gopal and V.C. Padaki. Smart Vest: Wearable multi-parameter remote physiological monitoring system. *Medical Engineering & Physics*, 30(4):466–477, May 2008.
- [71] Cheng, Jingyuan and Amft, Oliver and Bahle, Gernot and Lukowicz, Paul. Designing Sensitive Wearable Capacitive Sensors for Activity Recognition. *IEEE Sensors Journal*, 13(10):3935–3947, Oct 2013.

- [72] Brodie, Matthew A. D. and Coppens, Milou J. M. and Lord, Stephen R. and Lovell, Nigel H. and Gschwind, Yves J. and Redmond, Stephen J. and Del Rosario, Michael Benjamin and Wang, Kejia and Sturnieks, Daina L. and Persiani, Michela and Delbaere, Kim. Wearable pendant device monitoring using new wavelet-based methods shows daily life and laboratory gaits are different. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 54(4):663–674, Aug 2015.
- [73] Moufawad el Achkar, Christopher and Lenoble-Hoskovec, Constanze and Paraschiv-Ionescu, Anisoara and Major, Kristof and Büla, Christophe and Aminian, Kamiar. Instrumented shoes for activity classification in the elderly. *Gait & Posture*, 44:12–17, Feb 2016.
- [74] Sardini, E. and Serpelloni, M. Instrumented wearable belt for wireless health monitoring. *Procedia Engineering*, 5:580–583, 2010.
- [75] Sim, S. Y. and Jeon, H. S. and Chung, G. S. and Kim, S. K. and Kwon, S. J. and Lee, W. K. and Park, K. S. Fall detection algorithm for the elderly using acceleration sensors on the shoes. Στο *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. IEEE, Aug 2011.
- [76] Yeo, Woon-Hong and Kim, Yun-Soung and Lee, Jongwoo and Ameen, Abid and Shi, Luke and Li, Ming and Wang, Shuodao and Ma, Rui and Jin, Sung Hun and Kang, Zhan and Huang, Yonggang and Rogers, John A. Multi-functional Epidermal Electronics Printed Directly Onto the Skin. *Advanced Materials*, 25(20):2773–2778, Feb 2013.
- [77] Imani, Somayeh and Bandodkar, Amay J. and Mohan, A. M. Vinu and Kumar, Rajan and Yu, Shengfei and Wang, Joseph and Mercier, Patrick P. A wearable chemical–electrophysiological hybrid biosensing system for real-time health and fitness monitoring. *Nature Communications*, 7(1), May 2016.
- [78] Bian, Zuguang and Song, Jizhou and Webb, R. Chad and Bonifas, Andrew P. and Rogers, John A. and Huang, Yonggang. Thermal analysis of ultrathin, compliant sensors for characterization of the human skin. *RSC Advances*, 4(11):5694, 2014.
- [79] Webb, R. Chad and Bonifas, Andrew P. and Behnaz, Alex and Zhang, Yihui and Kim, Yun-Soung and Yeo, Woon-Hong and Park, Jae Suk and Song, Jizhou and Li, Yuhang and Huang, Yonggang and Gorbach, Alexander M. and

- Rogers, John A. Erratum: Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin. *Nature Materials*, 12(11):1078–1078, Oct 2013.
- [80] Juhl, Claus B. and Højlund, Kurt and Elsborg, Rasmus and Poulsen, Mikael Kjær and Selmar, Peter E. and Holst, Jens Juul and Christiansen, Claus and Beck-Nielsen, Henning. Automated detection of hypoglycemia-induced EEG changes recorded by subcutaneous electrodes in subjects with type 1 diabetes—The brain as a biosensor. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 88(1):22–28, Apr 2010.
- [81] Colm McCaffrey and Olivier Chevalerias and Cian O’Mathuna and Karen Twomey. Swallowable-Capsule Technology. *IEEE Pervasive Computing*, 7(1):23–29, Jan 2008.
- [82] Broekens, J. and Heerink, M. and Rosendal, H. Assistive social robots in elderly care: a review. *Gerontechnology*, 8(2), Apr 2009.
- [83] Robinson, Hayley and MacDonald, Bruce and Broadbent, Elizabeth. The Role of Healthcare Robots for Older People at Home: A Review. *International Journal of Social Robotics*, 6(4):575–591, Jul 2014.
- [84] Spenko, M. and Yu, Haoyong and Dubowsky, S. Robotic Personal Aids for Mobility and Monitoring for the Elderly. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 14(3):344–351, Sep 2006.
- [85] O’Sullivan, Leonard and Power, Valerie and Virk, Gurvinder and Masud, Nauman and Haider, Usman and Christensen, Simon and Bai, Shaoping and Cuyper, Ludo and D’Havé, Michel and Vonck, Kristl. End User Needs Elicitation for a Full-body Exoskeleton to Assist the Elderly. *Procedia Manufacturing*, 3:1403–1409, 2015.
- [86] Johnson, M.J. and Wisneski, K.J. and Anderson, J. and Nathan, D. and Smith, R.O. Development of ADLER: The Activities of Daily Living Exercise Robot. Στο *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006*. IEEE, 2006.
- [87] Pineau, Joelle and Montemerlo, Michael and Pollack, Martha and Roy, Nicholas and Thrun, Sebastian. Towards robotic assistants in nursing homes: Challenges and results. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(3-4):271–281, Mar 2003.

- [88] Pollack, Martha and Brown, Laura and Colbry, Dirk and Orosz, Cheryl and Peintner, Bart and Ramakrishnan, Sailesh and Engberg, Sandra and Matthews, Judith and Dunbar-Jacob, Jacqueline and Mccarthy, Colleen and Montemerlo, Michael and Pineau, Joelle and Roy, Nicholas. Pearl: A Mobile Robotic Assistant for the Elderly. Jun 2002.
- [89] Hans, M. and Graf, B. and Schraft, R.D. Robotic home assistant Care-O-bot: past-present-future. Στο *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*. IEEE, 2002.
- [90] Kittmann, Ralf and Fröhlich, Tim and Schäfer, Johannes and Reiser, Ulrich and Weisshardt, Florian and Haug, Andreas. Let me Introduce Myself: I am Care-O-bot 4, a Gentleman Robot. 09 2015.
- [91] Reiser, Ulrich and Jacobs, Theo and Arbeiter, Georg and Parlitz, Christopher and Dautenhahn, Kerstin. Care-O-bot® 3 — Vision of a Robot Butler. Στο *Your Virtual Butler*, σελίδες 97–116. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [92] Mukai, T. and Hirano, S. and Nakashima, H. and Kato, Y. and Sakaida, Y. and Guo, S. and Hosoe, S. Development of a nursing-care assistant robot RIBA that can lift a human in its arms. Στο *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct 2010.
- [93] Kompai Robotics. Kompai Robots. <https://www.kompai.com>, 2017. [Προσπελάστηκε 7 Μαρτίου 2020].
- [94] Wada, K. and Shibata, T. and Saito, T. and Sakamoto, K. and Tanie, K. Psychological and Social Effects of One Year Robot Assisted Activity on Elderly People at a Health Service Facility for the Aged. Στο *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2005.
- [95] Masao Kanamori and Mizue Suzuki and Misao Tanaka. Maintenance and Improvement of Quality of Life among Elderly Patients Using a Pet-Type Robot. *Nippon Ronen Igakkai Zasshi. Japanese Journal of Geriatrics*, 39(2):214–218, 2002.
- [96] Tamura, T. and Yonemitsu, S. and Itoh, A. and Oikawa, D. and Kawakami, A. and Higashi, Y. and Fujimooto, T. and Nakajima, K. Is an Entertainment Robot Useful in the Care of Elderly People With Severe Dementia? *The*

- Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 59(1):M83–M85, Jan 2004.
- [97] Kort, Helianthe and Huisman, Chantal. Care Robot ZORA in Dutch Nursing Homes; An Evaluation Study. *Studies in Health Technology and Informatics*, 242(Harnessing the Power of Technology to Improve Lives):527–534, 2017.
- [98] Melkas, Helinä and Hennala, Lea and Pekkarinen, Satu. Human impact assessment of robot implementation in Finnish elderly care. Στο , 2006.
- [99] Parviainen, Jaana and Van Aerschot, Lina and Särkikoski, Tuomo and Pekkarinen, Satu and Melkas, Helinä and Hennala, Lea. Motions with Emotions? Στο *Robophilosophy/TRANSOR*, σελίδες 210–219, 2016.
- [100] Bettini, Claudio and Brdiczka, Oliver and Henricksen, Karen and Indulska, Jadwiga and Nicklas, Daniela and Ranganathan, Anand and Riboni, Daniele. A survey of context modelling and reasoning techniques. *Pervasive and Mobile Computing*, 6(2):161–180, Apr 2010.
- [101] Ghayvat, Hemant and Liu, Jie and Mukhopadhyay, Subhas Chandra and Gui, Xiang. Wellness Sensor Networks: A Proposal and Implementation for Smart Home for Assisted Living. *IEEE Sensors Journal*, 15(12):7341–7348, Dec 2015.
- [102] Memon, Mukhtiar and Wagner, Stefan and Pedersen, Christian and Beevi, Femina and Hansen, Finn. Ambient Assisted Living Healthcare Frameworks, Platforms, Standards, and Quality Attributes. *Sensors*, 14(3):4312–4341, Mar 2014.
- [103] Sun, Hong and De Florio, Vincenzo and Gui, Ning and Blondia, Chris. Promises and Challenges of Ambient Assisted Living Systems. 2009.
- [104] Matarić, Maja J. Socially assistive robotics: Human augmentation versus automation. *Science Robotics*, 2(4), Mar 2017.
- [105] Ben Salem, Maha and Dautenhahn, Kerstin. Evaluating Trust and Safety in HRI : Practical Issues and Ethical Challenges. 2015.
- [106] Reeder, Blaine and Meyer, Ellen and Lazar, Amanda and Chaudhuri, Shomir and Thompson, Hilaire J. and Demiris, George. Framing the evidence for health smart homes and home-based consumer health technologies as a public health intervention for independent aging: A systematic review. *International Journal of Medical Informatics*, 82(7):565–579, Jul 2013.

- [107] Wass, S. and Vimarlund, V. Big Data, Smart Homes and Ambient Assisted Living. *Yearbook of Medical Informatics*, 23(01):143–149, Aug 2014.
- [108] Manetti, S. and Orsini, N. and Turchetti, G. Early health economic models of new ambient assisted living (AAL) devices for falls prevention. *European Journal of Public Health*, 27, Oct 2017.
- [109] Eisma, R. and Dickinson, A. and Goodman, J. and Syme, A. and Tiwari, L. and Newell, A. F. Early user involvement in the development of information technology-related products for older people. *Universal Access in the Information Society*, 3(2):131–140, Jun 2004.
- [110] Ostlund, B. Design Paradigms and Misunderstood Technology: The Case of Older Users. Στο *Young technologies in old hands: an international view on senior citizen's utilization of ICT*, σελίδες 25–39. DJOFPublishing, 2005.
- [111] Peine, Alexander and Rollwagen, Ingo and Neven, Louis. The rise of the “innosumer”—Rethinking older technology users. *Technological Forecasting and Social Change*, 82:199–214, Feb 2014.
- [112] Vines, John and Pritchard, Gary and Wright, Peter and Olivier, Patrick and Brittain, Katie. An Age-Old Problem. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 22(1):1–27, Feb 2015.
- [113] Piau, Antoine and Campo, E. and Rumeau, P. and Vellas, B. and Nourhashemi, F. Aging society and gerontechnology: A solution for an independent living? *The journal of nutrition, health & aging*, 18(1):97–112, Jul 2013.
- [114] Martin, Suzanne and Kelly, Greg and Kernohan, W George and McCreight, Bernadette and Nugent, Christopher. Smart home technologies for health and social care support. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, Oct 2008.
- [115] Morris, Meg and Adair, Brooke and Miller, Kimberly and Ozanne, Elizabeth and Hampson, Ralph and Pearce, Alan and Santamaria, Nick and Viegas, L and Long, Maureen and Said, Catherine. Smart-Home Technologies to Assist Older People to Live Well at Home. *Journal of Aging Science*, 1:101, 01 2013.
- [116] Klir, George J. and Yuan, Bo. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [117] Nguyen, Hung and Walker, Elbert. *A First Course in Fuzzy Logic*, Third Edition. 2005.

- [118] Nath, Suman and Liu, Jie and Zhao, Feng. SensorMap for Wide-Area Sensor Webs. *Computer*, 40(7):90–93, Jul 2007.
- [119] Truong, Cuong and Romer, Kay and Chen, Kai. Fuzzy-based sensor search in the Web of Things. Στο *2012 3rd IEEE International Conference on the Internet of Things*. IEEE, Oct 2012.
- [120] Truong, Cuong and Romer, Kay. Content-based sensor search for the Web of Things. Στο *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, Dec 2013.
- [121] Roggen, Daniel and Calatroni, Alberto and Rossi, Mirco and Holleczeck, Thomas and Förster, Kilian and Tröster, Gerhard and Lukowicz, Paul and Bannach, David and Pirkel, Gerald and Ferscha, Alois et al. Collecting complex activity datasets in highly rich networked sensor environments. Στο *2010 Seventh international conference on networked sensing systems (INSS)*, σελίδες 233–240. IEEE, 2010.
- [122] Chavarriaga, Ricardo and Sagha, Hesam and Calatroni, Alberto and Digumarti, Sundara Tejaswi and Tröster, Gerhard and Millán, José del R and Roggen, Daniel. The Opportunity challenge: A benchmark database for on-body sensor-based activity recognition. *Pattern Recognition Letters*, 34(15):2033–2042, 2013.
- [123] Reiss, Attila and Stricker, Didier. Introducing a New Benchmarked Dataset for Activity Monitoring. Στο *Proceedings of the 2012 16th International Symposium on Wearable Computers*, σελίδες 108–109. IEEE, 2012.
- [124] Reiss, Attila and Stricker, Didier. Creating and Benchmarking a New Dataset for Physical Activity Monitoring. Στο *Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, σελίδες 1–8. ACM, 2012.
- [125] Chen, Liming and Hoey, Jesse and Nugent, Chris D and Cook, Diane J and Yu, Zhiwen. Sensor-based activity recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 42(6):790–808, 2012.
- [126] Kaye, Jane and Whitley, Edgar A and Lund, David and Morrison, Michael and Teare, Harriet and Melham, Karen. Dynamic consent: a patient interface for twenty-first century research networks. *European Journal of Human Genetics*, 23(2):141–146, 2015.

